



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

GLORIA YAMILETH BOLÍVAR DURÁN

**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.**

FORTALEZA

2020

GLORIA YAMILETH BOLÍVAR DURÁN

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.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia. Área de concentração: Dinâmica Territorial e Ambiental. Linha de Pesquisa: Estudo Socioambiental da Zona Costeira.

Orientadora: Profa. Dra. Adryane Gorayeb.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D952a Durán, Gloria Yamileth Bolívar.

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 / Gloria Yamileth Bolívar Durán. – 2020.
290 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Fortaleza, 2020.

Orientação: Profa. Dra. Adryane Gorayeb Caetano.

1. Detecção de mudanças. 2. Uso e cobertura da terra. 3. Sensoriamento remoto. 4. Parques eólicos. 5. Ceará. I. Título.

CDD 910

GLORIA YAMILETH BOLÍVAR DURÁN

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.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia. Área de concentração: Dinâmica Territorial e Ambiental. Linha de Pesquisa: Estudo Socioambiental da Zona Costeira.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Adryane Gorayeb (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jean-François Mas
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Prof. Dr. Antonio Conceição Paranhos Filho
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS)

Prof. Dr. Antonio Jeovah de Andrade Meireles
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. PhD. Adunias dos Santos Teixeira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Henrique Sopchaki
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Depois de uma longa caminhada, diversos desafios, alegrias e tristezas, quero agradecer pelos momentos vividos, pelas pessoas conhecidas, pelos lugares lindos que vi e que ficarão na minha memória.

Primeiramente a Deus, por ser meu amigo que nunca falha, me mostrando o caminho no momento certo para aprender, evoluir e recomeçar uma nova vida.

A minha mãe Guillermina, por ser meu anjo da guarda, sempre junto apesar da distância, sempre me apoiando, acreditando em mim. Com a saudade no peito, desejo comemorar esta fase da vida que você ajudou a construir.

A Anderson, por seu amor, paciência e parceria durante todo este tempo, você foi parte importante neste trabalho e parte importante da minha vida. A família Scoti que também me apoio em todo momento e me acolheu como parte da família.

A minha orientadora Adryane Gorayeb, pela orientação, muito obrigada pelas oportunidades, novidades, incentivo, disposição, apoio, parceria, paciência, acolhimento e amizade, foi muito bom trabalhar com você. Muito obrigada por me acolher junto com sua família, por mostrar como é ser mulher superpoderosa, meus respeitos e admiração.

Ao professor Antônio Jeovah Meireles, pela colaboração, aulas de campo e suas contribuições relevantes ao longo de toda a tese. A todos os professores do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Ceará, que disponibilizaram seu tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões e que me ajudaram sempre que precisei.

Aos colegas do Doutorado e do Labocart, cada um com seu estilo particular: Nicolly Leite, Wallason Farias, Leilane Chaves, Paula Alves Tomaz, Wellington Romão, Davy Rabelo, Thomaz Xavier, Ana Larissa Freitas, Jocicléa Mendes, Gislleidy Uchôa, Ana Neri, Viviane Amenajas pelo tempo durante os trabalhos de campo, apoio, sugestões, parceria e amizade. Contribuíram a fazer da minha estadia no Ceará uma maravilha.

Ao professor Emilio Chuvieco por sua paciência e as valiosas recomendações que contribuíram a melhorar este trabalho. Merecem reconhecimento os professores do Departamento de Geografia da Universidad de Alcalá: Mariano Garcia, Francisco Aguilera, Javier Salas, Mario Burgui, pela parceria,

sugestões, colaboração e novos conhecimentos, sou muito grata em ter conhecido todos vocês, aprendi muito da experiência acadêmica e de vida.

Aos colegas do laboratório de Cartografia, SIG y Teledetección da Universidad de Alcalá: Lucrecia Pettinari, Geovanna Hinojoza, Alba Viana, Gonzalo Otón, Karina Zelaya, Magi Franquesa, Macarena Garcia, Tarek Sh, Felix Clasman, Rubén Ramos, pela parceria, apoio, acolhimento, atenção, conhecimentos, amizade, saudade de vocês e os momentos vividos.

A Gabriela Quintana da Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) pelas ideias, sugestões e aportes neste trabalho com o uso das imagens ALOS PALSAR, além da amizade e companhia nos piores momentos, longas conversas intelectuais e da vida, amizade sem fronteiras. Muito obrigada.

A Fani Araque, pela parceria, pelo apoio nos momentos difíceis, aquelas longas conversas que muitas vezes deram apoio, carinho e risadas, muito obrigada pela amizade.

A Zoraida Abreu por sempre torcer pelo meu sucesso, por sempre me ajudar quando precisei e porque essa pessoa maravilhosa que vive em você inspira aos outros a procurar a prosperidade, só uma pessoa próspera como você consegue isso. Muito obrigada.

A professora Andrea Nummer, Wellerson Pessotto, Indiara Moraes, Thomás Lixinski, Romario Trentin e Débora Baratto da Universidade Federal de Santa Maria, pela parceria, amizade, risadas, um time genial que me acolheu na última fase do doutorado.

As comunidades de Cumbe e Xavier, por servir de inspiração e apoio nos trabalhos de campo. Na comunidade de Xavier em especial ao Sr. Domingos, D´Jesus, Francisco (Nunes), sempre dispostos a colaborarem com a pesquisa.

À OEA – GCUB pela oportunidade de cursar o doutorado no Brasil e a Coordenadoria de Aperfeiçoamento em Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Aos projetos que deram apoio logístico e financeiro: FUNCAP pelo subsidio através do projeto PRONEM/FUNCAP Proc. PNE 0112-00068.01.00/16 "Análise socioambiental da implantação de parques eólicos no Nordeste: perspectivas para a sustentabilidade da geração de energia renovável no Brasil. CAPES PGPSE Proc. 88887.123947/201-6-00: Sistemas Ambientais costeiros e

ocupação econômica do Nordeste; CAPES PRINT Proc. 88887.312019/2018-00: Integrated socio-environmental technologies and methods for territorial sustainability: alternatives for local communities in the context of climate change; e Programa CAPES/FUNCAP Proc. 88887.165948/2018-00: Apoio às Estratégias de Cooperação Científica do Programa de Pós-Graduação em Geografia – UFC.

A todos aqueles que contribuíram de diversas formas na elaboração deste trabalho.

“A terra ensina-nos mais acerca de nós próprios do que todos os livros. Porque ela nos resiste”.

Antoine de Saint-Exupéry

RESUMO

As planícies costeiras do Baixo Jaguaribe no Município Aracati, no litoral leste, e de Camocim no litoral oeste no município do mesmo nome, no Estado do Ceará, são espaços geográficos, com suas peculiaridades e diferenças, com relação à geomorfologia, uso e ocupação da terra e desenvolvimento da carcinicultura. A partir do ano 2008, houve uma mudança sobre os campos de dunas móveis, com a construção de parques eólicos para geração de energia elétrica. O objetivo deste trabalho foi analisar as mudanças no uso e cobertura da terra nas planícies costeiras do Baixo Jaguaribe e Camocim no Estado do Ceará num período de 33 anos, utilizando técnicas de detecção de mudanças multitemporais em imagens de sensores ativos e passivos para estabelecer a relação das mudanças produzidas com a instalação de parques eólicos. Os métodos para detecção de mudanças foram abordados de acordo com o tipo de sensor. Na análise multitemporal foram utilizadas imagens ópticas imageadas em datas relacionadas com o período seco, do sensor LANDSAT 5-TM, Landsat 7-ETM+ e LANDSAT 8-OLI entre os anos 1985 até 2018, sendo aplicados o método de comparação pós classificação e o método de matriz de transições significativas. Com as imagens do sensor de radar ALOS PALSAR entre os anos 2008 e 2011 foi utilizada a detecção de mudanças incoerentes. Para a detecção de mudanças deslocamento nos campos de dunas foi utilizada a análise de mistura espectral. No caso das imagens ópticas, o método de comparação pós classificação mostrou as mudanças para as 11 classes de uso e cobertura estabelecidas, enquanto a análise da matriz das transições significativas mostrou as relações de mudança desde a proporção, intensidade, transição e hierarquia. Com as imagens ALOS PALSAR foi possível discriminar as áreas de mudanças e não mudança, baseado no incremento e decréscimo do retroespalhamento, revelando feições de mudanças na planície costeira e o processo de construção do parque eólico no campo de dunas móveis. Foi demonstrado que as mudanças de uso e cobertura identificadas na planície costeira como um todo, não demonstraram ter relação com a implantação dos parques eólicos sobre o campo de dunas móveis. Destacaram as transições de maior intensidade entre as classes arbustivo, arbustivo caducifólio e cultivos, as transições de áreas úmidas e manguezal para carcinicultura em Aracati e Camocim, assim como a expansão das terras urbanas sobre o campo de dunas em Aracati. A análise de mistura espectral

nos campos de dunas móveis, mostrou dois comportamentos nas áreas mais próximas ao parque eólico: em Aracati não foi identificada uma mudança significativa em termos de redução no deslocamento das dunas, mas em Camocim a redução no deslocamento foi evidente e parece manter-se no tempo. A implantação dos aerogeradores causou transformações morfológicas no campo de dunas. Recomendam-se estudos específicos que ajudem a determinar a relação da redução no deslocamento das dunas nas áreas de estudo com a interferência de outras variáveis, estacionais e/ou climáticas além do parque eólico. A detecção de mudanças deve ser aplicada antes e depois da construção dos parques eólicos para melhor identificação e avaliação do impacto.

Palavras-chave: Detecção de mudanças. Uso e cobertura. Sensoriamento remoto. Parques eólicos.

ABSTRACT

The coastal plains of Baixo Jaguaribe in the municipality of Aracati, on the east coast, and the coastal plain of Camocim on the west coast in the municipality of the same name, in the state of Ceará, are geographical spaces, with their peculiarities and differences, with respect to geomorphology, land use, occupation and development of shrimp farming. As of 2008, there has been a change in the field of mobile dunes, with the construction of wind farms to generate electricity. The objective of this research was to analyze the changes in land use and land cover in the coastal plains of Baixo Jaguaribe and Camocim located in the state of Ceará over a period of 33 years, using techniques for detecting multitemporal changes in active and passive sensor images to establishing the relationship with the changes produced by the installation of wind farms. The methods for change detection were applied according to the type of sensor. In the multitemporal analysis, orbital images on dates related to the dry period were chosen, from the LANDSAT 5-TM, Landsat 7-ETM + and LANDSAT 8-OLI sensors between the years 1985 to 2018, and were applied post classification comparison method and the transition or change matrix. With the radar sensor ALOS PALSAR, was used images from 2008 to 2011, using incoherent changes detection method. To change detection in the dune fields, spectral mixture analysis was used to determine the displacement in the dune field. In the case of optical images, the post classification comparison method showed the changes for 11 land-use/land-cover classes established; while the change matrix analysis showed the change relationships from proportion, intensity, transition and hierarchy. With the ALOS PALSAR images it was possible to discriminate the change areas and non-change areas, based on the increment and decrease of backscatter value, revealing changes features in the coastal plain and in the construction process of the wind farm in the mobile dunes field. It was established that land use – land cover changes identified on the coastal plain as a whole have no relation with the deployment of wind farms over the mobile dune field. Both in Aracati and Camocim Highlighted the most intense transitions between the shrub, deciduous shrub and cultivation classes, the transitions from wetlands and mangroves to shrimp farming, as well as the urban lands expansion over the dune field in Aracati. The spectral mixture analysis in the mobile dunes fields, showed two behaviors in the areas closest to the wind farm: in Aracati a significant change was not identified in terms of

reduction in the displacement of the dunes, but in Camocim the reduction in displacement was evident and it seems sustained over time. Specific studies are recommended to help determine the relationship between the reduction in the displacement of the dunes in the study areas and the interference of other variables, such as seasonal and/or climatic events beyond the wind farm. Change detection should be applied before and after the construction of wind farms to better identify and avaluation of the impact

Keywords: Change Detection. Land Use / Land Cover. Remote sensing. Wind farm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Ângulos utilizados para o cálculo das matrizes de co-ocorrência.....	65
Figura 2	- Análise de intensidade da dinâmica de mudanças a nível crescente de detalhe.....	89
Figura 3	- Matriz de transição que mostra a estimação do Intercambio (Int), mudança total (Mt), mudança líquida (Mn), ganho (Gij), perda (Pdij) entre as classes (Cl), da data 1 até a data 2.....	90
Figura 4	- Conceito de Local Ternary Patterns (LTP) para classificação de elementos de terreno. A) Um DEM com a célula de interesse. (B) Representação ternária de elevações relativas entre a célula de interesse e seus vizinhos. (C) Três formas diferentes de padrão ternário. (D) Atribuição de LTP a uma célula no raster classificada como geomorphon #2159.....	109
Figura 5	- Morfologias e seus correspondentes geomorphons.....	110
Figura 6	- Resultado do Gap Fill nas imagens Landsat de Camocim (superior) e Aracati (inferior)	118
Figura 7	- Descrição das classes para o mapeamento de uso e cobertura em Aracati e Camocim.....	123
Figura 8	- Descrição das classes para o mapeamento de uso e cobertura em Aracati e Camocim.....	124
Figura 9	- Métodos de detecção de mudanças com sensores óticos.....	126
Figura 10	- Métodos de detecção de mudanças com sensor ativo.....	127
Figura 11	- Métodos de detecção de mudanças no campo de dunas.....	132
Figura 12	- Ortofoto e resultado dos geomorphons. a: Duna barcanóide; b: Evidências de marcas espaço-temporais no campo de dunas móveis em Camocim.....	134
Figura 13	- Ortofoto e resultado dos geomorphons. a: Duna barcana; b: Lagoa interdunal cortada por uma estrada de acesso do parque eólico em Camocim, com evidências de marcas espaço-temporais; c: Série de dunas barcanóides cuja altura é superior	

	a 35 m.....	134
Figura 14	- Estruturas lineares de eolianitos em Camocim e localização no ortofoto e em campo.....	135
Figura 15	- Ortofoto e resultado dos geomorphons. a: Dunas longitudinais em Aracati; b: Lagoa interdunar que encontrava-se seca; c: Faixa de praia.....	136
Figura 16	- Ortofoto e resultado dos geomorphons. A: Tanques de criação de camarão; b: Crista da duna longitudinal e a base da duna em Aracati.....	136
Figura 17	- Delimitação de dunas móveis e dunas fixas com o resultado dos geomorphons em Aracati.....	137
Figura 18	- a. Dunas barcanóides no campo de dunas móveis em Camocim. b. Dunas longitudinais no campo de dunas móveis em Aracati.....	145
Figura 19	- a. Dunas fixas em Aracati. b. Dunas fixas em Camocim próximas a planície fluviomarinha na foz do Rio Tapuio no campo de dunas móveis em Aracati; c. e d. Dunas em processo de fixação natural e artificial em Aracati.	146
Figura 20	- Cordão litorâneo em Camocim próximo a foz do Rio Tapuio.....	147
Figura 21	- a. Faixa de praia próxima ao campo de dunas móveis em Aracati. b. Faixa de praia próxima da comunidade de Xavier em Camocim.....	148
Figura 22	- Marcas espaço-temporais e lagoas interdunares, próximas à localidade de Maceió em Camocim.....	149
Figura 23	- a. Brejo interdunal. b e c. Lagoas interdunares entre dunas barcanóides em Camocim em época de seca.....	150
Figura 24	- a. Área de vazante próxima à comunidade de Xavier em Camocim. b. Área de vazante próxima à localidade Canavieira em Aracati.....	151
Figura 25	- a. Ocorrência de nebkas em loteamento próximo à Canoa Quebrada. b. Ocorrência de nebkas em Camocim.....	152
Figura 26	- Dinâmica eólica afetando construções em um loteamento sobre a planície de deflação próximo à Canoa Quebrada em	

	Aracati.....	153
Figura 27	- Mineração na planície aluvial do rio Coreaú.....	154
Figura 28	- Foz do rio Tapuio em Camocim.....	155
Figura 29	- Área de manguezal na planície fluvio-marinha do rio Jaguaribe, em Aracati, ao fundo o parque eólico sobre o campo de dunas móveis.....	156
Figura 30	- a,b,c. Construção de tanques de carcinicultura na planície fluvio-marinha do rio Coreaú, Camocim. d. Tanque sem água para produção de camarão em Cumbe, Aracati. e. Criadouro de camarão em Cumbe, Aracati. f. Construção de tanque para criação de camarão no rio Coreaú, Camocim.....	156
Figura 31	- Aerogeradores instalados sobre o tabuleiro pré-litorâneo em Aracati.....	158
Figura 32	- Eolianitos vistos nas ortofotos e em visita de campo nas proximidades da comunidade de Maceió em Camocim.....	160
Figura 33	- a. Estratificação plano-paralela dos eolianitos. b. Raízes petrificadas (rizocrisol) em forma de estruturas tubulares verticais na planície de deflação em Camocim.....	160
Figura 34	- Beachrocks na praia de Xavier em Camocim.....	161
Figura 35	- Falésias em Aracati.....	162
Figura 36	- Falésia em Camocim, próximo da foz do rio Coreaú.....	163
Figura 37	- Construções sobre as falésias em Quixabá e Aracati.....	164
Figura 38	- Série Temporal de Imagens Landsat em Aracati entre 1975 – 2018.....	166
Figura 39	- Uso e Cobertura da terra na área de estudo em Aracati, entre os anos 1986 e 2018.	169
Figura 40	- Distribuição em ha, das mudanças positivas e negativas líquidas por cada classe de uso e cobertura entre 1986 e 2018 em Aracati.....	171
Figura 41	- Mudanças anuais gerais (%) em Aracati entre os anos 1986 e 2018.....	172
Figura 42	- Intensidade das mudanças em termos de velocidade entre 1986 e 2018 em Aracati.	173

Figura 43	-	Relação de ganhos e perdas por classe e sua correspondente intensidade de mudança anual em Aracati entre 1986 e 2018.....	175
Figura 44	-	Tabelas com o comportamento dinâmico de cada classe por intervalo de tempo em Aracati.....	177
Figura 45	-	Transições significativas e não significativas no período 2008 – 2012 em Aracati.....	184
Figura 46	-	Transições do Manguezal para áreas úmidas e corpos de água. A. Poucos manguezais na beira do rio e no fundo área úmida com carnaúbas. B. Manguezal morto próximo ao rio Jaguaribe onde é visível a lâmina de água dentro dos restos do mangue. C. Manguezal morto que continua ao longo de um dos braços do Jaguaribe, no fundo a ponte da estrada da Canaviera.....	187
Figura 47	-	Transição de perda do manguezal pelo avanço das dunas. A. Imagem do catálogo de Google Earth mostrando o local do canal sinuoso ou gamboa onde foi tomada a foto B. B. Limite do campo de dunas e o manguezal onde foi relatado o avanço da duna, a uns 700m aproximadamente de um aerogerador.....	189
Figura 48	-	Transições significativas e não significativas no período 2017 – 2018 em Aracati.....	190
Figura 49	-	Intensidade de mudança dos arbustos baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.....	191
Figura 50	-	Intensidade de mudança dos arbustos caducifólios baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.....	192
Figura 51	-	Intensidade de mudança dos cultivos baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.....	193
Figura 52	-	Intensidade de mudança das gramíneas baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.....	193
Figura 53	-	Intensidade de mudança da carcinicultura baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.....	195
Figura 54	-	Intensidade de mudança das áreas úmidas baseado nos	

	ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.....	196
Figura 55	- Intensidade de mudança das terras urbanas baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.....	197
Figura 56	- Comparação dos resultados com os métodos Composição RGB, Log Ratio e Segmentação em Aracati.....	198
Figura 57	- Identificação das mudanças nos métodos: combinação RGB (esquerda) e Log Ratio (direita) entre 2007 e 2011 em Aracati.....	199
Figura 58	- Identificação de mudanças causadas pela construção do parque eólico em Aracati entre 2007 e 2011 pelo método Log Ratio.....	202
Figura 59	Proporções de mudanças e não mudanças pela construção do parque eólico em Aracati entre 2007 e 2011 pelo método Log Ratio.....	203
Figura 60	- Série Temporal de Imagens Landsat em Aracati, com ênfase no campo de dunas móveis e lagoas interdunares entre 1975 – 2006.....	205
Figura 61	- Série Temporal de Imagens Landsat em Aracati, com ênfase no campo de dunas móveis e lagoas interdunares entre 2007 – 2018.....	206
Figura 62	- Série Temporal de Imagens Landsat em Aracati entre 1975 – 2003, com ênfase na lagoa interdunal afetada pela construção do parque eólico.....	208
Figura 63	- Série Temporal de Imagens Landsat em Aracati entre 2004 – 2018, com ênfase na lagoa interdunal afetada pela construção do parque eólico.....	209
Figura 64	- Localização dos pontos de observação escolhidos para obter valores do deslocamento das dunas em Aracati. Imagem Landsat 8 OLI RGB 453, 24-07-2018.....	212
Figura 65	- Visualização das mudanças nas dunas em Aracati. Alguns exemplos dos maiores deslocamentos entre 1986 e 2018.....	213
Figura 66	- Tendência do deslocamento das dunas por ponto de observação no campo de dunas de Aracati entre 1986 e	

	2018.....	215
Figura 67	- Processo de fixação artificial de dunas. 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 Ciano. 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.....	218
Figura 68	- Série Temporal de Imagens Landsat em Camocim entre 1973 – 2009.....	219
Figura 69	- Série Temporal de Imagens Landsat em Camocim entre 2010 – 2018.....	220
Figura 70	- Uso e Cobertura da terra na área de estudo em Camocim, entre os anos 1985 e 2018.....	223
Figura 71	- Distribuição em ha, das mudanças positivas e negativas líquidas por cada classe de uso e cobertura entre 1985 e 2018 em Camocim.....	225
Figura 72	- Mudanças anuais gerais (%) em Camocim entre os anos 1985 e 2018.....	226
Figura 73	- Intensidade da mudança em termos de velocidade entre 1985 e 2018 em Camocim.....	227
Figura 74	- Relação de ganhos e perdas por classe e sua correspondente intensidade de mudança anual em Camocim entre 1985 e 2018.....	228
Figura 75	- Tabelas com o comportamento dinâmico de cada classe por intervalo de tempo em Camocim.....	230
Figura 76	- Transições significativas e não significativas no período 1994 – 2000 em Camocim.....	238
Figura 77	- Transições significativas e não significativas no período 2000 – 2004 em Camocim.....	243
Figura 78	- Intensidade de mudança da classe arbustivo baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.....	244
Figura 79	- Intensidade de mudança da classe arbustivo caducifólio	

	baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.....	245
Figura 80	- Intensidade de mudança da classe cultivos baseados nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.....	245
Figura 81	- Intensidade de mudança do carcinicultura baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.....	247
Figura 82	- Intensidade de mudança das dunas baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.....	247
Figura 83	- Intensidade de mudança das gramíneas baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.....	248
Figura 84	- Intensidade de mudança das terras urbanas baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.....	249
Figura 85	- Série Temporal de Imagens Landsat em Camocim, com ênfase no campo de dunas móveis e lagoas interdunares entre 1972 – 2004.....	252
Figura 86	- Série Temporal de Imagens Landsat em Camocim, com ênfase no campo de dunas móveis e lagoas interdunares entre 2005 – 2018.....	253
Figura 87	- Lagoa do Ferreira e dunas barcanóides em Camocim, seccionadas pela estrada de acesso aos aerogeradores.....	255
Figura 88	- Variações da lâmina de água de uma lagoa interdunal e uma duna barcanoide em Camocim, próximo ao parque eólico. *Letras a, b, c indicam o lugar onde foi tirada a foto da lagoa em datas diferentes.....	256
Figura 89	- Localização dos pontos escolhidos para obter valores do deslocamento das dunas em Camocim. Imagem Landsat 8 OLI RGB 453, 23-08-2018.....	257
Figura 90	- Visualização das mudanças nas dunas em Camocim. Alguns exemplos dos maiores deslocamentos entre 1985 e 2018.....	258
Figura 91	- Tendência do deslocamento das dunas por ponto de observação no campo de dunas de Camocim entre 1985 e 2018.....	260

LISTA DE MAPAS

Mapa 1	- Mapa imagem da área de estudo Aracati.....	39
Mapa 2	- Mapa imagem da área em Camocim.....	40
Mapa 3	- Mapa de Unidades Geoambientais e Fluxos de Matéria e Energia no Baixo Jaguaribe.....	138
Mapa 4	- Mapa de Unidades Geoambientais e Fluxos de Matéria e Energia na área de Camocim.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Período de ocorrência de El Niño e La Niña, intensidade do fenômeno e anos de seca no Ceará.....	42
Tabela 2	- Precipitação média anual no município de Aracati entre 1984 – 2019.....	44
Tabela 3	- Precipitação média anual no município de Camocim entre 1984 – 2019.....	44
Tabela 4	- Características da série de satélites Landsat.....	50
Tabela 5	- Características do sistema RapidEye.....	51
Tabela 6	- Características do satélite QuickBird.....	52
Tabela 7	- Comprimentos de onda e frequência de RADAR usados em investigações de sensoriamento remoto por micro-ondas ativas.....	53
Tabela 8	- Características do satélite ALOS PALSAR.....	55
Tabela 9	- Coeficientes Tasseled Cap para uso com dados do Landsat 5 TM.....	63
Tabela 10	- Coeficientes Tasseled Cap para uso com dados do Landsat 7 ETM+.....	63
Tabela 11	- Coeficientes Tasseled Cap para uso com dados do Landsat 8 OLI.....	63
Tabela 12	- Valores de referência do coeficiente de Kappa.....	73
Tabela 13	- Imagens disponíveis para área de Aracati e Camocim.....	112
Tabela 14	- Valores de exatidão global e índice Kappa associadas as classificações de imagens na área de Aracati.....	168
Tabela 15	- Superfície em ha correspondente a cada classe por ano, das mudanças líquidas entre cada classe de uso e cobertura entre 1986 e 2018 em Aracati.....	171
Tabela 16	- Matriz de transição para os ganhos entre 2008 – 2012 em Aracati.....	180
Tabela 17	- Matriz de transição para as perdas entre 2008 – 2012 em Aracati.....	182
Tabela 18	- Matriz de transição dos ganhos entre 2017 e 2018 em	

	Aracati.....	185
Tabela 19	- Matriz de transição das perdas entre 2017 e 2018 em Aracati.....	188
Tabela 20	- Superfícies de mudança com o método incoerente entre os anos 2007 e 2011 em Aracati.....	201
Tabela 21	- Valores de deslocamento das dunas por ponto distribuído no campo de dunas de Aracati entre 1986 e 2018.....	215
Tabela 22	- Valores de exatidão global e índice Kappa associadas às classificações de imagens na área de Camocim.....	222
Tabela 23	- Superfície em ha correspondente a cada classe por ano, das mudanças líquidas entre cada classe de uso e cobertura entre 1985 e 2018 em Camocim.....	225
Tabela 24	- Matriz de transição dos ganhos entre 1994 – 2000 em Camocim.....	234
Tabela 25	- Matriz de transição das perdas entre 1994 – 2000 em Camocim.....	236
Tabela 26	- Matriz de transição dos ganhos entre 2000 – 2004 em Camocim.....	239
Tabela 27	- Matriz de transição das perdas entre 1994 – 2000 em Camocim.....	241
Tabela 28	- Valores de deslocamento das dunas por ponto distribuído no campo de dunas de Camocim entre 1985 e 2018.....	260

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
AME	Análise de Mistura Espectral
AOT	Aerosol Óptical Thickness
APA	Área de Proteção Ambiental
ASF	Alaska Satellite Facility
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVNIR-2	Advanced Visible And Near Infrared Radiometer Type 2
CCD	Charge Coupled Device
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DOS	Dark Object Subtraction
DM	Distância de Mahalanobis
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ENVI	Environment for Visualizing Images
ERDAS	Earth Resource Development Assessment System
ESA	European Space Agency
ETM	Enhanced Thematic Mapper Plus
FBD	Fine Beam Dual
FBS	Fine Beam Single
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes
FRB	Fator de Reflectância Bidirecional
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GEE	Google Earth Engine
GHz	Giga-Hertz
GLCM	Gray-Level Co-occurrence Matrix
GPS	Global Positioning System
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
GTOPO	Global Topography
ha	Hectare
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
IVP	Infravermelho Próximo
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
Km	Kilômetros
Landsat	Land Remote Sensing Satellite
LaSRC	Landsat 8 Surface Reflectance Code
LEDAPS	Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing
LIDAR	Light Detection And Ranging
Log	Logaritmo
LRR	Linear Regression Rate
MAD	Multivariate Alteration Detection
MAXVER	Máxima Verossimilhança
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MHz	Mega-hertz
MNET	Modelo Numérico de Elevação do Terreno
MNF	Minimum Noise Fraction
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MODTRAN	Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance Algorithm
m.s.n.m.	Metros Sobre o Nível do Mar
MSS	Multispectral Scanner Subsystem
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ND	Número Digital
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OLI	Operational Land Image
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PIF	Pseudoinvariant Features
PLR	Polarimetric
PPI	Pixel Purity Index
PRISM	Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas

PSTP	Pairs of Source and Target Points
QA	Quality Assessment
RADAR	Radio Detecting And Ranging
RAS	Relatorio Ambiental Simplificado
RBV	Return Beam Vidicon
REM	Radiação Eletromagnética
RGB	Red, Green e Blue
RMSE	Root-Mean-Square Error
SAR	Synthetic Aperture Radar
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará
SI	Sistema Internacional
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SLC	ScanLine Corrector
SNAP	Sentinel Application Platform
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SR	Surface Reflectance
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
SVM	Support Vector Machines
6S	Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
TTC	Transformacao Tasseled Cap
TM	Thematic Mapper
TOA	Top of the Atmosphere
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transversa de Mercator
WB	Wide Beam
WGS	World Geodetic System
WRS	World Reference System
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	30
1.1	Hipóteses.....	36
1.2	Objetivo geral e específicos.....	36
1.3	Descrição das áreas de estudo.....	37
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	47
2.1	Conceitos básicos em Sensoriamento Remoto.....	47
2.2	Sensores óticos de média e alta resolução espacial.....	48
2.2.1	<i>Sensores passivos.....</i>	48
2.2.2	<i>Sensores ativos: radar de abertura sintética.....</i>	53
2.3	Grandezas radiométricas.....	55
2.4	Processamento digital de imagens para detecção de mudanças.....	57
2.4.1	<i>Correção Geométrica.....</i>	57
2.4.2	<i>Calibração Radiométrica.....</i>	58
2.4.3	<i>Técnicas complementares.....</i>	60
2.4.3.1	<i>Google Earth Engine (GEE).....</i>	60
2.4.3.2	<i>Máscara de nuvens.....</i>	60
2.4.3.3	<i>Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)</i>	61
2.4.3.4	<i>Transformação Tasseled Cap (TTC).....</i>	62
2.4.3.5	<i>Descrição de textura.....</i>	64
2.4.3.6	<i>Medida de separabilidade.....</i>	66
2.4.4	<i>Métodos de classificação.....</i>	67
2.4.5	<i>Máquinas de vetor suporte.....</i>	69
2.4.6	<i>Validação da exatidão do mapeamento.....</i>	71
2.4.7	<i>Análise de mistura espectral.....</i>	74
2.5	Considerações sobre detecção de mudanças.....	78
2.5.1	<i>Seleção de limiares.....</i>	85
2.5.2	<i>Análise Visual.....</i>	86
2.5.3	<i>Detecção de mudanças significativas.....</i>	87
2.5.4	<i>Detecção de mudanças com dados SAR.....</i>	94
2.5.5	<i>Considerações sobre multisensor e multiescala.....</i>	98

2.6	Ambientes eólicos: campo de dunas.....	100
2.7	Energia eólica no Ceará.....	106
2.8	Unidades Geoambientais.....	107
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	111
3.1	Métodos aplicados aos sensores óticos.....	114
3.1.1	<i>Correção Geométrica.....</i>	114
3.1.2	<i>Correção Radiométrica.....</i>	115
3.1.3	<i>Correção de Gap Fill na Imagem Landsat-7 SLC-OFF.....</i>	116
3.1.4	<i>Mascara de Nuvens.....</i>	118
3.1.5	<i>Fatores adicionais.....</i>	119
3.1.6	<i>Trabalho de campo.....</i>	120
3.1.7	<i>Classificação supervisionada.....</i>	121
3.1.8	<i>Avaliação de acurácia.....</i>	125
3.2	Métodos aplicados ao sensor de radar.....	127
3.2.1	<i>Detecção de mudanças com o método Incoerente com ALOS Palsar.....</i>	127
3.2.2	<i>Composição multitemporal em RGB.....</i>	128
3.2.3	<i>Log Ratio ou índice de probabilidade.....</i>	129
3.2.4	<i>Segmentação.....</i>	131
3.2.5	<i>Detecção de mudanças no campo de dunas.....</i>	131
4	RESULTADOS.....	133
4.1	Unidades Geoambientais.....	133
4.1.1	<i>Fluxos de matéria e energia.....</i>	140
4.1.1.1	<i>Fluxo Litorâneo.....</i>	140
4.1.1.2	<i>Fluxo eólico.....</i>	140
4.1.1.3	<i>Fluxo Fluviomarinho.....</i>	141
4.1.1.4	<i>Fluxo Fluvial.....</i>	142
4.1.1.5	<i>Fluxo Subterrâneo.....</i>	142
4.1.1.6	<i>Fluxo Fluviolacustre.....</i>	143
4.1.1.7	<i>Processo Gravitacional.....</i>	143
4.1.2	<i>Unidades Geoambientais.....</i>	144
4.1.2.1	<i>Campo de Dunas Móveis.....</i>	144
4.1.2.2	<i>Campo de Dunas Fixas.....</i>	145

4.1.2.3	<i>Cordões Litorâneos.....</i>	146
4.1.2.4	<i>Faixa de Praia.....</i>	147
4.1.2.5	<i>Brejo e Lagoa Interdunar.....</i>	149
4.1.2.6	<i>Planície de Deflação.....</i>	151
4.1.2.7	<i>Planície Fluvial.....</i>	154
4.1.2.8	<i>Planície Fluviomarinha.....</i>	155
4.1.2.9	<i>Planície Fluviolacustre.....</i>	157
4.1.2.10	<i>Tabuleiro Pré-Litorâneo.....</i>	157
4.1.2.11	<i>Eolianito.....</i>	159
4.1.2.12	<i>Beach Rocks.....</i>	161
4.1.2.13	<i>Falésias.....</i>	161
4.2	Detecção de mudanças.....	164
4.2.1	Aracati.....	164
4.2.1.1	<i>Detecção de mudanças com o método de comparação pós-classificação.....</i>	168
4.2.1.2	<i>Detecção de mudanças pelo método incoerente.....</i>	197
4.2.1.3	<i>Análise de mistura espectral.....</i>	203
4.2.2	Camocim.....	218
4.2.2.1	<i>Detecção de mudanças com o método de comparação pós-classificação.....</i>	222
4.2.2.2	<i>Análise de mistura espectral.....</i>	251
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	262
	REFERÊNCIAS.....	269

1 INTRODUÇÃO

Sobre a superfície da Terra ocorrem diversas transformações no meio físico numa dimensão espacial e temporal variável que podem evidenciar mudanças de origem natural ou intervenção antrópica no decorrer do tempo.

As sociedades, ao longo do tempo, ocupam a superfície terrestre, onde as mudanças de uso e cobertura da terra são dinâmicas, respondendo a diversidade de atividades socioeconômicas de uma população em um determinado tempo, seja no âmbito agrícola, urbano ou costeiro.

As planícies costeiras, que integram a zona costeira, incluem o segmento de terra sobre influência direta do mar (praias), assim como setores que sofrem ação das brisas marítimas, da salinidade e da dinâmica fluvio-marinha que podem ser ampliadas por vários quilômetros em direção ao continente (PEDROSA, 2016).

A planície costeira é um exemplo de geossistema, como menciona Christopherson (2012), já que é um espaço geográfico com características próprias, onde vários elementos tais como faixa praias, terraços marinhos, campo de dunas móveis, dunas fixas e paleodunas, espelhos d'água lacustres e planícies fluvio-marinhas com manguezais, eventuais pontas rochosas e falésias estão integrados em diferentes escalas e níveis de complexidade, interligados e associados a um sistema hierárquico.

As zonas costeiras estão sujeitas a mudanças extensas devido a conversões e/ou modificações da cobertura terrestre. Problemas sérios como a fragmentação do habitat, perdas de áreas úmidas, expansão agrícola, urbanização e erosão costeira, são consequências de impactos humanos de forma direta ou indireta no ambiente costeiro. Estas mudanças podem ter implicações substanciais para a conservação da biodiversidade e as mudanças climáticas, assim como efeitos substanciais e a longo prazo sobre a vida humana (JENERETTE; POTERE, 2010; PEÑAS et al., 2011; ALPHAN, 2013).

Considerando-se a planície costeira como um geossistema, todas as mudanças no uso e cobertura sobre a planície e no campo de dunas fazem parte do sistema, mas podem ser identificadas e analisadas em escalas diferentes.

Mais de 50% da população mundial, atualmente mora dentro dos 100 km de costa, incrementando as atividades econômicas humanas, submetendo os sistemas ambientais costeiros a pressões adicionais, além do aumento do nível do

mar associado com o aquecimento global. Dado o ritmo de mudanças em zonas costeiras, particularmente nas regiões tropicais, é importante o desenvolvimento de ferramentas que ajudem a monitorar as mudanças no uso e cobertura da terra, tais como o uso de imagens multiespectrais, cujas metodologias estão em crescimento constante (SZUZTER et al., 2011).

As planícies costeiras do Baixo Jaguaribe no Município de Aracati, no litoral leste e a planície costeira de Camocim no litoral oeste no município do mesmo nome, no Estado do Ceará, não escapam a esta realidade. Cada uma destas áreas possui suas peculiaridades e diferenças, em relação à geomorfologia, fisiografia da linha de costa, uso e ocupação da terra, desenvolvimento de carcinicultura, etc. A partir do ano de 2008, essas faixas litorâneas compartilham uma mudança recente sobre o campo de dunas móveis, que se configuram a partir da construção de parques eólicos para geração de energia elétrica.

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 do 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.

Considerando as características dos processos costeiros no Estado do Ceará, com condições ecodinâmicas fortemente instáveis e em sua alta vulnerabilidade destacadas por Morais et al. (2006), submete-se a discussão que o processo de instalação e operação dos parques eólicos em planícies litorâneas não é tão “limpo” quanto a energia gerada, pois a localização geográfica dos aerogeradores é um fator determinante na estimativa de produção de energia. Lima (2009), Meireles et al. (2013), Santos (2014), Gorayeb e Brannstrom (2016), são alguns autores que trazem considerações que ultrapassam o discurso da energia limpa, destacando os problemas ambientais e sociais, derivados dessa atividade.

Revisando o contexto histórico decorrentes da construção dos parques eólicos nas áreas de estudo localizadas em Aracati e Camocim, encontraram-se algumas particularidades que motivaram a escolha destas áreas como objeto de

estudo. Aqui foram instalados os primeiros parques eólicos de grande porte e importância no estado do Ceará, sobre campos de dunas móveis 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.

O potencial energético eólico do Ceará foi relatado em diversos estudos nos anos 1990, sendo em 1998 a publicação da primeira versão do Atlas Eólico da Região Nordeste e em 2001 do Atlas de Potencial Eólico do Estado do Ceará (GORAYEB E BRANNSTROM, 2019). Com a crise energética do ano 2001, a resolução n. 279, de 27 de julho (BRASIL, 2001) visou a propor e implementar medidas de natureza emergencial incrementaram a oferta de energia elétrica no país. Na intenção de resolver o problema energético de modo ágil, 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).

Nesse contexto em Aracati no ano 2008 e em Camocim no ano 2009 foram instalados os primeiros parques eólicos no Estado do Ceará, sendo aquele instalado em Camocim o maior parque eólico do Brasil e da América Latina, contribuindo a manter o estado do Ceará na primeira posição nacional com a maior capacidade instalada até 2011 e sendo o maior parque eólico do país até 2015, quando Rio Grande do Norte assume a liderança na geração da energia eólica no país (DIARIO DO NORDESTE, 2009; DANTAS, 2015; MENDES, 2016). De acordo com o Boletim Anual de Geração Eólica 2019 (ABEEÓLICA, 2019) o Ceará é o quanto estado do país com maior geração de energia.

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, no caso de Camocim foi a comunidade de pescadores de Xavier que até hoje sofrem de insegurança alimentar por conta dessas ações. Em Aracati foi a comunidade de Cumbe, onde o parque eólico foi construído na área onde os pescadores acessam para o mar para pescar. Em ambos casos houve conflitos entre as comunidades e a eólica pela alteração dos espaços comunitários, as relações afetivas com as dunas, lagoas interdunares e o mar e imposição de um projeto onde a população está envolvida (MENDES, 2016; CHAVES ET AL, 2017).

Meireles et al. (2013) e Meireles (2016) apontam alguns impactos locais sobre os campos de dunas onde foi instalado o parque eólico na Praia de Xavier (Camocim) que se repetiram no campo de dunas onde foi instalado o parque eólico próximo a comunidade de Cumbe: 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.

Estes impactos sobre o meio físico são relatados em algumas pesquisas, mas não têm sido encontrados até o momento trabalhos que monitorem essas alterações antes e depois da implantação dos parques eólicos, realizando mapeamentos de detecção de mudanças, estabelecendo relações com os efeitos relatados, e verificando se os mesmos estão associados somente ao momento da construção ou se persistem no tempo, gerando problemas ambientais constantes e cumulativos.

Sobre a temática de observação da terra, a definição formal de detecção de mudança requer o uso de dados multitemporais para discriminar áreas de uso e cobertura que modificaram entre as datas. Portanto, a classificação multitemporal pode ser considerada uma tarefa mais geral que inclui o problema de detecção das variações como um caso particular. As técnicas de classificação multitemporal e detecção de mudanças tornaram-se mais úteis nas últimas décadas com o aumento de conjuntos de dados e multifontes disponíveis a partir de plataformas de sensoriamento remoto (LILLESAND et al., 2004; MUÑOZ-MARÍ et al., 2009).

A literatura disponível destaca o interesse pelo desenvolvimento de várias técnicas automáticas para detecção de mudanças utilizando imagens coletadas por sensores orbitais (FERREIRA, 2014). Numerosas metodologias experimentais aplicadas em diversas áreas são objeto de revisão e suas vantagens e desvantagens por Singh (1989), Lu et al. (2003) e Tewkesbury (2015).

Existem numerosos trabalhos que abordam a temática de detecção de mudanças desenvolvidos em diversas partes do mundo e no Brasil, aplicados com diversas técnicas que serão sintetizadas a seguir:

- Análise multitemporal com fusão de imagens e diferentes sensores: Palubinskas et al. (2011), Voisin et al. (2014) Furtado et al. (2015), Thakkar et al. (2016).
- Aplicação de análise de componentes principais, transformação *Tasseled Cap* (TC): Wang e Xu (2010), Kassawmar et al. (2011), Alphan (2013), Madugundu et al. (2014), Thakkar et al. (2016), Rahman e Mesev (2019).
- Comparação pós classificação: Wang e Xu (2010), Pliveira e Galvncio (2011), Szuster et al. (2011), Alphan (2013), Madugundu et al. (2014), Moreira et al. (2016).
- Índices e imagem diferença: Wang e Xu (2010), Alphan (2013), Nobrega (2016).
- Classificação supervisionada com o método máquinas de vetor suporte (SVM): Palubinskas et al. (2011), Wang et al. (2013), Ferreira (2014), Moreira et al. (2014), Angelo e Ferreira (2015), Furtado et al. (2015), Schultz et al. (2016).
- Detecção de mudanças utilizando a análise de mistura espectral (AME): Shimabukuro et al. (1998), Collado et al. (2002), Silva (2008), Zhuo et al. (2018)
- Detecção de mudanças com imagens de radar SAR: Waske e Braun (2009), Al-Sharif et al. (2013), Brown e Hochschild (2017).
- Mudanças em campos de dunas: Brown e Arbogast (1999), Collado et al. (2002), Fadhil (2013), Araújo (2015), Pedrosa (2016).

Os trabalhos mencionados mostram os procedimentos de detecção de mudanças para uso e cobertura natural mais comuns: imagem diferença, análise de componentes principais, transformação *Tasseled Cap* e a comparação pós classificação são os métodos mais utilizados, o que coincide com o mencionado por Lu et al. (2003), Lillesand et al. (2004) e Tewkesbury (2015). Comparar duas ou mais imagens classificadas separadamente de datas diferentes é considerado um dos métodos mais apropriados e comumente utilizados para detecção de mudanças (JENSEN, 2005).

Alguns trabalhos têm sido realizados no intuito de analisar as mudanças no uso e cobertura da terra a partir do produto da classificação, dando um

significado estatístico, que permita conhecer as mudanças em termos de quantidade e magnitude entre categorias durante um período de tempo, utilizando a tabulação cruzada e geração da matriz de transições significativas para determinar em quais classes as mudanças foram significativas, como foi o caso de Pontius et al. (2004), Gomez e Bosque (2007), Santana e Salas (2007), Aldwaik e Pontius (2012), Pontius e Santacruz (2014), Silva e Rubio (2014), Clemente (2015), Farfan et al. (2016), Moreno (2017).

Este estudo pretende mostrar a dinâmica no uso e cobertura em um período de 33 anos e analisar a influência das mudanças em duas áreas da planície costeira cearense, onde não têm sido encontrados trabalhos que sistematizem em uma série temporal dados de uso e cobertura como pretende este trabalho. Este período foi considerado suficiente para mostrar a evolução e impacto das mudanças em uso e cobertura da terra.

Imagens de satélite de sensores ativos e passivos, assim como aplicar processamentos com algoritmos físicos - matemáticos, foram aplicados para obter imagens-resultado relacionadas com as variáveis de estudo nas planícies costeiras do Baixo Jaguaribe e Camocim, que possuem diferenças por conta da localização e dinâmica própria do litoral oeste e leste respectivamente, do Estado do Ceará.

Com este trabalho espera-se contribuir com a aplicação de metodologias para o processamento digital de imagens de satélite, no estudo e interpretação de planícies costeiras e campos de dunas, estabelecendo as diferenças entre os métodos utilizados, se as mudanças observadas respondem à pergunta de pesquisa, e se existe ou não relação entre as mudanças detectadas e a implantação dos parques eólicos.

Neste trabalho foram constatados e quantificados os processos de mudanças em uma série temporal que até o momento não tem sido apresentada em outros trabalhos, assim como a comparação entre os métodos de detecção de mudanças, sobre os elementos da planície costeira que passaram por transformações nestes últimos trinta e três anos, nas localidades de estudo.

Foi aplicada uma metodologia eficiente no monitoramento ambiental em diferentes escalas e a longo prazo, que pode ser utilizada na tomada de decisão no planejamento territorial e redução de impactos nos empreendimentos futuros de parques eólicos, sendo um instrumento prático a considerar na avaliação de estudos de impacto ambiental, gerenciamento local, viabilizando a elaboração de

zoneamentos para a implantação mais apropriada, em termos ambientais e sociais, de parques eólicos.

Neste sentido, considerando as condições naturais existentes na planície costeira do Estado do Ceará, os impactos ambientais e sociais relatados nas áreas onde foram instalados parques eólicos, surge o seguinte problema de pesquisa:

A presença de geradores de energia eólica incide nas mudanças de uso e cobertura posteriores nos campos de dunas e planície costeira?

1.1 Hipóteses

- A instalação dos parques eólicos tem influência nas mudanças do uso e cobertura nas planícies costeiras e áreas de dunas, alterando negativamente as dinâmicas de fluxo costeiro.
- Os geradores de energia eólica produziram uma mudança significativa ao meio físico no momento da implantação civil das torres e da infraestrutura e continuaram ocorrendo alterações ambientais negativas em decorrência da fixação e existência do empreendimento.

1.2 Objetivo Geral

Analisar as mudanças no uso e cobertura da terra nas planícies costeiras da região do baixo Jaguaribe e Camocim no Estado do Ceará entre os anos 1985 e 2018, utilizando técnicas de detecção de mudanças multitemporais em imagens de sensores ativos e passivos e a relação das mudanças produzidas com a instalação de parques eólicos em áreas de dunas.

1.2.1 Objetivos específicos

- Identificar os tipos de mudanças no uso e cobertura da terra nas planícies costeiras do baixo Jaguaribe e de Camocim entre os anos 1985 e 2018.
- Aplicar técnicas de detecção de mudanças utilizando sensores ativos e passivos considerando sua capacidade de identificar e quantificar áreas específicas

de mudanças ou tendências.

- Elaborar uma série multitemporal utilizando imagens da série Landsat na determinação de uso e cobertura que mostre a evolução do uso e cobertura da terra.
- Verificar a existência de relação entre as mudanças no uso e cobertura da terra e a implantação de parques eólicos em áreas de dunas.

1.3 Descrição das áreas de estudo

Para esta pesquisa estão sendo consideradas duas áreas de estudo no Estado do Ceará, devido ao fato que cada planície costeira e seus campos de dunas têm suas características particulares e são áreas de implementação de parques eólicos.

A primeira área, localizada no Município de Aracati, acerca de 150 km da cidade de Fortaleza, corresponde a porção da planície costeira do Baixo Jaguaribe, entre o rio Jaguaribe e o litoral que inclui as praias de Cumbe, Canoa Quebrada e Lagoa do Mato e ao sul pelo tabuleiro (cota 40 m), situado no Litoral Leste, na chamada Costa do Sol Nascente, entre as coordenadas: 4°25'36" S; 37°49'49" W. e 4°42'10" S; - 37°33'36" W. Esta área de estudo estende-se por 41.963,7 ha (Mapa 1).

A segunda área, localizada no Município de Camocim, corresponde a uma porção da planície costeira entre os rios Coreaú e rio Tapuio, e ao sul pelo tabuleiro (cota 40 m), situado no Litoral Oeste na chamada Costa do Sol Poente, entre as coordenadas: 2°53'25" S.; 41°06'56" W e 3°17'53" S; 40°06'56" W. Esta área de estudo estende-se por 69.159,51 ha (Mapa 2).

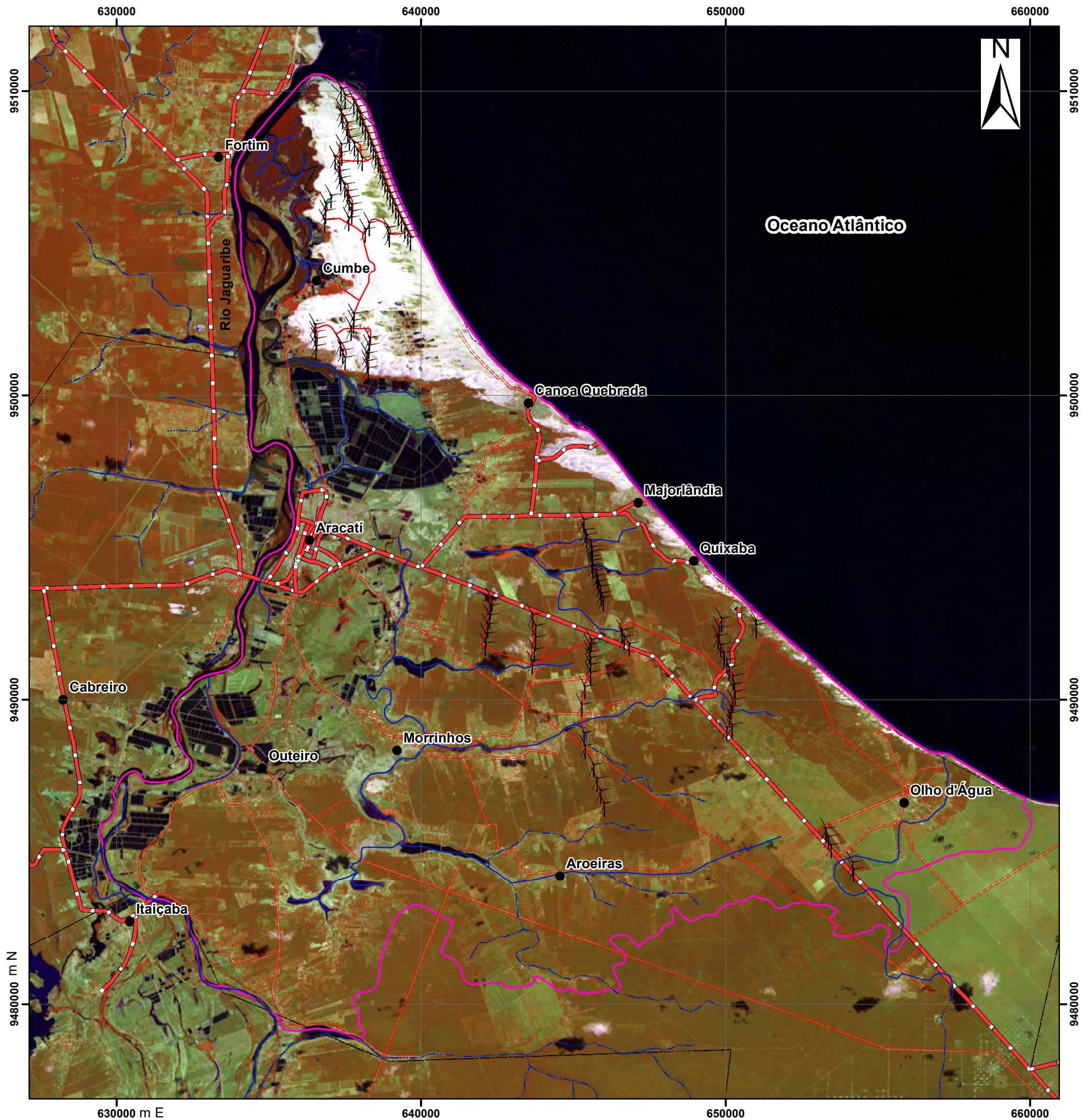
Como limite sul das áreas de estudo, foi considerado o limite médio do tabuleiro pré-litorâneo, associado à cota de 40 m, baseado nos trabalhos de Bezerra et al. (2010) e Sousa (1988), onde são definidos como a faixa de transição entre o domínio das terras altas e da planície costeira, intercorrendo cerca de 40 km no interior do continente, com altitude média de 30 a 50 metros.

Segundo a classificação climática de Köppen, as áreas de estudo em Aracati e Camocim, fazem parte do litoral cearense, razão pela qual se enquadram na região climática Aw, do tipo Tropical com Inverno Seco. Clima úmido tropical, sem estação fria, com temperatura média do mês mais frio acima de 18°C e precipitação do mês mais seco menor que 30 mm. Existe uma estação seca bem acentuada, coincidindo com o inverno e as maiores precipitações são no outono, tendo forte

irregularidade pluviométrica no decorrer do ano (DNIT, 2006; SEMACE, 2016; MUNIZ et al. 2017).

O clima regional da zona litorânea faz parte do domínio do clima semiárido predominante no Nordeste brasileiro. De acordo com Zanella (2014), na região destacam-se a atuação do Anticiclone Semifixo do Atlântico Sul, associado a Massa Tropical Atlântica e a Massa Equatorial Atlântica, que são diferentes massas de ar que controlam a dinâmica atmosférica da região. Tais massas de ar, em função de sua vortacidade anticiclônica e subsidência superior trazem estabilidade para o tempo, estabelecendo dois períodos definidos – um seco, longo e outro úmido, curto e irregular.

A zona costeira do Ceará faz parte da porção Setentrional do Nordeste brasileiro e recebe influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), formada pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul. As chuvas da região norte do Nordeste brasileiro, recebem forte influência da ZCIT e são também influenciadas pelas frentes frias, entre os meses de novembro e janeiro. Os ventos na região nordeste do Brasil são controlados pela ZCIT sendo a direção predominante leste-sudeste tratando-se dos alísios do Hemisfério Sul (OLIVEIRA, 2009).



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



Mapa 1 Mapa Imagem da área de estudo Aracati

Convenções

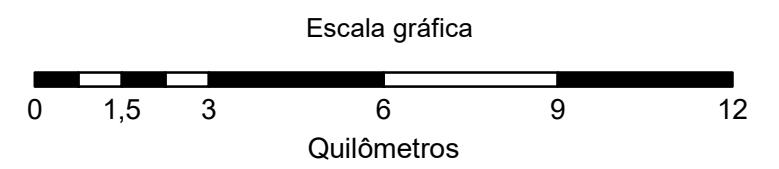
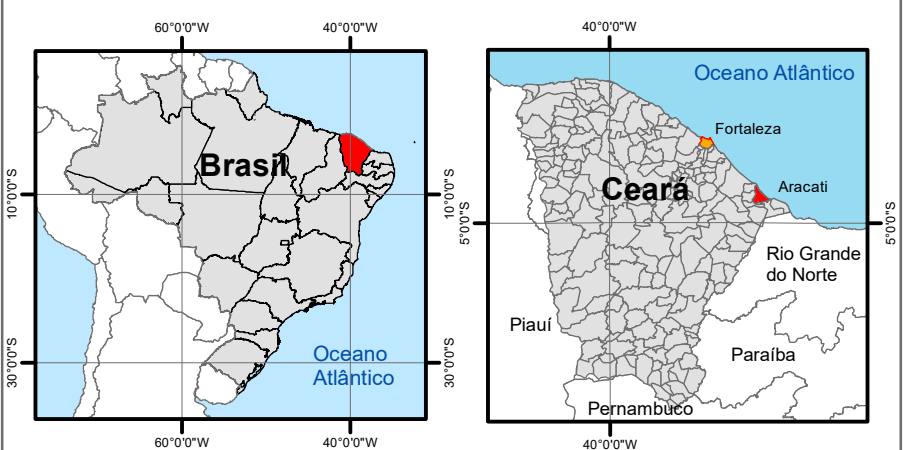
- Limite da área de estudo
- Limite municipal
- Aerogeradores
- Povoados

Sistema Hídrico

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

Sistema Viário

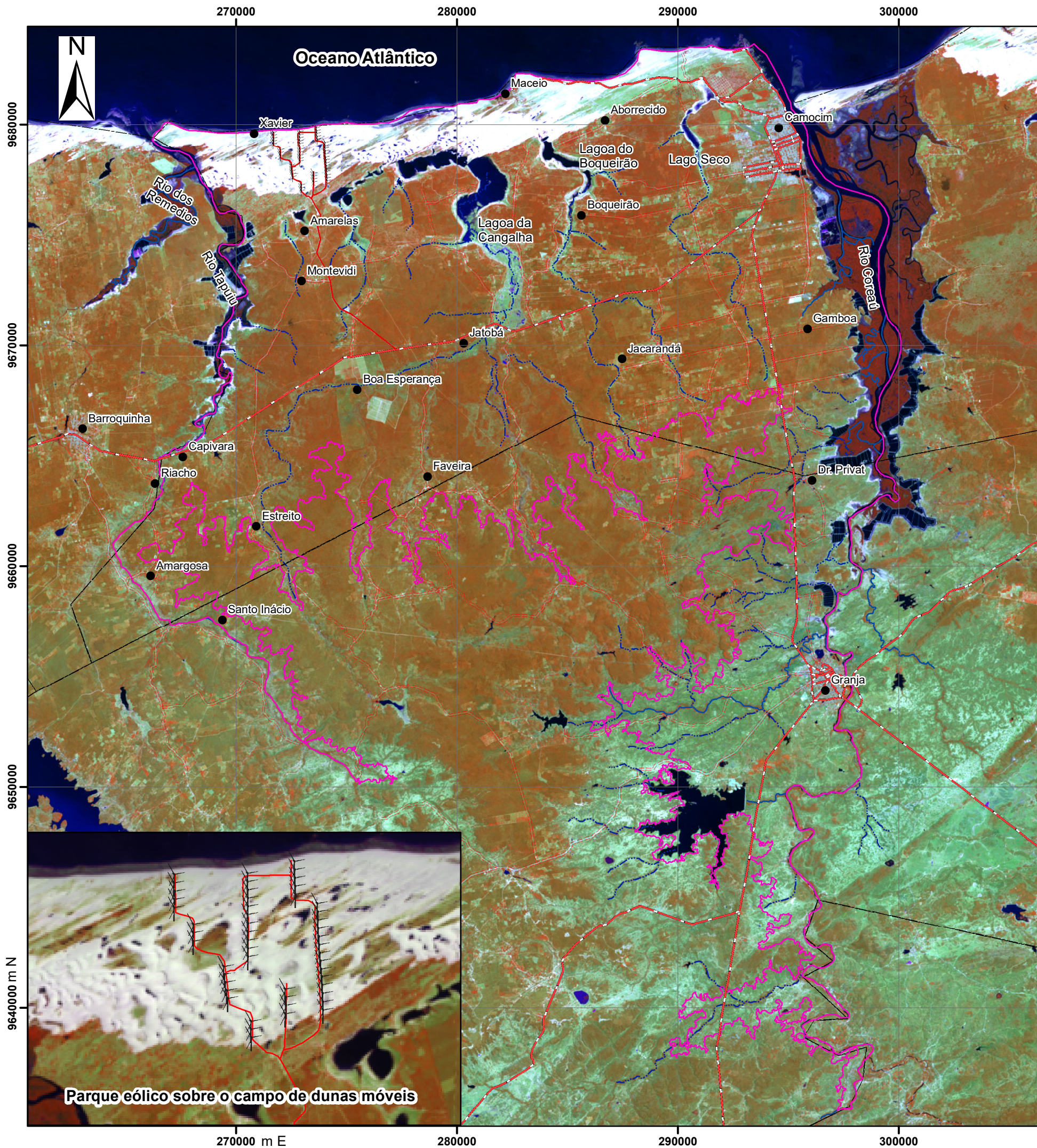
- Estrada pavimentada
- Estrada sem pavimentação
- Acesso aos aerogeradores



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: Glória Durán
Orientadora: Profa Dra. Adryane Gorayeb



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



Mapa 2 Mapa Imagem da área de estudo em Camocim

Convenções

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

Sistema Hídrico

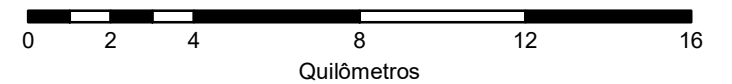
- Cursos d'água perenes
- Cursos d'água intermitentes

Sistema Viário

- Estrada pavimentada
- Estrada sem pavimentação
- Acesso aos aerogeradores



Escala gráfica



Projeção UTM, Datum SIRGAS 2000, Fuso 24 S

Fonte: Malha municipal digital IBGE, 2015. Imagem Landsat 8 OLI. Path/Row: 218/062. RGB: 4-5-3. Data 04-08-2017. USGS 2017. Folha: S03 W041, S03 W042, S04 W041, S04 W042, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) - USGS, Ano 2000. 1 arc segundo. Base Cartográfica de infraestrutura hídrica do Ceará - COGERH, 2015. Ortofotos a escala 1:2.000 SEMACE, 2016.

Elaboração: Glória Durán
Orientadora: Profa Dra. Adryane Gorayeb

Segundo Morais (2000) e o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (CAMARGO SCHUBERT, 2019), a ocorrência dos ventos são controladas principalmente pelos alísios de NE e SE. Os alísios de SE dominam durante os períodos de inverno e primavera, no segundo semestre do ano durante a estiagem, enquanto que nos meses de verão e outono, o predomínio é de ventos de E, com ocorrências de SE, NE, no primeiro semestre do ano correspondente a estação chuvosa.

Os ventos cumprem um papel fundamental no litoral do Nordeste haja vista a acumulação de material sedimentário em forma de dunas e praias arenosas ao longo da costa do Ceará. Os alísios de SE são mais intensos que os de NE nos meses de estiagem, e al possuir menos umidade, são importantes na geomorfologia costeira já que mobilizam a maior quantidade de sedimentos neste período, contribuindo na edificação de dunas, utilizando estoques sedimentares das zonas de estirâncio, de berma e das praias (PINHEIRO E SALES, 2007).

Vale destacar que as condições meteorológicas características da ZCIT sofrem influências durante os anos de atuação do El Niño. O fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) segundo Fernandez & Muehe (2006), refere-se ao aumento anômalo da temperatura das águas superficiais do setor 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. Dependendo da intensidade e período de sua ocorrência pode inibir a formação de nuvens e interferir na descida ao Sul da ZCIT, ao passo que no Nordeste, particularmente no semiárido brasileiro, ocorre a redução das chuvas e prolongamento da estiagem no norte do nordeste brasileiro (principalmente na sub-região que compreende parte dos Estados do Piauí e Ceará) (ALVES & RAPELLI, 1992; FERREIRA & MELLO, 2005).

Também, o fenômeno de La Niña, que ocorre quando há o decréscimo da temperatura superficial das águas do Pacífico, acontece o inverso, ou seja, se intensifica a circulação dos ventos alísios e os índices de precipitação são registrados com significativo aumento na região Nordeste, tendo chuvas dentro da média ou acima da média, ao passo em que é evidenciada a sua diminuição no Centro-Sul do país (NIMER, 1989; FONZAR, 1994, HIERA ET AL, 2019).

De acordo com 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, apresentou-se alternância entre períodos úmidos e secos e anos El Niño, onde foi possível verificar que, de modo geral, ocorrem anos de secas após anos de ocorrência do El Niño, isto aconteceu nos anos 1951, 1953, 1957, 1965, 1969, 1971, 1982 e 1986. Não entanto, nem sempre o ano seguinte a um ano El Niño é um ano seco, como pode-se ver em 1977 e há anos secos que não seguiram anos de El Niño, como ocorreu em 1979.

Na Tabela 1, são apresentados os anos de ocorrência de El Niño e La Niña segundo Null (2020) e são ressaltados os anos secos anuais ou plurianuais, segundo Carvalho (2012) e Banco Mundial (2015). Esta tabela permite observar que as afirmações de Freitas (1997) não ponderam a intensidade dos fenômenos El Niño e La Niña, já que o autor aborda só um destes fenômenos, e a relação entre El Niño e os períodos de déficit pluviométrico parece ser mais notória nos anos de 1983, 1993 e 1998, anos nos quais ocorreram intensos episódios do fenômeno ENOS no Pacífico Equatorial, como afirma Nobre (2012).

Tabela 1.1 - 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		
2018-19				2017-18		
2019-20						

*anos marcados em azul correspondem a os anos de seca no Ceará.

Fonte: Null (2020), Cortez et al (2017), Banco Mundial (2015).

O aporte de água nas lagoas interdunares em Aracati e Camocim vem da chuva, sendo que a superfície e nível de água destas lagoas varia de acordo com a quantidade de precipitação associada ao período chuvoso, já que é o fator determinante que proporciona uma recarga importante ou insuficiente do aquífero

localizado abaixo do campo de dunas móveis, além de se houve alguma alteração nos fluxos subterrâneos antes ou depois do período de chuva.

O Estado do Ceará, entre 2010 e 2016, sofreu uma seca plurianual, que já foi considerado o período mais severo de seca dos últimos 100 anos pelo Banco Mundial (2015), Magalhães (2016), Funceme (2016), Cortez et al. (2017), Gondim et al. (2017), sendo um fenômeno que permaneceu em 2017.

As chuvas no Ceará apresentam alta variabilidade espacial e temporal ao longo do ano. Em termos anuais, é altamente sazonal, com um período úmido de janeiro a julho. Durante o período seco, de agosto a dezembro, quase não há precipitação e a velocidade do vento é muito maior do que na estação úmida (JIMENEZ et al., 1999).

Em termos de quantidade e distribuição da precipitação Aracati e Camocim apresentam diferenças. A precipitação média anual em cada município, de acordo as tabelas 2 e 3, mostra as variações interanuais, destacando que de acordo a FUNCEME (2020) a normal de Aracati é de 885,3 mm, enquanto a normal de Camocim é de 1122,4 mm, aspecto que indica uma maior quantidade de precipitação média na área de Camocim comparado com a área de Aracati.

Considerando os dados de temperatura média mensal, obtido a partir do software denominado CELINA v.1.0¹, observa-se que o regime térmico da região é caracterizado por temperaturas pouco amenas, tendo seus valores máximos de 28,1°C em Aracati (em janeiro) a 25,7°C em Camocim (novembro e dezembro) coincidindo com os meses de verão. Os valores mínimos ocorrem no inverno em Aracati com 26°C (em julho) e no outono em Camocim com 26,7°C (em abril). Considerando as áreas de estudo individualmente, observa-se temperaturas relativamente estáveis e de reduzidas amplitudes.

¹ Software que através da utilização de equações de regressão linear (produzidas por outros pesquisadores) gera as temperaturas medias mensais para qualquer município do Estado do Ceará, utilizando as coordenadas geográficas do local (estação/posto pluviométrico) e a altitude, desenvolvido por Costa (2007).

Tabela 2 - Precipitação média anual no município de Aracati entre 1984 – 2019.

Ano	pp (mm)	Ano	pp (mm)	Ano	pp (mm)
1984	1400,9	1996	897,1	2008	1095,3
1985	2525,3	1997	440,4	2009	1580,9
1986	1479,1	1998	392,7	2010	419,6
1987	662,1	1999	622,8	2011	1092,6
1988	1353,3	2000	873,5	2012	376,7
1989	1258,4	2001	606,2	2013	656,5
1990	423	2002	1010,6	2014	564,9
1991	612,3	2003	883,6	2015	542,4
1992	663,4	2004	830	2016	311,3
1993	226,6	2005	885,3	2017	744,4
1994	1208,1	2006	856,5	2018	929
1995	1116,7	2007	832,6	2019	1006,8

Fonte: Funceme, 2020.

Tabela 3 - Precipitação média anual no município de Camocim entre 1984 – 2019.

Ano	pp (mm)	Ano	pp (mm)	Ano	pp (mm)
1984	1757,8	1996	1339	2008	1377,9
1985	2802,6	1997	800,9	2009	1972,6
1986	1692,8	1998	706,1	2010	552,1
1987	743,7	1999	1400,7	2011	1409,7
1988	1249,2	2000	1187,6	2012	450,8
1989	1416,8	2001	791,8	2013	885,3
1990	741,1	2002	983,6	2014	850,1
1991	1153,6	2003	1261,1	2015	753,4
1992	847,4	2004	1109,9	2016	812,4
1993	485,5	2005	835,5	2017	984,8
1994	1362,8	2006	1012,4	2018	1301,1
1995	1437,9	2007	922,6	2019	1529,4

Fonte: Funceme, 2020.

Com os dados prévios é possível estabelecer relações entre as variáveis precipitação, temperatura e vento: durante a estação das chuvas, aumentam as temperaturas, a alta precipitação aumenta a umidade da areia reduzindo o transporte eólico e, conseqüentemente, à mobilidade das dunas. A formação das lagoas interdunares promove o crescimento da vegetação na base da duna devido

ao aumento da umidade da areia e também à queda da intensidade do vento na base das dunas. Este aumento na estabilidade da areia resulta em uma fixação temporária. Durante a estação seca, a intensidade do vento aumenta, diminui a temperatura, a umidade da areia diminui e, conseqüentemente, o vento torna-se mais eficiente no transporte de sedimentos, resultando na migração das dunas (LEVIN et al., 2009).

Com relação à geologia, as áreas de estudo estão inseridas em regiões de sedimentos, que de acordo com Pedrosa (2016), está constituída predominantemente pelos sedimentos do Cenozoico da Formação Barreiras, que parcialmente trabalhados no Pleistoceno e no Holoceno originaram os Tabuleiros Costeiros e os campos de dunas.

A geologia das falésias em Aracati é variada, pois na extremidade oeste da área, isto é, em Fortim, elas aparecem como parte integrante da Formação Tibau. Em Canoa Quebrada as falésias são testemunhos de Formação Barreiras (MORAIS et al., 2002). No litoral oeste, em Camocim, afloram os depósitos da Formação Camocim. Nas falésias que se estendem próxima à foz do rio Coreaú, ressaltam os conglomerados que compõem essa formação, passando a um pacote superior, composto de areias finas com material argiloso inconsolidado não estratificado (CAMELO, 2013).

O Município de Camocim possui a maior extensão de linha de costa do Estado do Ceará, está inserido na bacia hidrográfica do rio Coreaú e são encontrados diversos tipos de sistemas ambientais tipicamente costeiros: planície litorânea; campo de dunas móveis, tabuleiros pré-litorâneos, lagoas costeiras e planícies fluviais. A construção do parque eólico, com 50 aerogeradores, próximos às localidades de Amarelas e Xavier, de acordo a Meireles et al. (2013) e Meireles (2016) produziu mudanças visíveis no campo de dunas móveis, como soterramento de lagoas interdunares e fixação de dunas.

O Município de Aracati está inserido na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. Destaca-se a atividade turística da praia de Canoa Quebrada, o desenvolvimento da carcinicultura na planície fluviomarina do rio Jaguaribe e o parque eólico com 67 aerogeradores, construído no campo de dunas móveis na Área de Proteção Ambiental (APA) de Canoa Quebrada, criada pela Lei nº 40/98 de 20 de março de 1998, onde se evidenciam mudanças, tais como, soterramento de lagoas interdunares e fixação de dunas como consequência da construção do parque eólico

(MEIRELES et al., 2013; MEIRELES, 2016).

Outros impactos ambientais são causados no campo de dunas em Canoa Quebrada pelos turistas em passeio de bugues e com cavalos, que resultam na degeneração das espécies vegetais fixadoras das dunas, causando aumento do transporte eólico e contribuindo no deslocamento das dunas móveis, bem como no surgimento de ravinas e voçorocas. Sobre o tabuleiro litorâneo, entre as localidades de Olho d'água, Córrego do Retiro, Majorlândia e Lagoa tanque Salgado, em áreas de plantio de caju, entre 2016 e 2017 foram instalados outros 65 aerogeradores, que ocupam uma área aproximada de 1.593 ha.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos básicos em Sensoriamento Remoto

O termo Sensoriamento Remoto foi desenvolvido para designar uma nova tecnologia de mecanismos capazes de coletarem imagens da superfície terrestre sem que houvesse um contato físico com a mesma.

Conforme Chuvieco (2010), sensoriamento remoto é uma técnica que permite a obtenção de imagens da superfície terrestre desde sensores aéreos ou espaciais que detectam as respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres.

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 energia eletromagnética, nas palavras de Di Maia et al. (2008), é emitida por qualquer corpo que possua temperatura acima de zero absoluto (0 Kelvin). Desta maneira, todo corpo com uma temperatura absoluta acima de zero absoluto pode ser considerado como uma fonte de energia eletromagnética. O Sol e a Terra são as duas principais fontes naturais de energia eletromagnética utilizadas no sensoriamento remoto da superfície terrestre.

A fonte de Radiação Eletromagnética (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 diferenças na calibração dos sensores (MATHER, 2004; SCHOWENGERDT, 2007).

Conforme Meneses e Almeida (2012) o sensoriamento remoto orbital é assistido por uma razoável constelação de satélites que oferecem imagens para atender as necessidades de uma vasta gama de usuários.

Através da exposição das informações sobre os diferentes sistemas de coleta de dados de sensoriamento remoto, é necessário se conhecer que resolução de um produto de sensoriamento remoto pode ser dividida em: resolução espacial; resolução espectral; resolução temporal; e resolução radiométrica.

Os sensores utilizados na coleta de informações através do sensoriamento remoto podem ser classificados em dois tipos, podendo ser classificados como sensores passivos ou então sensores ativos.

2.2 Sensores óticos de média e alta resolução espacial

2.2.1 Sensores passivos

Nos sensores passivos, Jensen (2009) descreve que esses equipamentos de sensoriamento remoto, 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.

Uma das maneiras mais pretéritas de se obter informações da superfície terrestre através de sensores remotos passivos, é a partir de fotografias aéreas, conforme Anderson (1982), uma definição simplista para essa técnica de sensoriamento remoto está baseada na coleta de imagens e na interpretação a fim de identificar objetos e determinar seus significados.

Jensen (2009), explica que as fotografias aéreas já existem a mais de

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).

um século e que apesar de parecer uma tarefa simples e rotineira, a técnica é complexa e segue princípios físicos. Muitas decisões têm por base princípios físicos da óptica e da interação entre a energia eletromagnética e as matérias sensíveis a ela.

A utilização de satélites artificiais transportando sensores passivos é uma das técnicas de sensoriamento remoto 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 (NASA).

O LANDSAT-1 foi o primeiro satélite de sensoriamento remoto no mundo e também o primeiro desenvolvido para atuar diretamente em pesquisas de recursos naturais, foi lançado em 1972 e denominado ERTS-1 ou LANDSAT-1. Levou dois instrumentos a bordo, as câmeras RBV e MSS. Operou por um período de cinco anos adquirindo mais de 300.000 imagens, com repetidas coberturas da superfície da Terra. De lá até hoje foram lançados 8 satélites da série, todos com imagens multiespectrais. As imagens do LANDSAT-8 são ortorretificadas e todos os produtos do catálogo estão em formato GeoTIFF (INPE). As características do grupo de satélites estão na Tabela 4.

Em 1994 o governo americano deu permissão às companhias civis para comercializar e disponibilizar imagens de alta resolução espacial. As companhias comerciais começaram a ter impacto no mercado de Sistemas de Informação Geográfica e mapeamento cartográfico, que era associado com a indústria de aerofotogrametria. Desde então, elas têm sido aplicadas com maior intensidade em mapeamentos e em estudos da dinâmica de uso da terra, que exigem escalas grandes (JENSEN, 2009).

Tabela 4 - Características da série de satélites Landsat

DESCRIÇÃO	LANDSAT 1 e 2	LANDSAT 3	LANDSAT 4	LANDSAT 5	LANDSAT 6	LANDSAT 7	LANDSAT 8
Instrumento/Sensor	RBV e MSS	RBV e MSS	MSS e TM	MSS (até Ago/1995) e TM	ETM	ETM +	OLI e TIRS
Operadora/Instituição Responsável	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA
País	Estados Unidos	Estados Unidos	Estados Unidos	Estados Unidos	Estados Unidos	Estados Unidos	Estados Unidos
Situação Atual	Inativos	Inativo	Inativo	Inativo	Falhou em atingir a órbita	Ativo com Restrição	Ativo
Lançamento	23/07/1972	05/03/1978	16/07/1982	01/03/1984	05/08/1993	15/04/1999	02/11/2013
Altitude	917 Km	917 Km	705 km	705 km	705 km	705 km	705 Km
Inclinação	99,2°	99,2°	98,20°	98,20°	98,20°	98,2°	98,2°
Órbita	Quase-Polar, Heliossíncrona	Quase-Polar, Heliossíncrona	Quase-Polar, Heliossíncrona	Quase-Polar, Heliossíncrona	Quase-Polar, Heliossíncrona	Quase-Polar, Heliossíncrona	Circular, Polar, Heliossíncrona
Faixa Imageada	185 Km	185 Km	185 Km	185 Km	185 Km	185 Km	185 Km
Duração da órbita	103,27 min	103,27 min	98,20 min	98,20 min	98,20 min	98,9 min	99 min.
Horário da Passagem	09h:15 min	09h:15min	09h:45min	09h / 11h	09h / 11h	10h / 12h	10h / 12h
Período de Revisita	18 dias	18 dias	16 dias	16 dias	16 dias	16 dias	16 dias
Resolução Espacial	80 m	RBV: 30m MSS: 57 x 79m	MSS : 80 m TM: multiespectral: 30m Termal 120 m	MSS: 80 m TM: 30 m Banda Termal: 120 m	Pancromático: 15 m Multiespectral: 30 m Banda Termal: 120 m	Pancromático: 15 m Multiespectral: 30 m Banda Termal: 60 m	Pancromático: 15 m Multiespectral: 30 m Termal: 100 m reamostrada para 30 m

Fonte: USGS, 2018

Outro satélite é o RapidEye, segundo Planet (2016 e 2018), esse é um sistema composto por cinco satélites com sensores idênticos e localizados na mesma órbita heliossíncrona. A faixa da abrangência de coleta de imagens é de 77 km de largura e 1500 km de extensão. Algumas outras características encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Características do sistema RapidEye

CARACTERÍSTICA	INFORMAÇÃO
Número de satélites	5
Órbita	Heliossíncrona com 630 km de altitude
Passagem pelo Equador	+/- 11:00 em hora local
Tipo de sensor	Imageador multiespectral pushbroom
Bandas Espectrais	Azul (440–510nm), Verde (520-590nm), Vermelho (630-685nm), Red-Edge (690-730nm), Infravermelho Próximo (760-850nm)
Espaçamento do Pixel	6,5 m no nadir
Tamanho do Pixel (ortorretificado)	5,0m
Tamanho da Imagem	Aproximadamente 77 km de largura com comprimento entre 50 e 300 km, 462 mb. 25 km ao longo da órbita para 5 bandas
Expectativa de tempo de vida do satélite	7 anos
Tempo de revisita	Diariamente fora do nadir/ 5 dias no nadir
<i>Datum</i> horizontal	WGS 84
Bits de quantização	12 bits

Fonte: Planet, 2016 e 2018.

O satélite QuickBird foi construído para obter imagens com resolução 2,44 m em modo multiespectral e 0,61 m em modo pancromático, com vantagens como alta qualidade da imagem e alta precisão geométrica. Projetado e construído pela empresa 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). Na Tabela 6 podem ser observadas algumas das características deste sistema satélite e sensor.

Tabela 6 - 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, 2013 e 2016

2.2.2 Sensores ativos: radar de abertura sintética

O sistema de sensores remoto ativos, geram sua própria energia eletromagnética, que é emitida em direção ao alvo (pouco afetada pela atmosfera), interagindo com o terreno. Essa energia produz um retroespalhamento que é registrado pelo receptor do sensor. Um dos sistemas de sensoriamento remoto ativo mais utilizados é o *Radio Detecting And Ranging* (RADAR), as transmissões são baseadas em micro-ondas (ondas de comprimento mais longo) entorno de 0,75 a 100,00 cm (JENSEN, 2009). Algumas considerações sobre as bandas mais utilizadas no radar estão na Tabela 7.

Tabela 7 - Comprimentos de onda e frequência de RADAR usados em investigações de sensoriamento remoto por micro-ondas ativas.

RADAR designação das bandas (comprimentos de onda mais comuns)	Comprimento de (λ) em cm	Frequência em (ν) GHz
Ka	0,75 – 1,18	40,0 – 26,5
K	1,19 – 1,67	26,5 – 18
Ku	1,67 – 2,4	18,0 – 12,5
X	2,4 – 3,8	12,5 – 8
C	3,9 – 7,5	8 – 4
S	7,5 – 15	4,0 – 2
L (15; 30 cm)	15 – 30	2 – 1
P	30 – 100	1,0 – 0,3

Fonte: Jensen (2009)

A nomenclatura associada com os comprimentos de onda do RADAR, é consequência do trabalho secreto durante a II Guerra Mundial, quando o normal era utilizar um descrito alfabético ao invés do real comprimento de onda ou frequência. Os comprimentos de onda onde atua o radar, por estar fora das regiões do espectro eletromagnético óptico e infravermelho, permitem adquirir dados independentemente da iluminação solar e de serem pouco influenciados pelas condições atmosféricas, uma vez que a transmitância atmosférica é praticamente inalterada para a faixa de micro-ondas. Desta forma, os sensores de radar fornecem informações sobre

conteúdo de umidade, rugosidade superficial e propriedades dielétricas; sendo estes dois últimos fatores junto com a geometria, parâmetros do alvo que influenciam o retroespalhamento³. Quanto maior o comprimento de onda, maior será a interação com o material (alvo) (DUTRA et al., 2003; SANT'ANNA, 2009).

Jensen (2009) comenta que os menores comprimentos de onda de RADAR são denominados de banda K, teoricamente esses comprimentos deveriam oferecer a melhor resolução, mas a energia emitida e parcialmente absorvida pelo vapor de água, com isso ocorrem limitações ao transpor nuvens. A banda X inclui os menores comprimentos de onda frequentemente utilizados por radares imageadores orbitais. A banda L interage profundamente no dossel da floresta, contribuindo no espalhamento volumétrico (interior do dossel) e no caso do solo exposto, úmido e liso, pode penetrar até 10 cm.

A interpretação dos alvos representados numa imagem de RADAR é diferente de qualquer sensor óptico, já que é necessário compreender a configuração do próprio sensor, a energia emitida e recebida pelo radar e como essa energia interage com a superfície terrestre e é representada como uma imagem. Entre os radares imageadores encontram-se o de abertura real (RAR) e o de abertura sintética (SAR) (SANT'ANNA, 2009; LEE E POTTIER, 2009).

Entre os sistemas SAR, encontra-se o satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), que foi lançado pela Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa (JAXA) em 24 de janeiro de 2006. O satélite ALOS possui três sensores: o radiômetro *panchromatic remote-sensing instrument for stereo mapping* (PRISM), o sensor *multispectral advanced visible and near infrared radiometer type 2* (AVNIR-2) e Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR), um sensor micro-ondas ativo, banda L, cuja frequência permite a obtenção de imagens diurnas e noturnas, sem interferência de nebulosidade.

Na Tabela 8 podem ser vistas algumas das características deste sistema satélite e sensor ativo.

³ O retroespalhamento (*backscattering*), refere-se a energia irradiada pelo alvo que espalha-se em todas as direções, o sinal que é recebido pelo sensor. Os principais parâmetros que condicionam o retroespalhamento do radar estão relacionados ao sistema sensor (comprimento de onda, polarização, ângulo de incidência, azimute de visada e resolução espacial) e aos alvos (rugosidade da superfície, constante dielétrica e orientação dos alvos). Os efeitos do terreno sobre o sinal de radar, que são referidos a área de retroespalhamento efetivo do alvo, é calculado pelo coeficiente de retroespalhamento, seção cruzada de radar que é refletida pelo alvo e que retorna para a antena por unidade de área; expresso como logaritmo com unidade em dB, decibéis (DUTRA et al., 2003; SANO et al., 2009; JENSEN, 2009).

Tabela 8 - Características do satélite ALOS PALSAR

Instituição Responsável	Japan Aerospace Exploration Agency - JAXA				
País	Japão				
Lançamento	2006				
Órbita	Heliossíncrona				
Altitude	691,95 km				
Inclinação	98,16°				
Tempo de Duração da Órbita	98,7				
Horário da Passagem	10:30 A.M.				
Período de Revisita	46 dias				
Frequência	Banda L (1.27 GHz)				
Modos de aquisição	FBS	FBD	WB1	WB2	PLR
Polarização	HH ou VV	HH+HV ou VV+VH	HH ou VV		HH+HV+ VV+VH
Resolução Espacial	12,5 m	20 m	100 m		30 m
Faixa de imageamento	70 km	70 km	250-350 km		30 km
Ângulo Off-Nadir	34,3°		27,1°		21,5°

Fonte: adaptado do Alaska Satellite Facility (2018) e Rosenqvist et al. (2004).

2.3 Grandezas radiométricas

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

Um conceito que deve ser considerado é a Radiância, como a variável medida diretamente através de instrumentos de sensoriamento remoto. Radiância é a quantidade de luz que o instrumento detecta do objeto a ser observado e caracteriza a emissão ou reflexão total, enquanto radiância espectral caracteriza a luz em um único comprimento de onda ou frequência. A radiação é igual à soma (ou integral) de todas as radiâncias espectrais de uma superfície. A unidade de radiância

SI é Watts por metro quadrado por esterradiano ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$) (BORENGASSER et al., 2008).

A radiância é o primeiro parâmetro que é obtido a partir dos níveis digitais (ND) da imagem, que permite calcular a reflectância. 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). 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 ND, 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).

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 à reflectância da superfície. A imagem de reflectância de superfície representa o que seria obtido por um sensor medindo logo acima da superfície da Terra, sem interferência da atmosfera ou iluminação e geometria de visada (GLCF, 2011).

2.4 Processamento digital de imagens para detecção de mudanças

2.4.1 Correção Geométrica

A correção geométrica de uma imagem pode ser feita por georreferenciamento e ortorretificação, a primeira basicamente envolve a identificação de vários pontos de controle nas imagens e sua correspondência espacial de forma manual (FEDOROV, 2002).

A ortorretificação inclui a georreferenciação e considera dados sobre plataforma do sensor, do ângulo de aquisição, do relevo, da curvatura e rotação da Terra, além de um Modelo Numérico de Elevação do Terreno (MNET), desta forma é uma das mais importantes etapas de pré-processamento para aplicações de mapeamento, identificação de características em áreas urbanas assim como a adição de dados de imagens em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) (AGUILAR; SALDANA; AGUILAR, 2012).

O processo georreferenciamento é feito manualmente. Neste caso o operador escolhe uma feição pontual, identificável, na imagem a corrigir e na imagem referência. O conjunto de pontos 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 (CROSTA, 2002).

De acordo com Crosta (2002) e Chuvieco (2010), os pontos de controle (*Ground Control Point – GCP*) são feições homólogas passíveis de identificação na imagem e no terreno; cujas coordenadas são conhecidas na imagem e no sistema de referência, que pode ser um mapa vetorial, um mapa em papel, pontos de GPS, ou vetor, ou uma outra imagem. A distribuição espacial destes pontos é muito importante e está relacionada com o ajuste da imagem a ser georreferenciada e a imagem referência. Após uma análise dos erros para cada GCP individualmente, aplica-se a transformação na imagem original, produzindo-se então uma nova imagem. Uma vez que se possui vários pontos de controle pode-se verificar quais dos pontos se ajustam melhor à transformação. O erro total cometido na transformação é dado pelo erro quadrático médio EQM ou RMS, determinado pela equação 1:

$$EQM = \sqrt{(x_t - x_m)^2 + (y_t - y_m)^2} \quad (1)$$

onde: x_t , y_t , são as coordenadas transformadas e x_m, y_m são os pontos de controle (GCP), onde : $E_x = x_t - x_m$ e $E_y = y_t - y_m$, os resíduos.

O erro quadrático médio pode ser expresso pela diferença em distância entre os pontos de controle e os transformados a partir destes. A margem de erro recomendável é por volta de ± 1 pixel, sendo que para series temporais, esse valor deveria ser ± 0.5 píxel, para reduzir a possibilidade de detectar falsas mudanças (SALAS E AGUILERA, 2019).

2.4.2 Calibração Radiométrica

Também denominada correção radiométrica, tem como objetivo estabelecer a relação mais precisa e fiel possível entre a dimensão real da superfície da terra e sua estimativa realizada pelo satélite. A correção radiométrica está relacionada às variações na cena, nível de iluminação, condições atmosféricas, ruídos (interferências) e resposta do sensor, processo de gravação dos dados. Também serve para converter e/ou calibrar os dados em níveis digitais para uma unidade de radiação ou reflectância (absoluta) conhecida, tornando possível aproximar estes dados de características biofísicas dos alvos em superfície e facilitar a comparação entre os dados (SCHOWENGERDT, 2007; PONZONI et al, 2015).

A calibração radiométrica tem, portanto, o objetivo de assegurar a atualização da qualidade dos dados gerados por um sensor remotamente situado, bem como assegurar a possibilidade de converter os dados registrados pelos sensores em quantidades físicas passíveis de serem correlacionadas a parâmetros geofísicos, químicos ou biofísicos de objetos (PONZONI et al, 2015).

A grandeza radiométrica à qual os números digitais estão relacionados é a radiância, que representa um fluxo de radiação por área e por ângulo sólido, então o primeiro passo é: transformar o Nível Digital (ND) de cada banda espectral em radiância ($L\lambda$). Como a radiância não depende da distância ou campo de visada, é necessário fazer a transformação de cada banda espectral em radiância ($L\lambda$) para reflectância planetária no topo da atmosfera ($\rho\lambda$). Este processo é importante, porque, ao contrário dos números digitais, este parâmetro traz um significado físicos

obre o alvo e pode ser comparado ao longo do tempo e entre sistemas sensores (JENSEN, 2009).

Como a atmosfera apresenta efeitos de absorção e espalhamento que resultam em variação da radiação eletromagnética na forma das feições de absorção, é necessário remover esses efeitos atmosféricos. Por isso realiza-se a transformação da reflectância no topo da atmosfera ($\rho\lambda$) de cada banda espectral em reflectância de superfície. Em sensoriamento remoto, a correção dos efeitos atmosféricos é realizada para minimizar a influência dos gases e aerossóis sobre a radiação refletida por um determinado alvo e captada pelos sensores. A correção atmosférica também é de grande importância para estudos de sistemas ambientais baseados no comportamento espectral dos alvos/feições de interesse, já que sem ela os índices espectrais de cada feição podem diferenciar-se muito devido a interferências atmosféricas (LU et al., 2002; CHUVIECO, 2010).

Os métodos para correção atmosférica se dividem em três categorias: a) métodos físicos ou fundamentados na Teoria da Transferência Radiativa; b) métodos empíricos baseados na estimativa dos efeitos atmosféricos a partir de informações de alvos específicos contidos na própria imagem a ser processada; c) métodos híbridos, que incluem procedimentos que combinam informações físicas da atmosfera com métricas de estatística da cena. Os métodos físicos de correção atmosférica, também conhecidos como correção absoluta, utilizam medidas ou estimativas físicas de parâmetros atmosféricos para a correção das imagens usando equações diferenciais e integrais (CHUVIECO, 2010; GAIDA et al, 2020).

A conversão dos níveis digitais das imagens em valores físicos como reflectância 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).

2.4.3 Técnicas complementares

2.4.3.1 Google Earth Engine (GEE)

De acordo com Gorelick et al. (2017), é uma plataforma de processamento espacial em nuvem que disponibiliza um catálogo de vários *Petabytes* de imagens de satélite, que permite ao usuários visualizar, manipular, editar e criar dados espaciais de forma rápida. O processamento dos dados é realizado através de *scripts* por meio de uma interface integrada (API) às linguagens *JavaScript* e *Python* que facilita o desenvolvimento de algoritmos rápidos e interativos, assim como a análise e a manipulação dos dados de acordo com as necessidades do usuário.

2.4.3.2 Máscara de nuvens

A disponibilidade limitada de imagens Landsat sem nuvens em algumas áreas da superfície terrestre, levou ao surgimento de compostos de imagens considerando a filosofia do pixel disponível, oferecendo uma alternativa que permite criar uma imagem sem nuvens a partir de outras que possuem algum porcentagem de nuvens, aumentando assim a disponibilidade de uma cobertura espacial suficiente na detecção de mudanças entre períodos (WHITE et al., 2014). Um tipo de composto de imagem é, por exemplo, o processo realizado com as imagens Landsat 7 ETM+ utilizado para preencher as lacunas resultantes dos dados do *ScanLine Corrector* (SLC) – off. (GUTMAN et al. 2013).

A maioria das abordagens de composição foram baseadas em algoritmos de detecção automática de nuvem e sombra de nuvem. Atualmente está disponível um algoritmo robusto e eficiente de detecção automatizada de nuvem que está sendo incluído nos fluxos de trabalho para abordagens de composição como FMASK de Zhu e Woodcock (2012), que também está sendo usado na produção de produtos Landsat como CFMASK resultando na banda Quality Assessment (QA) que acompanha as bandas das imagens Landsat processadas (FOGA et al., 2017).

O *Google Earth Engine* (GEE) fornece o método “*ee.Algorithms.Landsat.simpleComposite*”, que permite criar compostos simples de imagens Landsat sem nuvens. Esse método seleciona um subconjunto de cenas do

local selecionado, aplica a calibração TOA padrão, atribui uma pontuação simples na nuvem a cada pixel e mede os pixels menos nublados.

O *composite* é um método relativamente simples que pode ser utilizado, mas existem algoritmos mais complexos, como o desenvolvido por White et al. (2014) que permitem escolher o melhor pixel de uma Série de imagens, semelhante ao critério de seleção do píxel para os compostos de imagens MODIS; e o utilizado pela USGS para as imagens Landsat chamado CFMask, que não funcionou para as áreas de estudo contempladas na pesquisa, devido à presença de nuvens finas.

2.4.3.3 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

Uma das formas de extrair informações sobre a abundância relativa e atividade da vegetação verde e amplamente utilizado, é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Desenvolvido por Rouse et al. (1974), consiste em uma razão pixel a pixel, entre os valores armazenados nas bandas do Vermelho e Infravermelho próximo de uma imagem. Este índice melhora a discriminação entre duas coberturas com reflectância diferente, neste caso para discriminar componentes vegetais devido ao peculiar comportamento espectral da vegetação.

Enquanto no vermelho (R) os pigmentos da folha absorvem a maior parte da energia que recebem, no infravermelho próximo (NIR) refletem a energia. Este notável contraste espectral permite separar com relativa clareza a vegetação saudável de outras coberturas. Pode-se afirmar que quanto maior seja a diferença entre as reflectividades das bandas R e NIR, maior vigor vegetal apresentará a cobertura observada. Quando a vegetação sofre algum tipo de *stress* como secas prolongadas, a reflectância diminui na banda do NIR, aumentando paralelamente na banda R. Baixos valores de contraste indicam doenças na vegetação ou baixa densidade da cobertura (JENSEN, 2009; CHUVIECO, 2010).

O NDVI é obtido da seguinte forma (Equação 2):

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (2)$$

Onde: NIR = resposta espectral do pixel na banda do infravermelho próximo; R=

resposta espectral do pixel na banda vermelho do visível.

Esta medida radiométrica adimensional varia entre -1 a $+1$, quanto mais próximo de 1 , maior a densidade de cobertura vegetal. Já os valores mais próximos a 0 representam valores aproximados para ausência de vegetação, ou seja, representa superfícies não vegetadas, enquanto valores negativos indicam corpos hídricos.

2.4.3.4 Transformação Tasseled Cap (TTC)

A transformação *Tasseled Cap* (TTC) gera uma nova imagem através de uma combinação linear das bandas originais, onde os novos dados são dispostos em novos eixos, diretamente relacionados às características físicas da cena (LILLESAND et al., 2004). Diferencia-se da análise de componentes principais em que a TTC oferece componentes de significado físico preciso, os coeficientes de ortogonalização independem da distribuição dos dados originais, pelo que podem ser utilizados teoricamente em qualquer cena Landsat (JENSEN, 2009; CHUVIECO, 2010).

Esta transformação ortogonal de dados foi produzida por Kauth e Thomas (1976) para ser aplicada nas imagens Landsat MSS, que inicialmente distinguiu quatro componentes eixos, denominados: brilho (*brighthness*), verdor (*greenness*), material amarelo (*yellowness*) e outro inespecífico (*nonsuch*).

Devido a sua aplicabilidade foram gerados por Crist e Cicone (1984) os coeficientes para transformar imagens Landsat 5 TM (Tabela 9), Huang et al. (2002) apresentou os coeficientes para uso com dados do sensor Landsat 7 ETM+ (Tabela 10) e Baig et al. (2014) derivaram os coeficientes para uso com dados do sensor Landsat 8 OLI (Tabela 11). A partir do Landsat TM foram apresentadas três variáveis: brilho (*brighthness*), verdor (*greenness*), umidade (*Wetness*), que são os que se mantêm até a atualidade.

O brilho "*brighthness*", relacionado à variação espectral dos solos, reflete a variabilidade da reflectância total da cena, é a soma ponderada de todas as bandas. O verdor "*greenness*", relacionado ao vigor da vegetação presente na cena, é o contraste entre o canal do infravermelho e os canais do espectro visível. Já a umidade "*wetness*" relacionado com o conteúdo de água na vegetação e no solo é o contraste entre o infravermelho médio e os demais canais (LILLESAND et al. 2004).

Tabela 9 - Coeficientes Tasseled Cap para uso com dados do Landsat 5 TM

Variáveis	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Brilho	0.3037	0.2793	0.4743	0.5585	0.5082	0.1863
Verdor	-0.2848	-0.2435	-0.5436	0.7243	0.0840	-0.1800
Umidade	0.1509	0.1973	0.3279	0.3406	-0.7112	-0.4572
Quarto	-0.8242	0.0849	0.4392	-0.0580	0.2012	-0.2768
Quinto	-0.3280	0.0549	0.1075	0.1855	-0.4357	0.8085
Sexto	0.1084	-0.9022	0.4120	0.0573	-0.0251	0.0238

Fonte: Crist e Cicone (1984)

Tabela 10 - Coeficientes Tasseled Cap para uso com dados do Landsat 7 ETM+

Variáveis	ETM 1	ETM 2	ETM 3	ETM 4	ETM 5	ETM 7
Brilho	0.3561	0.3972	0.3904	0.6966	0.2286	0.1596
Verdor	-0.3344	-0.3544	-0.4556	0.6966	-0.0242	-0.2630
Umidade	0.2626	0.2141	0.0926	0.0656	-0.7629	-0.5388
Quarto	0.0805	-0.0498	0.1950	-0.1327	0.5752	-0.7775
Quinto	-0.7252	-0.0202	0.6683	0.0631	-0.1494	-0.0274
Sexto	0.4000	-0.8172	0.3832	0.0602	-0.1095	0.0985

Fonte: Huang et al. (2002)

Tabela 11 Coeficientes Tasseled Cap para uso com dados do Landsat 8 OLI.

Variáveis	OLI 2	OLI 3	OLI 4	OLI 5	OLI 6	OLI 7
Brilho	0.3029	0.2786	0.4733	0.5599	0.508	0.1872
Verdor	-0.2941	-0.243	-0.5424	0.7276	0.0713	-0.1608
Umidade	0.1511	0.1973	0.3283	0.3407	-0.7117	-0.4559
Quarto	-0.8239	0.0849	0.4396	-0.058	0.2013	-0.2773
Quinto	-0.3294	0.0557	0.1056	0.1855	-0.4349	0.8085
Sexto	0.1079	-0.9023	0.4119	0.0575	-0.0259	0.0252

Fonte: Baig et al. (2014)

A transformação *Tasseled Cap* ainda traz vantagens, tais como: a normalização radiométrica das imagens, uma vez que em aplicações multitemporais é desejável eliminar o efeito variável da atmosfera e dos ângulos solares, bem como da degradação de detectores. O princípio da ortogonalidade entre as componentes também garante que feições situadas em determinadas regiões do gráfico tenham pouca variação espectral (HALL et al., 1991).

A transformação *Tasseled Cap* é obtida de acordo a equação 3:

$$TC_i = (\text{coeff}_1 * \text{band}_1) + (\text{coeff}_2 * \text{band}_2) + (\text{coeff}_3 * \text{band}_3) + (\text{coeff}_4 * \text{band}_4) + (\text{coeff}_5 * \text{band}_5) + (\text{coeff}_7 * \text{band}_7) \quad (3)$$

Onde TC = Cálculo do *Tasseled Cap*

i = índice: Green, Brightness ou Wetness

coeff = corresponde aos coeficientes calculados para cada banda da imagem de acordo se pertence ao sensor TM, ETM+ ou OLI (tabelas 9, 10 e 11)

band = valores de reflectância na respectiva banda

2.4.3.5. Descrição de textura

A textura é uma propriedade inata dos objetos, encontra-se entre as características empregadas pelo sistema visual humano, que ajuda a interpretar informações sobre a distribuição espacial e a variação de luminosidade, além de descrever o arranjo estrutural das superfícies e relações entre regiões vizinhas (TSO E MATHER, 2009; FARIA, 2015).

Feições espectrais e texturais são interdependentes. Tom e textura estão sempre presentes em uma imagem, embora uma propriedade possa dominar a outra às vezes. Na imagem de satélite se a variação tonal for grande e apresentar estruturas significativas, a textura será dominante. Pode-se esperar que o uso de textura, além de recursos espectrais para classificação de imagens, resulte em algum nível de melhoria da precisão, já que a textura pode ser uma fonte valiosa de informações discriminatórias (HARALICK et al., 1973; TSO E MATHER, 2009). Por este motivo, as bandas de textura podem ser utilizadas combinadas com outras bandas espectrais no processo de classificação de imagens.

Para descrição de padrões de texturas em imagens, normalmente são utilizadas três abordagens principais: a estatística, a estrutural e a espectral (GONZALEZ & WOODS, 2002). A extração de características usando abordagem estatística propicia a descrição de imagens através de regras estatísticas que governam a distribuição e a relação entre os diferentes níveis de cinza.

Em Haralick et al. (1973), foi proposta uma metodologia para descrição de texturas baseada em estatística de segunda ordem, que leva em conta o posicionamento relativo da ocorrência dos níveis de cinza, chamada de matrizes de co-ocorrência (*gray-level co-occurrence matrix* (GLCM)) que consistem de uma contagem de quantas combinações diferentes de níveis de cinza ocorrem em uma imagem, em uma determinada direção. Para obtenção de tais matrizes, considera-se a variação da distância e direção (d, θ), entre pixels vizinhos. Normalmente são utilizados quatro direcionamentos: 0° , 45° , 90° e 135° , conforme ilustra a Figura 1.

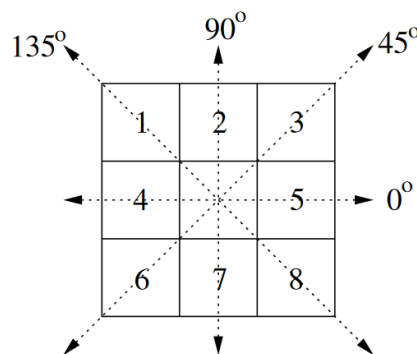


Figura 1 - Ângulos utilizados para o cálculo das matrizes de co-ocorrência. Fonte: Farias (2015).

O *software* ENVI utiliza uma configuração baseada no trabalho de Haralick et al. (1973) para níveis de quantização em escala de cinza e permite reduzir ainda mais o número de tons de cinza necessários para representar a imagem. Esta opção também reduz o tempo de processamento. As matrizes de co-ocorrência formam a base para elaboração de diversas medidas estatísticas conhecidas como descritores de Haralick, uma série de estruturas métricas que são uma classe de operações de vizinhança desenhadas para caracterizar a variabilidade (textura) na vizinhança em torno de um pixel. (SCHOTT, 2007).

Utilizou-se neste trabalho o descritor de variância (Var) com uma janela 3 x 3, que proporcionou melhores resultados. Como medida de heterogeneidade, a

variância apresenta valores altos quando os tons de cinza desviam do nível de cinza médio, independentemente da localização dos elementos da matriz e da frequência espacial que a textura apresenta (FARIAS, 2015).

A variância descreve quanto os valores estão dispersos em torno da média, em que i representa o tom de cinza para o i -ésimo pixel e p o número de pixels presentes na textura (Equação 4).

$$f_4 = \sum_i \sum_j (i - \mu)^2 p_{ij} \quad (4)$$

2.4.3.6. Medida de separabilidade

Quando existem regiões da imagem em que o usuário dispõe de informações que permitem a identificação de uma classe de interesse, o treinamento é dito supervisionado. Para um treinamento supervisionado o usuário deve identificar na imagem uma área representativa de cada classe. É importante que a área de treinamento seja uma amostra homogênea da classe respectiva, mas ao mesmo tempo deve-se incluir toda a variabilidade dos níveis de cinza.

Recomenda-se que o usuário adquira mais de uma área de treinamento, utilizando o maior número de informações disponíveis, como trabalhos de campo, mapas, etc. Para a obtenção de classes estatisticamente confiáveis, são necessários de 10 a 100 "píxeis" de treinamento por classe. O número de "píxeis" de treinamento necessário para a precisão do reconhecimento de uma classe aumenta com o aumento da variabilidade dentro da classe.

O número de píxeis de treinamento devem ser os necessários para garantir estimativas confiáveis das assinaturas espectrais correspondentes a cada classe. Este número de píxeis necessários aumenta conforme o número de bandas que conforma a imagem. Aquelas amostras que não discriminam, contribuindo com a diminuição da separabilidade das classes espectrais devem ser avaliadas para estabelecer se existe confusão espectral pelo fato de apresentar respostas espectrais semelhantes ou se devem ser descartadas.

Um procedimento comumente usado é determinar a separabilidade matemática das classes no processo de refinamento do conjunto de treinamento.

Neste caso apenas para avaliar se a seleção dos pixels que conformaram as áreas de treinamento possuem uma boa separabilidade foram aplicadas as medidas de separabilidade de *Jeffries-Matusita* e de divergência transformada descritas por Lillesand et al. (2004), Richards e Jia (2006), e Tso e Mather (2009) e disponibilizadas no *software* ENVI. Esses valores variam de 0 a 2,0; valores maiores que 1,9 indicam que as amostras têm boa separabilidade. No caso das amostras com valores mais baixos de separabilidade, é necessária a edição e/ou seleção de novas amostras.

2.4.4 Métodos de classificação

A interpretação e classificação dos produtos de sensoriamento deve ser realizada seguindo alguns parâmetros pré-estabelecidos. Panizza e Fonseca (2011), descrevem as formas de proceder com tal atividade, a interpretação e o processo pelo qual as informações obtidas por técnicas de observação, desenvolvimento lógico e acurados, permite obter produtor e tirar conclusões.

Alguns critérios ou princípios básicos devem ser observados no momento da interpretação visual, são eles: Forma - geometria dos objetos; Tamanho – critério que varia conforme a escala da fotografia aérea ou a resolução espacial da imagem; Tonalidade – quantidade de energia refletida por um objeto e em um determinado comprimento de onda do espectro eletromagnético; Localização – posição geográfica do alvo; Textura – lisa ou rugosa, homogênea ou heterogênea; Estrutura – paralela, quadriculada, retangular, etc.

O princípio básico do sensoriamento remoto e seu objetivo são a extração de informações contidas nas imagens, apresentando-as em forma de tabelas, gráficos e mapas. Para isso, é necessário a aplicação de métodos específicos de classificação, sendo que a forma mais difundida entre os usuários de sensoriamento remoto e que foi adota pelos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) que permitem o processamento digital de imagens, compartimenta os classificadores em supervisionados e não-supervisionados.

A classificação de imagens multiespectrais, conforme afirma Meneses e Almeida (2012), é a ação de associar os pixels das imagens a um número finito de classes que representem os alvos ou objetos do mundo real, baseadas em valores digitais intrínsecos a cada pixel.

Em se tratando de métodos de classificação dos produtos de sensoriamento remoto, Gonçalves et al. (2008), descrevem a classificação não-supervisionada como sendo um método baseado no princípio de que o algoritmo computacional é capaz de segmentar por si só as classes ou regiões dentro de um conjunto de dados.

Essa classificação é frequentemente efetivada através de métodos de agrupamentos. Existe um grande número de métodos de agrupamentos na área de segmentação de padrões, a maioria dos softwares ou sistemas computacionais voltados para o processamento digital de imagens de sensoriamento remoto realiza a classificação não-supervisionada baseada em métodos de agrupamentos particionais, como o K-means e o ISODATA.

A classificação supervisionada e relatada por Meneses e Almeida (2012), como sendo a técnica que requer conhecimentos prévios das classes de alvos, a fim de classificar a imagem nas classes de interesse pré-fixadas pelo analista. O algoritmo necessita ser treinado por coleta de amostras, para distinguir as classes uma das outras.

A qualidade do processamento, depende em tese do número de amostras coletadas e da qualidade dessas amostras. Para a devida precisão dos produtos, foram desenvolvidos alguns coeficientes que servem como base para averiguar a qualidade dos produtos.

O resultado é melhor quanto maior o número de píxeis há na amostra de treinamento. Este método deve ser aplicado quando o analista tem amplo conhecimento da área da imagem, para que as definições das classes sejam mais representativas (LIU, 2007).

Na abordagem paramétrica o método de classificação supervisionada mais utilizado é o método da Máxima Verossimilhança, um caso particular do classificador de Bayes. *Support Vector Machines* (SVM) é um exemplo de classificador não-paramétrico. Ambos métodos usam amostras de treinamento representativas de cada classe na cena (FERREIRA, 2014).

Nos últimos anos é notável o incremento de publicações que mostram as vantagens do método SVM, sendo adequado para classificação de imagens hiperespectrais, permite lidar com espaços de dimensões grandes, amostras ruidosas de forma eficiente, produzindo um modelo que define uma fronteira de decisão de forma robusta, com apoio de um subconjunto de amostras de

treinamento (CAMPS-VALLS e BRUZZONE, 2005).

Embora o método supervisionado mostre vantagens tais como definição da natureza do tipo de mudança, quantificação das classes que mudaram, a disponibilidade de dados terrestres para todos os anos em uma série multitemporal é uma tarefa de difícil execução para coletar dados dos anos anteriores, além do custo operacional (ZANOTTA e HAERTEL, 2012; FERREIRA, 2014).

Alphan (2013) destaca que a análise de mudanças multitemporal requer a identificação correta dos padrões de mudança, que pode ser uma tarefa difícil, quando a série temporal é longa. A utilização do método de pós classificação requer pelo menos duas classificações precisas e consistentes que, às vezes, são difíceis devido a ambiguidade resultante das transições entre as classes, o que mostra que o modelo pode ser considerado suscetível à heterogeneidade espaço-temporal da área de estudo.

2.4.5 Máquinas de vetor suporte (SVM)

As máquinas de vetores de suporte (SVM - *Support Vector Machine*) representam um grupo de algoritmos de aprendizado de máquina teoricamente superiores, sendo uma técnica de aprendizado de máquina largamente empregada em problemas de classificação e regressão (TSO E MATHER, 2009).

A abordagem SVM é baseada na minimização do risco estrutural, na qual o erro de generalização é delimitado pelo somatório do erro de treinamento e uma parcela que depende da dimensão VC – *Vapnik-Chervonenkis* (VAPNIK, 2000).

O classificador SVM separa as classes com uma superfície de decisão que maximiza a margem entre as classes. A superfície é freqüentemente chamada de hiperplano ideal e os pontos de dados mais próximos ao hiperplano são chamados vetores de suporte. Os vetores de suporte são os elementos críticos do conjunto de treinamento, já que são os pontos que delimitam as superfícies de decisão (VAPNIK, 2000; HAYKIN, 2001).

Este algoritmo não utiliza todos os dados de treinamento, utiliza um subconjunto que define melhor a separação entre as classes e é menos sensível aos valores *outlayer*, e ao maximizar a distância de hiperplanos facilita a generalização (GARCIA E RAMOS, 2019).

O algoritmo SVM pode considerar classes linearmente ou não linearmente

separáveis definindo estratégias multiclases (regras um-contra-um ou um contra-todos). Para o caso de classes não-linearmente separáveis, a estratégia é utilizar uma variável flexível, uma medida de penalidade no algoritmo de classificação, permitindo certa tolerância de erro na definição dos hiperplanos de separação, prevenindo que *outliers* afetem o hiperplano ótimo, sendo que uma maior penalidade reduz a tolerância ao erro e conseqüentemente os hiperplanos definidos são menos flexíveis, reduzindo a capacidade de generalização na classificação.

No algoritmo SVM podem ser empregadas funções simétricas, chamadas funções Kernel, que satisfazem a algumas condições com o objetivo de produzir superfícies de separação mais complexas e permitir a classificação em espaços não linearmente separáveis. Dentre as funções Kernel mais usadas destacam-se: Polinômios, Funções de Base Radial Gaussiana e Rede Neural Sigmóide de duas camadas (Equação 5), definidas como:

$$\begin{aligned}
 &\text{polynomial: } K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = (\gamma \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j + r)^d, \gamma > 0. \\
 &\text{radial basis function (RBF): } K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp(-\gamma \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2), \gamma > 0. \\
 &\text{sigmoid: } K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \tanh(\gamma \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j + r).
 \end{aligned} \tag{5}$$

Onde x são os pontos do hiperplano, γ é um parâmetro que define a transformação dos dados nos hiperplanos e r é o bias.

O SVM requer que cada categoria de dados seja representada como um vetor de números reais. A normalização dos dados antes de aplicar o SVM é muito importante. A principal vantagem da normalização é evitar que atributos em intervalos numéricos maiores, dominem aqueles em intervalos numéricos menores. Outra vantagem é evitar dificuldades numéricas durante o cálculo. A recomendação é normalizar entre os intervalos $[-1, +1]$ ou $[0,1]$. Daí a importância da normalização dos dados da imagem, pois acelera sua convergência, a convergência do processo de aprendizado (HSU et al., 2007).

2.4.6 Validação da exatidão do mapeamento

A validação dos resultados da classificação, segundo Congalton e Green (1999) inclui os seguintes passos:

- a) Seleção do tipo de amostragem: aleatório, aleatório estratificado, sistemático, sistemático não alinhado e por conglomerados.
- b) Coletar os dados de referência. Inclui estabelecer as fontes do considerado como a verdade-terreno, como foram coletados os dados de referência e resultados da análise digital
- c) Comparar os dados de referência e os resultados obtidos, mediante teste estatístico e geração da matriz de confusão.
- d) Análise dos erros encontrados

De acordo ao conhecimento da área de estudo é possível realizar uma avaliação qualitativa dos resultados e avaliar se parece bom, mas é a avaliação quantitativa que vai mostrar se os resultados da classificação são adequados. Para uma verificação efetiva é necessário selecionar uma serie de amostras independentes, ou chamadas amostras de validação, que são diferentes às amostras de treinamento, que permitam gerar uma estatística mais sólida de acordo entre a imagem e a verdade do terreno. Desta forma pode estimar-se o erro dos resultados utilizando a matriz de confusão com as imagens classificadas (CHUVIECO, 2010).

Na escolha das amostras de treinamento é importante: considerar o contraste espacial entre as classes que pretendem ser identificadas e discriminadas, tipos de cobertura e sua configuração territorial, tipos de paisagem, tipo de sensor adequado para separar coberturas, escala de trabalho; para tentar reduzir os erros de borda, onde os píxeis registram um sinal radiométrico intermédio entre dois ou mais tipos de cobertura. Existe uma parcela de erros de classificação relacionados com a auto-correlação espacial entre píxeis mal classificados de acordo com o tipo de paisagem e sua distribuição espacial (CHUVIECO, 2010).

Depois de escolher o método e tamanho da amostra, assim como a localização das amostras, deve-se obter o valor da classe temática de referência e o estimado a partir da interpretação da imagem. Este processo é realizado por medição ou observação direta em campo, para extrair a maior quantidade de

informação de campo para validar os modelos de interpretação, utilizando planilhas de campo, fotografias dos pontos selecionados e medições com GPS. O ideal seria que o levantamento de informação de campo seja na mesma data ou próxima a data da imagem. Geralmente são escolhidos grupos de píxeis que representem a classe de interesse tanto para as amostras de treinamento como para as amostras de validação (CONGALTON E GREEN, 1999; CHUVIECO, 2010).

Para verificar a classificação são utilizadas as amostras de treinamento e as amostras de validação para gerar a matriz de confusão, onde as colunas referem-se as áreas de treinamento e as filas as classes da classificação. A tabela de confusão mostra a exatidão para cada classe e os conflitos entre elas (CHUVIECO, 2010).

Um método comum para avaliação da acurácia do resultado da classificação digital de imagens de sensoriamento remoto é o uso da matriz de erro e das estatísticas derivadas, o que permite o cômputo da exatidão global, exatidão por classe de mapeamento do coeficiente de concordância Kappa (LU et al.,2003; SKIDMORE, 1999).

O coeficiente Kappa pode ser calculado através da seguinte equação (6):

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad (6)$$

Onde K é uma estimativa do coeficiente Kappa; x_{ii} é o valor na linha i e coluna i; x_{i+} é a soma da linha i e x_{+i} é a soma da coluna i da matriz de confusão; n é o número total de amostras e c o número total de classes.

O coeficiente de Kappa, descrito por Landis e Koch (1977), é utilizado para expressar a taxa de concordância entre o observador e a amostragem. O coeficiente é calculado de maneira automática pelos SIG's e com isso é possível aferir a acurácia da classificação, sendo que valores próximos a 0,0 representam uma acurácia quase inexistente ao contrário, valores próximos a 1,0 denotam classificações excelentes. Na Tabela 12, Moreira (2007) mostra uma adaptação desenvolvida por Landis e Koch (1977), com os valores de referência e suas respectivas classificações.

Tabela 12 - Valores de referência do coeficiente de Kappa

Valor de Kappa	Qualidade do mapa temática
<0,00	Péssima
0,00 - 0,20	Ruim
0,21 – 0,40	Razoável
0,41 – 0,60	Boa
0,61 – 0,80	Muito Boa
0,81 – 1,00	Excelente

Fonte: Moreira (2007) adaptado de Landis e Koch (1977).

A avaliação de precisão é muito importante para entender os resultados obtidos e aplica-los na tomada de decisão. Os elementos como precisão geral, precisão do usuário, precisão do classificador e coeficiente Kappa, são os avaliadores mais comuns. Congalton e Green (1999) realizam uma discussão sistemática sobre os conceitos de precisão e formas de avaliação no sensoriamento remoto.

Foody (2002) faz alguns questionamentos sobre acurácia dos mapas de uso e cobertura, assim como os produtos obtidos a partir da detecção de mudanças e os indicadores utilizados para medir a precisão, devido as dificuldades de obter dados exatos no campo e à forma em que a matriz de confusão oferece resultados sobre o mapa avaliado, destacando a necessidade de uma métrica quantitativa do resultado da classificação, além da matriz de confusão.

A avaliação de precisão é discutida por Singh (1989), Lu et al. (2004) e Tewkesbury (2015), já que alguns estudos não aprofundam na avaliação dos resultados, enquanto em outros estudos, a base da avaliação é dada pela comparação dos resultados de várias técnicas, mostrando um viés com relação a afirmar que um método pode ser o melhor, quando diversos fatores podem levar um mesmo método ser eficiente para uma área enquanto para outra não oferecer resultados aceitáveis. Na prática, os analistas frequentemente selecionam vários métodos para implementar detecção de mudanças na área de estudo, comparando e identificando os melhores resultados através da avaliação de precisão qualitativa e quantitativa.

2.4.7 Análise 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 píxeis que se encontram dentro de uma classe de cobertura enquanto outros apresentam mistura de classes em diferentes proporções (PONZONI et al., 2012).

A presença dessas 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 vêm 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.

O modelo de mistura espectral pode ser lineal ou não lineal, sendo o mais utilizado, 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 parte de alguns pressupostos, tais como: a radiação recebida pelo sensor de cada alvo, restringe-se ao âmbito do pixel, o sinal procedente de uma cobertura vizinha não tem influência. A radiância global é proporcional à superfície ocupada por cada coberta, pelo que nenhum dos componentes do pixel não tem uma ponderação maior à sua própria superfície. A mistura lineal só se 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 pressupostos acima, a Análise de Mistura Espectral 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 de 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:

$$\rho_{i,j,k} = \sum_{m=1,p} F_{i,j,m} \rho_{m,k} + e_{i,j,k} \quad (7)$$

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 : erro de estimação associado as proporções em cada pixel i,j na banda k ;

A proporção de cada componente puro F_m deve estar entre 0 e 1, sendo que não podem existir proporções negativas, indicando que a somatória das proporções para todos os componentes é igual a superfície total do pixel. As frações f_i em cada pixel individual devem satisfazer as condições seguintes:

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

$$\sum_{m=1,p} F_{i,j,m} = 1 \quad 0 \leq F_{i,j,m} \leq 1 \quad (8)$$

Para o processo de seleção dos componentes puros ou membros referência, foi 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 foi utilizada o método Fração do Mínimo Ruído (MNF, *Minimum Noise Fraction*) de Green et al. (1988) que consiste na aplicação de duas análises de componentes principais (ACP) consecutivas, 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 foi 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 simplex⁴, sendo que os píxeis relativamente mais puros tendem a se repetir, aumentando seu valor de PPI, até ser considerado puro. Quanto maior for o número de iterações, melhor o resultado.

O gráfico resultante mostra o número de iterações com o número de píxeis que correspondem a condição de pixel puro, sendo que quando a curva do gráfico se torna próxima de um patamar, indica que o número de iterações 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,

⁴ 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).

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 (Boardman e Kruse, 1994; Carvalho et al. (2003).

Uma vez que as respostas espectrais dos componentes puros foram 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 6.

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

(9)

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).

2.5 Considerações sobre detecção de mudanças

A comparação direta entre mapas de uso e cobertura derivados a partir de imagens de satélite é um dos métodos mais estabelecidos e amplamente utilizados, sendo uma técnica tematicamente rica, que pode responder perguntas específicas de mudanças.

Determinar a tendência e porcentagem de mudanças no uso e cobertura do solo é necessário para o planejamento do desenvolvimento, com fins de estabelecer políticas de uso racional da terra. Neste propósito, a dinâmica temporal oferecida pelos dados de sensoriamento remoto podem exercer um papel importante no monitoramento e análise de mudanças no uso e cobertura da terra (ADEL et al., 2007).

As informações sobre mudanças no uso e cobertura com precisão e suas atualizações são importantes para entender e avaliar as consequências ambientais de tais 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, o processo para determinar e/ou descrever mudanças no uso e cobertura da terra é 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 (ADEL et al., 2007; SINGH, 1989).

Lambin e Strahler (1994) mencionam algumas categorias que influenciam as mudanças de uso e cobertura: mudanças naturais a longo prazo nas condições climáticas; processos geomorfológicos e ecológicos tais como erosão do solo e sucessão da vegetação; alterações da cobertura vegetal e formas do terreno induzidas por ações humanas, tais como desmatamento e degradação do solo; variabilidade climática interanual e efeito estufa causado pelas atividades humanas.

Uma simples detecção de mudanças é raramente suficiente em si mesma, os dados requerem análise inicial e final dos tipos de uso e cobertura da terra. Fatores como avaliação limitada da imagem e dificuldades pela calibração errada das imagens podem causar confusões na detecção de mudanças entre duas datas (ADEL et al., 2007).

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., 2004; TEWKESBURY, 2015), deixando desta forma aos usuários ou pesquisadores escolher entre diversas opções, aspecto que pode ser difícil até pelos nomes e classificações dos métodos

Lu et al. (2004) apresentam sete categorias de análise, destacando que conforme aumenta a categoria, aumenta a complexidade da aplicação, divididas entre 31 técnicas, mostrando as vantagens e desvantagens por técnica. Aborda a implementação da técnica de detecção de mudanças em três passos: 1) pré-processamento das imagens: incluindo correção geométrica, co-registro, correção radiométrica e atmosférica, correção topográfica caso a área de estudo seja montanhosa; 2) seleção da técnica adequada para implementação da análise de mudança; 3) avaliação de precisão; destacando as duas primeiras como as mais importantes.

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.

Uma boa pesquisa sobre detecção de mudanças deve prover as seguintes informações: 1) área e porcentagem de mudança, 2) distribuição espacial dos tipos de mudança, 3) direção da mudança dos tipos de uso e cobertura, 4) avaliação de precisão dos resultados da detecção de mudança. Nestes fatores a maioria dos autores concorda com Lu et al. (2004) que sintetizam em quatro condições.

Lu et al. (2004) ressalta que a precisão dos resultados de detecção de mudanças depende de vários fatores, tais como:

- a) Co-registro preciso entre imagens multitemporais
- b) Calibração ou normalização entre imagens multitemporais
- c) Disponibilidade de dados de campo confiáveis
- d) Complexidade da superfície e ambiente da área em estudo
- e) Métodos de detecção de mudanças e algoritmos utilizados
- f) Esquemas de classificação e detecção de mudanças

- g) Experiência e habilidade do analista
- h) Conhecimento e familiaridade com a área de estudo
- i) Tempo e restrições financeiras

No sensoriamento remoto a mudança, é apreciada nos valores de radiância entre duas diferentes datas para um tipo de cobertura, é assumido como um indicador de mudança, mas devem ser consideradas 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 (SINGH, 1989).

Para Jensen et al. (2007), as resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal têm um impacto significativo no sucesso de uma análise de detecção de mudanças utilizando produtos de sensoriamento remoto, neste sentido, estes autores apontam outros detalhes importantes que devem ser considerados ao implementar uma metodologia de detecção de mudanças.

Com relação à resolução espacial das imagens: 1) melhor é utilizar imagens adquiridas na mesma data, quando não for possível por mudanças na órbita do satélite, cobertura de nuvens, escolher imagens com datas mais próximas possíveis, para eliminar as diferenças sazonais do ângulo de inclinação solar que podem afetar os resultados da detecção de mudanças. 2) os dados de sensoriamento remoto devem ser obtidos a partir de um sistema sensor que adquire os dados aproximadamente à mesma hora do dia, isto ajuda a eliminar os efeitos do ângulo solar que podem causar diferenças anômalas nas propriedades de reflectância nos dados de sensoriamento remoto. Singh (1989) tinha feito referência a estes fatores para reduzir problemas com diferenças nas condições atmosféricas, na umidade do solo, mudanças fenológicas da vegetação de acordo com a sazonalidade, que podem afetar a análise e o resultado na detecção de mudanças.

Precisão no co-registro das imagens multitemporais: é essencial na detecção de mudanças (SINGH, 1989), devido a potenciais erros no registro que possam ser interpretados como mudanças de uso e cobertura, gerando uma superestimação da mudança. A análise de detecção de mudanças é realizada na base pixel a pixel entre, pelo menos, duas imagens de datas diferentes, porém qualquer deslocamento no registro superior a um pixel pode dar um resultado errado,

o recomendável é que o erro médio quadrático seja inferior a 0.5 pixels (ADEL et al., 2007).

O ideal seria que o tamanho do pixel fosse constante para cada imagem. Caso seja necessário utilizar dados de sensores diferentes, ambas imagens devem ser reamostradas ao mínimo tamanho de pixel aceitável de acordo com os dados disponíveis, considerando que o ângulo de visada original é quem indica o conteúdo de informação dos dados da imagem, por exemplo se uma imagem com resolução espacial de 80 x 80 m (Landsat MSS) for reamostrada a 20 x 20 m (SPOT 4) não deve esperar-se detalhes adicionais na informação espacial.

As imagens para detecção de mudanças devem ser adquiridas com aproximadamente o mesmo ângulo de visada. Este assunto é importante porque em alguns satélites os sensores podem tomar imagens off-nadir $>20^\circ$, isto pode causar diferenças na refletância dos alvos já que aquelas imagens com ângulo de visada próximo ao 0° nadir vão ter dados do topo dos alvos enquanto as imagens com $>20^\circ$ off-nadir podem ter dados das laterais dos alvos. Diferenças na refletância dos alvos entre imagens podem causar identificação de falsas mudanças quando na realidade não têm mudança (JENSEN et al., 2007).

O ideal é que a resolução espectral seja a mesma no grupo de imagens de múltiplas datas, mas quando não for possível, o analista deve selecionar as bandas cuja largura espectral se aproxime entre os diferentes sensores, já que alguns algoritmos não funcionam bem quando comparam bandas de diferentes sensores.

Para detecção de mudanças, o ideal é que os dados possuam a mesma precisão radiométrica. Quando resoluções radiométricas diferentes são comparadas (Landsat MSS e Landsat TM), o dado de menor resolução deve ser reescalado ao dado de maior resolução, lembrando que os valores de brilho resultantes nunca serão melhores do que o original. Muitas vezes é necessário normalizar radiometricamente os dados de diferentes datas.

As imagens obtidas por sensores remotos em diversas datas e utilizadas em detecção de mudanças são raramente coletadas em idênticas condições atmosféricas. Mudanças sutis na umidade e cobertura de nuvens podem ser inconvenientes, por este motivo é recomendável utilizar imagens correspondentes a uma mesma época do ano para garantir quase nenhuma mudança sazonal entre as condições atmosféricas das imagens de diferentes datas

Na detecção de mudanças, a representação espacial permite detectar e/ou estimar a extensão na superfície das mudanças, enquanto o espaço temporal oferece a proporção das mudanças. A dimensão temporal pode ser multiestacional ou multianual. O enfoque multiestacional considera a variação fenológica na discriminação de algumas categorias que podem ou não ser separáveis espectralmente. Neste caso são selecionadas imagens associadas a distintas estações, de acordo com a sazonalidade das coberturas. O enfoque multianual tem como objetivo a detecção de mudanças entre duas ou mais datas, onde são utilizadas imagens adquiridas em vários anos que podem ser comparadas visual ou digitalmente. Diferentemente do enfoque multiestacional, as imagens utilizadas correspondem com a mesma época do ano, para isolar de forma mais fácil as mudanças no terreno (RIANO, 2002).

A comparação pós-classificação, é um dos mais óbvios métodos de detecção de mudanças que requer da comparação de duas imagens classificadas de forma independente, de diferentes períodos de tempo para identificar mudanças entre eles (SINGH, 1989).

A comparação pós-classificação é uma técnica de complexidade média de acordo com Lu et al. (2004) baseada em imagens classificadas, nas quais a qualidade e quantidade de áreas de treinamento são cruciais para produzir bons resultados na classificação e, por conseguinte, confiabilidade dos mapas, já que os erros nas imagens temáticas individuais afetarão a precisão da detecção de mudanças finais.

A maior vantagem deste modelo é a capacidade de prover a informação da matriz de mudanças e reduzir o impacto externo de diferenças atmosféricas e ambientais entre imagens multitemporais. Além disso, a classificação de base e as transições de mudança são explicitamente conhecidas. As desvantagens estão relacionadas à dificuldade de selecionar suficientes amostras de treinamento de alta qualidade, particularmente para a classificação das imagens históricas. Requer uma grande quantidade de tempo e experiência do analista para criar os produtos classificados. Além disso, os mapas de entrada podem ser produzidos utilizando datas e algoritmos diferentes, neste caso a distinção deve ser realizada entre as inconsistências da classificação e mudanças reais. O maior problema com este método é a alta dependência da qualidade da classificação dos mapas de erros individuais que compõem o mapa de mudanças. As incertezas na classificação

podem ser espaciais, temáticas ou a combinação de ambas, e responsáveis por atribuir confianças a esses critérios (LU et al., 2004; TEWKESBURY, 2015).

Alguns desses problemas foram identificados por Foody (2001) quando verificou que a comparação pós-classificação na abordagem convencional de classificação rígida, onde a avaliação é probabilística, pode ignorar ou não representar pequenas modificações e conversões na cobertura da terra a escala de sub-píxel, resultando em um erro significativo. Esta abordagem pode subestimar as áreas com mudanças de uso e cobertura, mas quando as mudanças são detectadas, sua magnitude é superestimada.

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). Com a aparição de diversos sensores com melhoras na resolução espacial, temporal, espectral e radiométrica, tem-se desenvolvido diversas técnicas para conhecer a dinâmica das dunas. De fato, 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. Mesmo assim Hugenholtz et al. (2012) menciona que o método é recomendável na análise morfológica de migrações de dunas.

Embora as medições manuais em campo ou nas imagens provenientes de sensores remotos requeiram um trabalho intensivo que demanda grande quantidade de tempo por se tratar de análise em grandes campos de dunas, poucos métodos têm sido desenvolvidos para a estimativa automática da direção e taxas de migração das dunas.

Na literatura são citados os métodos: *co-registration of optically sensed images and correlation* (COSI-Corr) aplicado por Leprince et al. (2007), em imagens ASTER de resolução espacial média e Hermas et al. (2012), Al-Mutiry et al. (2016) em imagens SPOT 4; e o *Pairs of Source and Target Points* (PSTP) em Dong (2015),

Xia e Dong (2016) aplicado em MDE obtido a partir de dados Lidar; ambos para obtenção de dados quantitativos de direção de migração e taxa de migração das dunas (HUGENHOLZ et al., 2012; DONG, 2015).

Os trabalhos de Smith et al (1990) Blount et al (1990), Paisley et al (1991), Chen et al (1998), Lam et al (2011), Els et al (2015), foram direcionados ao monitoramento de processos de desertificação, que se manifestam em processos tais como: reativação de dunas estabilizadas, transporte de areias que levem a potenciais invasões e mudanças na cobertura vegetal.

Já as pesquisas de Blount et al (1990), Smith et al (1990a), Smith et al (1990b), Ray et al (1996), Okin et al (2001) Collado et al (2002), Pan e Li (2013), Ji et al (2017), Dashti et al (2019) têm referenciado as pesquisas anteriores e utilizado o método de análise de mistura espectral, considerando que as interações espectrais entre a vegetação gramínea e arbustiva e o solo, dificultam as medições da cobertura vegetal e como as características espectrais únicas de alta reflectividade da areia das dunas ativas, fazem que apareçam mais brilhantes do que as dunas inativas.

Essa diferença de albedo é melhor identificada com o análise de mistura espectral já que o método separa as contribuições espectrais de aqueles componentes intrínsecos da cena desde sombras e outros efeitos de iluminação, sendo particularmente útil em áreas de desertos onde as proporções de vegetação e solo podem variar significativamente em pequenas distancias (Ray et al, 1996; Smith et al 1990b), sendo que as mudanças de albedo podem ser relacionadas à dinâmica das dunas, evidenciando o deslocamento das dunas (Collado et al, 2002).

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. O monitoramento das dunas no passado tem sido limitado pela resolução espacial dos mapas topográficos, acurácia e frequência temporal das medições. Inovações como sensores aerotransportados como LIDAR, sensores de radar e avanços em fotogrametria, tem permitido a construção de modelos de terreno mais detalhados e precisos, mostrando a aplicabilidade da fotogrametria para detecção de mudanças topográficas em campos de dunas (BROWN e ARBOGAST, 1999).

Realces de contraste e composição de bandas em falsa cor nas imagens óticas, ajudam na detecção de mudanças no uso e cobertura, para diferenciar

vegetação e morfologia de dunas. O uso de imagens ALOS PALSAR, banda L, possui vantagens na penetração na areia; a aplicação de filtro *gamma* nas imagens favorece a visualização do sentido de migração das dunas e também a separação das dunas na imagem com relação as outras coberturas (CORTIZO e ISLA, 2012).

Na prática, não é fácil selecionar uma técnica de detecção de mudanças, já que a revisão de trabalhos prévios realizados, apenas serve para entender como essas técnicas podem ser utilizadas para ajudar a resolver problemas específicos. Quando é escolhida a área de estudo e se dispõem das imagens, é possível identificar qual técnica de detecção de mudanças pode proporcionar resultados de boa qualidade (LU et al., 2004).

A análise de detecção de mudanças é um tópico ativo de pesquisa e novas técnicas continuam sendo desenvolvidas, visando à facilidade de implementação e prover resultados precisos com direção da mudança associada. Apesar de existir variedade de técnicas, é difícil ainda selecionar um método adequado para implementá-lo com precisão para um fim de pesquisa particular ou área de estudo, já que a seleção requer de uma cuidadosa consideração dos fatores de maior impacto.

Segundo Lu et al. (2004) e Tewkesbury (2015) várias técnicas são utilizadas para implementar detecção de mudanças, cujos resultados são comparados para identificar o melhor produto através de avaliação visual ou avaliação quantitativa da precisão. A seleção do método de detecção de mudanças depende do conhecimento do analista do método de detecção de mudanças, habilidade no manejo de dados de sensoriamento remoto, tipo de imagens utilizadas, características da área em estudo, dentre outros fatores.

2.5.1 Seleção de limiares

O limiar é uma técnica de classificação simples, que permite segmentar elementos de uma imagem, em duas ou mais categorias, definindo alguma forma espacial que pode ser utilizada para mascarar partes de uma imagem ou separar áreas de interesse (SCHOWENGERDT, 2007).

Na maioria dos métodos é necessário discriminar entre áreas com e sem mudanças, isto pode se estabelecer através de um limiar cujo valor o analista escolhe de forma empírica ou estatística, baseado no histograma da imagem,

experiência do intérprete com a imagem e conhecimento da área em estudo. Os limiares podem mostrar duas ou mais classes, onde os valores de diferentes píxeis são agrupados (SINGH, 1989).

Existem métodos analíticos para selecionar o limiar ou umbral mais apropriado nos extremos da distribuição, tais como o uso de +2 para o desvio padrão, mas muitos analistas preferem uma seleção empírica, localizando os umbrais até encontrar uma quantidade realista de mudanças, porém a quantidade de mudanças selecionadas e representadas é, portanto, subjetivo e baseado no conhecimento da área de estudo (JENSEN et al., 2007).

As desvantagens da técnica de limiares estão relacionadas as diferenças que poderiam incluir influências externas causadas por condições atmosféricas, ângulo solar, umidade do solo e diferenças fenológicas que se adicionam à mudança de uso e cobertura real. Também destaca-se o fato dos limiares serem altamente subjetivos, dependentes da cena objeto de análise, dependem do conhecimento da área em estudo e da habilidade do analista. Embora existam alguns métodos automáticos que tentam minimizar a subjetividade, tais como funções *fuzzy* e regras de *Bayes*, ainda são pouco utilizados na prática por sua complexidade. Contudo, o método de limiares é um dos mais aplicados em detecção de mudanças e não mudanças, pela simplicidade e pelo fator intuitivo na determinação dos valores limiares (LU et al., 2014).

2.5.2. Análise Visual

Esta técnica de detecção de mudanças era uma das formas mais antigas de identificação de mudanças de uso e cobertura antes da disponibilidade de imagens de satélite digitais, quando a capacidade dos computadores para processamento de imagens era limitada. Com o desenvolvimento de tecnologias da computação e técnicas de sensoriamento remoto, o processamento digital de imagens foi gradualmente substituindo pela interpretação visual.

Este método faz uso de toda a experiência e conhecimento do analista, utiliza os elementos de interpretação visual tais como: cor, tom, sombra, textura, forma, tamanho, padrão, associação, para identificação de mudanças no uso e cobertura. A habilidade do analista pode incorporar todos esses elementos na tomada de decisão sobre mudanças de uso e cobertura do solo. A desvantagem

deste método é o tempo que deve ser utilizado na aplicação e detecção das mudanças, assim como a dificuldade de atualizar oportunamente os resultados e detalhar trajetórias de mudança.

A interpretação visual tem o potencial de identificar mudanças de acordo com a habilidade do analista e seu conhecimento da localidade de estudo, em áreas onde a detecção automática utilizando processos computacionais dificultam registros seletivos ou erros de classificação por mistura espectral, por exemplo. A interpretação visual continua sendo valorizada em composições coloridas de imagens, na análise qualitativa de mudanças de uso e cobertura, assiste à seleção adequada de métodos de detecção de mudanças baseados nas características da superfície da área em estudo e é a forma mais comum de definir as áreas de treinamento e validação nos processos de classificação supervisionada.

2.5.3. Detecção de mudanças significativas

Na comparação pós classificação uma forma de estabelecer relações entre padrões e processos, é gerando uma matriz de transições.

A tabulação cruzada, também denominada tabela de contingência, é uma técnica de análise estatística amplamente utilizada, que tem a função de analisar a relação entre duas ou mais variáveis, permitindo interpretar e ler os dados obtidos e, assim, determinar a relação entre duas variáveis qualitativas ou entre uma variável qualitativa e outra quantitativa (LÓPEZ-ROLDÁN, 2015).

Esta análise contempla a comparação pós-classificação por (1) tabulação cruzada⁵ e (2) interpretação de mudanças significativas. A análise das mudanças no uso da terra desenvolvida por Pontius et al. (2004) permite obter, para cada categoria de uso da terra, os ganhos e perdas, a mudança líquida e as mudanças entre dois momentos temporários. Da mesma forma, permite avaliar a mudança total, tomando como referência a persistência ou estabilidade e, assim, avaliar quais foram as transições sistemáticas mais significativas entre as categorias. O predomínio da

⁵ A tabulação cruzada, também denominada tabela de contingência, é uma técnica de análise estatística amplamente utilizada, que tem a função de analisar a relação entre duas ou mais variáveis, permitindo interpretar e ler os dados obtidos e, assim, determinar a relação entre duas variáveis qualitativas ou entre uma variável qualitativa e quantitativa (López-Roldán, 2015).

estabilidade é a situação mais comum encontrada na análise de mudanças.

A partir dessa abordagem, três novos valores são adicionados às porcentagens de superfície das classes de ocupação do solo presentes na matriz de transição, obtida a partir da tabulação cruzada: (1) o esperado, (2) a diferença entre o valor observado menos o esperado, que mostra a proporção da transição segundo a mudança total, sendo geralmente maior nas classes de maior superfície; e (3) o quociente obtido dividindo o primeiro valor pelo segundo, que mostra a força da transição. Os dois últimos valores são a base do teste do qui-quadrado e oferecem informações críticas suficientes para determinar qual transição é significativa.

A matriz de transição é analisada considerando dois pontos de vista: os ganhos e as perdas, pelo que as transições significativas serão aquelas que apresentarem maiores valores de diferença e quociente entre os valores observados e os esperados; no entanto, a experiência do pesquisador e seu conhecimento da área de estudo são importantes para estabelecer o limiar de seleção de mudanças significativas, em comparação com aquelas que são devidas a erros ou a naturezas aleatorias.

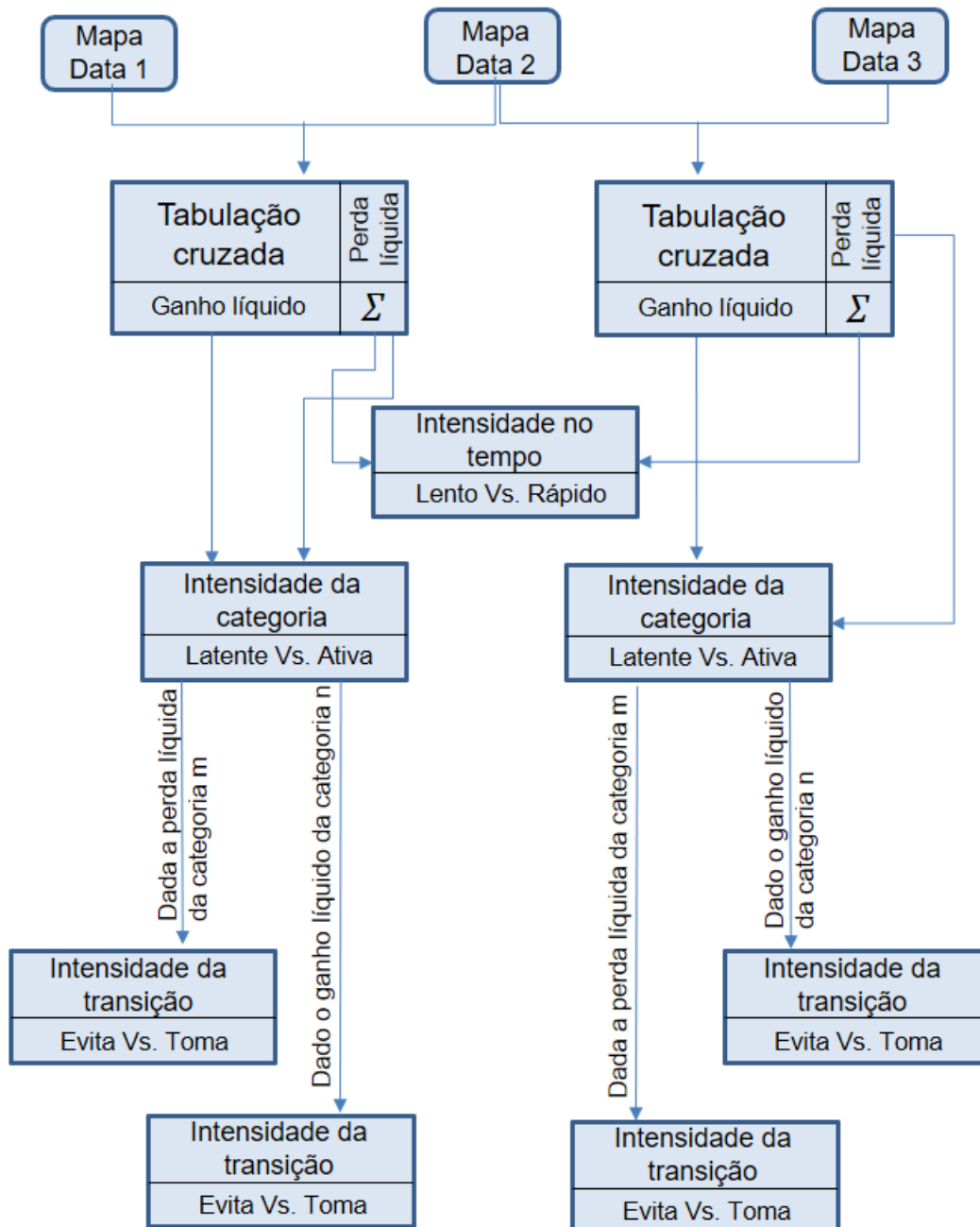
Mas no caso de uma Série temporal com vários intervalos de tempo, a análise de intensidade proposta por Aldwaik e Pontius (2012) e adaptando a metodologia de Pontius et al. (2004), fornece mais informações às possíveis razões para explicar por que as transições variam ao longo do tempo e espaço. Este método quantitativo é utilizado para analisar mapas de classes de uso e cobertura a partir de vários pontos no tempo em um lugar, considerando matrizes de tabulação cruzada, onde uma matriz resume a alteração em cada intervalo de tempo. Neste caso, são considerados três níveis de análise, que vão do geral ao específico:

1. O nível do intervalo avalia como o tamanho e a velocidade da mudança variam ao longo dos intervalos de tempo preestabelecidos.
2. O nível de categoria avalia como o tamanho e a intensidade das perdas e ganhos totais em cada categoria variam entre categorias para cada intervalo de tempo.
3. O nível de transição examina como o tamanho e a intensidade das transições de cada uma das classes variam entre as outras classes disponíveis para essa transição.

A Figura 2, mostra o fluxo metodológico com os três níveis de análise. Essa abordagem permite identificar mudanças sistemáticas independentes de

qualquer nível de persistência. Se os padrões de mudança derivados da análise dentro de um intervalo de tempo persistirem nos seguintes intervalos de tempo, o processo de mudança é estacionário (Aldwaik e Pontius, 2012).

Figura 2 - Análise de intensidade da dinâmica de mudanças a nível crescente de detalhe.



Fonte: adaptada de Aldwaik y Pontius (2012).

Com as classificações de uso e cobertura correspondentes aos intervalos de tempo definidos no estudo, o proceso começa com as matrizes de mudança de

cada intervalo de tempo, geradas a partir da validação cruzada, que possuem uma estrutura de entrada dupla, em que as linhas exibem os valores das categorias da data mais antiga (T0) e as colunas da data mais recente (T1). A diagonal principal mostra a quantidade total da paisagem que permaneceu estável entre uma data e outra, enquanto fora da diagonal estão as superfícies que sofreram uma mudança em direção a outro tipo de categoria. A partir da matriz de mudanças, é criada a matriz de transições, onde são estimadas a mudança total, a mudança líquida, o ganho, a perda e o intercâmbio entre categorias de uso, que são os intercâmbios entre as classes (Figura 3).

Figura 3 - Matriz de transição que mostra a estimação do Intercambio (Int), mudança total (Mt), mudança líquida (Mn), ganho (Gij), perda (Pdi) entre as classes (Ci), da data 1 até a data 2.

		Data 1				Soma total data 1 (P _{i+})	Perda (P _{di})	Mudança total (Mt)	Mudança líquida (Mn)	Intercambio (Int)
		Cl 1 _(i)	Cl 2	Cl 3	Cl j					
Data 2	Cl 1 _(i)	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P _{1j}	P ₁₊	P ₁₊ - P ₁₁	=P ₁ + G ₁	= Mt ₁ - Int ₁	=2*min(P,G)
	Cl 2	P ₂₁	P ₂₂	P ₂₃	P _{2j}	P ₂₊	P ₂₊ - P ₂₂	=P ₂ + G ₂	= Mt ₂ - Int ₂	
	Cl 3	P ₃₁	P ₃₂	P ₃₃	P _{3j}	P ₃₊	P ₃₊ - P ₃₃	=P ₃ + G ₃	= Mt ₃ - Int ₃	
	Cl i	P _{i1}	P _{i2}	P _{i3}	P _{ij}	P _{i+}	P _{i+} - P _{ij}	=P _{i+} + G _{ij}	= Mt _{i,j} - Int _{i,j}	
	Soma total data 2 (P _{+j})	P ₊₁	P ₊₂	P ₊₃	P _{+j}	1				
	Ganho (G _j)	P ₊₁ - P ₁₁	P ₊₂ - P ₂₂	P ₊₃ - P ₃₃						

Fonte: adaptada de Pontius et al. (2004).

O intercâmbio é o processo no qual a perda de uma determinada classe em um lugar é acompanhada por seu ganho simultâneo em outro lugar. O intercâmbio entre classes (Int) é calculada como duas vezes o valor mínimo dos ganhos e perdas.

$$\text{Int} = 2 \times \text{MIN} (P_{i+} - P_{ij}, P_{+j} - P_{ij})$$

(10)

Por outro lado, o ganho (G_j) é estimado, como a diferença da área total da

classe j na data 2 (P_{+j}) e a persistência ou estabilidade expressa na diagonal da matriz (P_{jj}).

$$G_j = (P_{+j}) - (P_{jj}) \quad (11)$$

A perda (L_{ij}) é a diferença entre a área total de uma classe i na data 1 (P_{+i}) e a persistência.

$$(P_{+i}), L_{ij} = (P_{+i}) - (P_{jj}) \quad (12)$$

Para calcular a mudança total no nível de classe (C_t), pode ser feita a soma da mudança líquida e o intercâmbio, ou a soma dos ganhos (G_j) e das perdas.

A intensidade da mudança uniforme, é definida como uma mudança uniformemente distribuída ao nível de intervalo, categoria ou nível de transição, que serve como referência para comparar a mudança observada nos mesmos níveis hierárquicos.

O primeiro nível da análise estima a intensidade da mudança no nível do intervalo de tempo entre a data 1 e a data 2. Essa estimativa permite saber como a taxa de mudança anual varia entre os intervalos de tempo e pode ser rápida ou lenta.

Após calcular a intensidade da mudança anual para cada intervalo de tempo (equação 13), são comparadas as taxas observadas com relação a uma taxa uniforme que existiria se as mudanças anuais fossem distribuídas uniformemente ao longo do período de tempo (equação 14).

$$S_t = \frac{\text{área de mudança durante o intervalo } [Y_t, Y_t + 1] / \text{área de estudo}}{\text{duração do intervalo } [Y_t, Y_t + 1]} \times 100 \quad (13)$$

$$U = \frac{\text{área de mudança durante todos os intervalos} / \text{área de estudo}}{\text{duração de todos os intervalos}} \times 100 \quad (14)$$

No nível de categoria, estima-se como os ganhos e perdas mudam com relação à área da classe, considerando respectivamente sua área no início e no final

do período (equações 15 e 16). Também é comparada a intensidade da mudança anual observada no nível das classes com a correspondente intensidade uniforme de mudança anual que ocorreria se a mudança durante cada intervalo fosse atribuída uniformemente na área em estudo.

$$G_{\tau j} = \frac{\text{área de ganho neto da classe } j \text{ durante } [Y_{\tau}, Y_{\tau} + 1] / \text{duração de } [Y_{\tau}, Y_{\tau} + 1]}{\text{área da classe } j \text{ ao tempo } Y_{\tau} + 1} \times 100 \quad (15)$$

$$L_{\tau i} = \frac{\text{área de perda neta da classe } i \text{ durante } [Y_{\tau}, Y_{\tau} + 1] / \text{duração de } [Y_{\tau}, Y_{\tau} + 1]}{\text{área da classe } i \text{ ao tempo } Y_{\tau} + 1} \times 100 \quad (16)$$

Portanto, se a intensidade da mudança da classe for maior que a mudança uniforme, a categoria considera-se ativa durante o intervalo. Pelo contrário, se a intensidade da mudança for menor, a categoria considera-se latente.

A equação (15) fornece a intensidade uniforme para o intervalo de tempo t no nível da categoria; portanto, a equação (16) vincula a análise no nível do intervalo à análise no nível da classe.

Finalmente, a análise no nível da transição entre classes, avalia como a superfície da transição varia dentro do intervalo de tempo em relação à superfície das classes disponíveis para sua ocorrência, levando em consideração o tamanho de todas as categorias que compõem a paisagem.

Para definir a análise de intensidade neste nível, é útil considerar a transição de uma classe específica m para outra categoria diferente n , que seria a categoria alvo. O primeiro que deve ser definido é o padrão de transição de ganho da categoria n , considerando que se a categoria n existe no momento inicial, não pode ganhar em esse lugar, só pode ganhar em aqueles lugares que inicialmente não são categoria n . Se a categoria n ganha de forma uniforme ao longo da paisagem, ganhará de outras categorias na proporção da área inicial das categorias.

A equação 17 calcula a intensidade da mudança no nível de transição de cada categoria para a categoria n , onde n , produzindo $J - 1$ valores de intensidades para cada intervalo de tempo. A equação 18 calcula a intensidade uniforme para a categoria n , que define a intensidade da transição anual para a categoria n ,

assumindo que a categoria n ganha de forma uniforme ao longo da paisagem.

$$R_{tin} = \frac{\text{área de transição de } i \text{ para } n \text{ durante } [Y_t, Y_t + 1] / \text{duração de } [Y_t, Y_t + 1]}{\text{área da classe } i \text{ ao tempo } Y_t} \times 100 \quad (17)$$

$$W_{tn} = \frac{\text{área de ganho neto da classe } n \text{ durante } [Y_t, Y_t + 1] / \text{duração de } [Y_t, Y_t + 1]}{\text{área não pertencente à classe } n \text{ ao tempo } Y_t} \times 100 \quad (18)$$

Agora considere a perda da categoria m . As equações 19 e 20 identificam as categorias que evitam intensivamente *versus* aquelas que avançam para transição. A equação 19 estima a intensidade observada na transição da categoria m para cada categoria j , onde $j \neq m$ e gera a intensidade $J - 1$ para cada categoria diferente de um intervalo de tempo.

A equação 20 calcula para a categoria m com intensidade uniforme a transição anual da categoria m com relação às outras categorias ao final do tempo de cada intervalo. Esta intensidade uniforme mostra como a categoria perde para outras categorias, onde todas as categorias diferentes de m ganham da categoria m na proporção e no tamanho daquelas no final de cada intervalo de tempo.

$$Q_{tmj} = \frac{\text{área de transição de } m \text{ para } j \text{ durante } [Y_t, Y_t + 1] / \text{duração de } [Y_t, Y_t + 1]}{\text{área da classe } j \text{ ao tempo } Y_t + 1} \times 100 \quad (19)$$

$$V_{tm} = \frac{\text{área de ganho neto da classe } n \text{ durante } [Y_t, Y_t + 1] / \text{duração de } [Y_t, Y_t + 1]}{\text{área não pertencente à classe } m \text{ ao tempo } Y_t + 1} \times 100 \quad (20)$$

Para facilitar o cálculo das equações descritas acima, além dos calculos ao nível de transicao entre classes, foi utilizada o recurso online publicado por Aldwaik e Pontius (2012) no site: [[https:// sites.google.com/site/intensityanalysis/home](https://sites.google.com/site/intensityanalysis/home)].

2.5.4 Detecção de mudanças com dados SAR

As regiões localizadas na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) são

altamente afetadas pela sazonalidade e cobertura de nuvens todo o ano, o que dificulta a análise de uso e cobertura da terra em séries temporais utilizando imagens obtidas com sensor passivo (BRAUN e HOCHSCHILD, 2017).

Para superar a dependência a condições atmosféricas favoráveis, estão sendo utilizados os satélites com Radar de Abertura Sintética (SAR), que operam em comprimentos de onda que podem penetrar a cobertura de nuvens, que têm provado serem efetivos na classificação de uso e cobertura da terra, utilizando o retroespalhamento como chave de interpretação (BRAUN e HOCHSCHILD, 2017).

Assim como na classificação de dados óticos é requerido um conhecimento detalhado a priori da área de estudo; o processamento de dados SAR oferece um alto grau de controle ao usuário. Outros fatores são considerados para incrementar a qualidade da classificação, principalmente parâmetros interferométricos como coerência, assim como informação de textura com valores de intensidade a níveis diferentes. Conhecimento aprofundado do retroespalhamento das superfícies e decomposições em diferentes mecanismos de espalhamento, incrementam a qualidade da análise de uso e cobertura (BRAUN e HOCHSCHILD, 2017).

Nos casos de áreas com forte dinâmica estacional, as imagens devem ser selecionadas com cuidado, de preferência na estação seca, já que o retroespalhamento do SAR varia fortemente com as mudanças de umidade do solo, causando assinaturas enganosas durante a estação chuvosa, tais como valores de retroespalhamento elevados em solos pouco rugosos ou sem cobertura vegetal. A dinâmica da vegetação, de forma geral, é reduzida durante a estação seca, o qual incrementa comparação interanual das imagens apesar das diferenças temporais. As imagens óticas são utilizadas adicionalmente como dado referencial para comparar os resultados obtidos com SAR, cujas datas devem ser de preferência à mesma ou à mais próxima possível (BRAUN e HOCHSCHILD, 2017).

A utilização de imagens SAR em um contexto multitemporal para monitorar mudanças de uso e cobertura da terra, requer particular atenção às características de aquisição da imagem e propagação do sinal, assim como de calibração precisa e um manejo robusto do ruído *speckle*. O ruído *speckle* é um dos principais fatores que degradam a qualidade das imagens SAR. O *speckle* é um ruído multiplicativo que é proporcional a intensidade do sinal recebido. O efeito visual deste ruído proporciona uma textura granulosa que pode dificultar a

interpretação das imagens de radar, reduzindo a separabilidade entre classes de uso do solo, tipos litológicos, etc. (JENSEN, 2009).

Todas as imagens de radar contêm ruído, aqueles que são originados pelo sinal refletido da superfície, que podem ser divididos em dois grupos: (i) aqueles na medição transformados em ruído nos dados SAR que podem ser determinados utilizando a relação sinal ruído; (ii) tipo *speckle*, o qual é causado pela interferência entre as ondas eletromagnéticas devido a existência de um grande número de corpos refletivos dentro dos píxeis em uma imagem SAR. Para extrair dados de boa qualidade de imagens SAR é fundamental remover o ruído (HONG e KIM, 2016).

Antes da detecção de mudanças é importante abordar questões tais como diversidade dos ruídos *speckle* e o coeficiente de retroespalhamento. Durante o pré-processamento das imagens de diferentes períodos, devem ser co-registrados para remover o ruído *speckle* e normalizar as duas imagens. O sistema SAR processa coerentemente os sinais de transmissão e recepção de pulsos, portanto os retornos contêm sinais inerentes ao ruído *speckle*, tornando difícil essa análise. O uso do método multi-look, por exemplo, divide as seções da imagem em múltiplas seções para minimizar a influência do *speckle* (HONG e KIM, 2016).

Além disso, a intensidade do sinal ou brilho do sinal de retorno, pode variar significativamente dependendo da órbita, tempo, altitude ou direção do satélite que captura as imagens. A típica abordagem para detecção de mudanças, utiliza a informação de amplitude das imagens SAR. Neste método as imagens são comparadas principalmente por normalização dos níveis de cinza das imagens, estes últimos são determinados pelas propriedades estruturais ou genéticas. Assim, se a proporção de relativa intensidade entre as imagens é utilizada, os valores de limiares encontrados são importantes para identificar a mudança. O valor do limiar pode ser determinado dependendo do tipo de resolução e características do sensor ou ser subjetivamente baseado no requerimento do analista (HONG e KIM, 2016).

O método utilizando o log-ratio pode reduzir o erro devido ao ruído *speckle*. Além disso, como o método define a distribuição das imagens só com mudanças relativas entre duas imagens, é adequado para análise de imagens SAR. Esta técnica log-ratio pode analisar eficientemente a disparidade da mudança quando definir o valor crítico adequado para análise de distribuição estatística (HONG e KIM, 2016).

Enquanto as metodologias desenvolvidas para análise de dados óticos não são aplicáveis em SAR, devido a possibilidade de gerar classificações erradas ou píxeis isolados decorrentes do efeito *speckle*; existem outros métodos de classificação mais adequados, para a distribuição de dados das imagens de radar, tais como o classificador *Random Forest*, baseado no conceito de classificação e árvores de decisão utilizando repetidamente subconjuntos aleatórios dos dados de treinamento para modelar as classes de interesse (BRAUN e HOCHSCHILD, 2017).

Os sensores de radar de abertura sintética (SAR) têm a capacidade de imagear sub-superfícies em regiões áridas. Estes sensores ativos produzem imagens sensíveis à superfície topográfica, rugosidade e conteúdo de água no solo. Em solos muito secos o SAR é capaz de penetrar metros em materiais de baixa capacidade elétrica, isto foi mostrado com a banda L (1.25 GHz) em áreas com conteúdo de areia (PAILLOU, 2017).

Recentes estudos mostraram que a combinação de dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com imagens SAR, resulta na melhora da observação de sub-superfícies que ainda apresentem uma forma topográfica, tais como paleodrenagem (FARR et al., 1986; PAILLOU, 2017). É importante destacar que a presença de grandes dunas de areia impede observar alguma feição localizada embaixo das dunas. A banda L (1.25 GHz) pode penetrar 1-2 m na areia seca, já a banda P (435 MHz) pode penetrar mais de 5 m. A baixa frequência do radar é menos sensível à cobertura de areia na superfície, revelando feições na sub-superfície pela alta profundidade de penetração (PAILLOU, 2017).

Farr et al. (1986) e Schaber et al. (1986) determinaram com medições em campo que feições na sub-superfície podem ser visíveis em imagens de radar na banda L, num intervalo de 0,7 até 1,7 m de profundidade, embora a umidade do solo fosse muito maior do que as encontradas em regiões hiper-áridas do mundo.

Waske e Braun (2009) revelam em seu estudo que algumas áreas urbanas e de floresta são difíceis de separar na série temporal de retroespalhamento, mas que as feições de textura foram úteis na banda C disponível.

Conforme aumenta o comprimento de onda, a banda do radar tem maior penetração, porém aumenta o retroespalhamento da sub-superfície até em trinta vezes mais do que o retroespalhamento superficial (PAILLOU, 2017).

Grandjean et al. (2001) experimentaram com análise polarimétrico de banda L em um sistema de duna, composta por material arenoso de baixa perda que

permite a alta penetração do sinal. Nas polarizações HH e HV a duna apresentou um sinal de baixo retroespalhamento, pela superfície suavizada; mas na polarização HV mostrou algumas estruturas sub-superficiais, com dados sobre volume e espalhamento, indicando a penetração da banda L, enquanto a polarização HH mostra componentes da superfície.

Schaber et al. (1986) destacam o poder da análise de dados com polarização cruzada HV, no mapeamento geológico de materiais arenosos.

Existem várias abordagens na detecção de mudanças com imagens SAR. Uma forma padrão é o índice bi temporal de imagens de intensidade ou amplitude, o qual é preferido à subtração de imagens (RIGNOT & VAN ZYL, 1993). Outros métodos incorporam informação textural e/ou informação espectral de um ou múltiplos canais de polarização, ou segmentação. A coerência interferométrica pode ser utilizada como medida de detecção de mudanças (PANTZE et al., 2014).

Para o caso de monitoramento em uma série temporal existem vários métodos de detecção de mudanças: utilizando o retroespalhamento dos alvos e as correlações entre eles (BRUZZONE e BOVOLO, 2012); utilizando as diferenças na amplitude e a fase (SCHEUCL et al., 2009); análise de detecção log-ratio que determina a proporção das mudanças a partir da comparação de imagens, eventualmente detectando mudanças utilizando métodos estatísticos, requerendo a seleção de limiares que identifiquem as áreas com e sem mudanças (BOVOLO et al., 2013; HONG e KIM, 2016). A abordagem com procedimentos automáticos de detecção de limiares em imagens resultado do método log-ratio é amplamente utilizados na imagem de detecção de mudanças SAR (XIONG et al., 2012).

Bruzzone (2014) recomenda trabalhar com dados de amplitude, já que o uso de dados de intensidade pode gerar identificação errada de mudanças devido ao alto contraste do retroespalhamento, já que conduz a um erro maior nas mudanças apresentadas nas regiões de alta intensidade do que nas regiões de baixa intensidade, em outras palavras, as mudanças são detectadas de forma diferente em regiões escuras e brilhantes. Foumeles (2015) utilizou a amplitude como parâmetro para a estimação da proporção de mudança, tendo uma variância independente dos valores absolutos da média do retroespalhamento.

As melhores opções de filtragem dependem do propósito da detecção de mudanças e do estado dos dados disponíveis. Caso seja requerido delinear com detalhe as mudanças, deveria ser aplicado a menor pré-filtragem para evitar reduzir

a precisão da detecção das mudanças. O excesso de suavidade pode incrementar falsas porcentagens de falsos alarmes tais como falsos positivos ou píxeis classificados erroneamente. No caso dos efeitos dos filtros na delimitação na detecção de mudanças com duas polarizações, alguns falsos positivos são píxeis incorretamente classificados como uma classe quando são comparados com algum mapa de mudança referência. A maioria dos erros como consequência de delineado imperfeito, está relacionado a problemas no co-registro, *layover*, *shadowing* e/ou efeitos de borda nos alvos (PANTZE et al., 2014).

2.5.5 Considerações sobre multisensor e multiescala

A aplicação de dados multisensor tem a potencialidade de detectar mudanças de uso e cobertura a uma precisão maior, através da integração de diferentes características dos dados; mas a desvantagem está na dificuldade de processamento das imagens e seleção da técnica adequada para detecção de mudanças. Na prática, compilar dados de um mesmo sensor para uma série temporal pode ser difícil, especialmente nas regiões tropicais pelo efeito das nuvens. Na aplicação de detecção de mudanças para um período longo de tempo, tem que ser utilizado dados de diferentes sensores, porque dados de um único sensor podem não estar disponíveis. Por exemplo, o programa Landsat é o sistema de satélite de observação da terra mais antigo, adquirindo dados de 1972, cada satélite tem utilizado sistemas de sensores diferentes, dados do sensor MSS a partir do ano 1972 até 1982, sensor TM desde 1983 até 2011, ETM+ desde 1999 até 2003, OLI desde 2012 até atualidade.

Este exemplo se aplica para os diversos sensores óticos, que têm sido lançados nos últimos anos, com diferentes melhoras de acordo com o objetivo específico de desenho e funcionamento, orbitando a terra e adquirindo imagens. Construir uma série temporal é sem dúvida um desafio na seleção dos dados disponíveis, devido à dificuldade em escolher imagens de sensores de satélites diferentes.

Na detecção de mudanças, discute-se identificar os requerimentos, a seleção de uma unidade de análise apropriada e método de comparação baseado na escala e objetivos temáticos. A unidade de análise deve ser selecionada baseada na sua representação na escala de aplicação com relação à resolução da imagem

disponível e deve estar ligada à aplicação dos objetivos temáticos (TEWKESBURY, 2015).

Os fluxos de trabalho na detecção de mudanças não são transferíveis entre as unidades de análise, independentemente da sua concepção inicial, porém a seleção da técnica considera os méritos de cada metodologia de comparação e unidade de análise (TEWKESBURY, 2015).

Uma aplicação de detecção de mudanças sempre começa com objetivos temáticos e de escala, os quais podem ser resumidos em tipos de mudança e escala espacial, que devem ser identificados e representados. Estes objetivos informam a seleção da unidade de análise e o método de comparação, também utilizados na seleção adequada da imagem e na identificação das feições da classificação requeridas para satisfazer os objetivos temáticos. A comparação de feições é comumente identificada por conhecimento *expert*, entendendo as mudanças antecipadas. A escala de aplicação com relação à resolução das imagens disponíveis contribui para a seleção apropriada da unidade de análise. Unidades como pixel são frequentemente utilizadas como unidade de análise para escalas médias baseadas em imagens de média resolução (TEWKESBURY, 2015).

As características da classificação requeridas para realizar uma comparação de mudanças significativas são fundamentais quando se seleciona a unidade de análise, que pode ser baseada na escala de aplicação das imagens disponíveis. Os objetivos temáticos da aplicação devem ser cuidadosamente considerados quando é avaliado o método comparativo. Consequentemente, é importante distinguir entre dois resultados amplos da análise de mudança: mudanças radiométricas e mudanças semânticas. As primeiras referidas à mudança espectral da imagem, observada nas diferenças de tonalidade da imagem, que incluem mudanças na superfície e aquelas associadas com iluminação, fenologia e geometria de visada. As mudanças semânticas são aquelas subdivididas em categorias significantes, tais como diferenças de sombra na cena ou transições específicas de uso e cobertura. Na detecção de mudanças é importante detectar os tipos de mudança em ordem, removendo efetivamente o ruído e isolando os alvos de interesse (TEWKESBURY, 2015).

Valdez (2012) discute sobre a relação entre escala e resolução espacial das imagens e a capacidade das imagens de satélite para gerar produtos cartográficos e topográficos a várias escalas. Desde o ponto de vista cartográfico

considera-se a unidade mínima de mapeamento um valor equivalente a 1/4 da escala, mas em uma imagem de satélite isso pode corresponder ao valor de um pixel. Neste sentido, seriam necessários no mínimo 2 píxeis para poder discriminar um contexto e interpretar sobre a imagem.

2.6 Ambientes eólicos: campo de dunas

As planícies costeiras, do ponto de vista geomorfológico, são superfícies deposicionais de baixo gradiente, formadas por sedimentação predominantemente subaquosa que flanqueiam corpos de água, tais como mares e oceanos, representadas em termos geológicos, como faixas de terreno de idade quaternária, emersos e constituídos por sedimentos marinhos, continentais, fluviomarinhas, lagunais, paludiais, entre outros (SUGUIO, 2003).

A disponibilidade de sedimentos é um fator fundamental no desenvolvimento das planícies costeiras, formando sedimentos holocênicos, contendo largas faixas de praias, campos de dunas com diferentes gerações, manguezais, linhas de falésias, planícies lacustres e áreas de acumulação inundáveis, feições que foram e continuam sendo modeladas pela ação de fatores como vento, marés, correntes e ondas (CLAUDINO-SALES, 2005; SOUZA, 2005; FONTES, 2011).

Na dinâmica costeira atuam uma série de componentes morfológicos, morfogenéticos, assim como processos erosivos, que estão relacionados aos fluxos de matéria e energia que se manifestam na planície costeira, que também permitem compreender e qualificar os processos que ocorrem entre os componentes morfológicos da planície costeira, mostrando as respectivas relações de interdependência. Processos energéticos desempenhados pela ação das ondas, marés e velocidade dos ventos, associados com a disponibilidade de areia, formas do relevo no litoral, impacto das intervenções humanas refletidas no uso e ocupação da planície costeira, são elementos que afetam as unidades geoambientais e modificam os fluxos de energia (MEIRELES, 2016).

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 proglaciais, zonas distais de leques aluviais e lagoas efêmeras em zonas semiáridas. Nestes casos os processos eólicos estão limitados a

remobilizações gerando formas tais como dunas.

Os processos de denudação atuam sobre a fração fina dos materiais não consolidados, enquanto a fração de materiais consolidados e detrítico grosso sofrem a ação abrasiva. Nestas condições, o vento ocasiona erosão por deflação, que se refere ao resultado da mobilização e transporte do material solto disposto na superfície; se tem excesso de material fino, são modeladas depressões por sobre-excavação.

As chamadas bacias de deflação são comuns em zonas áridas e semiáridas, são depressões fechadas, com formas arredondadas, elípticas e com as bordas arredondadas. Nos sistemas de drenagem antigos desenvolvidos em áreas de baixo relevo e o bloqueio de canais por dunas, podem se formar bacias de deflação (PEDRAZA, 1996; GUTIERREZ, 2001).

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 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).

Outras acumulações eólicas de menor tamanho, produto de processos tais como saltação, reptação e suspensão são os *ripples*, que correspondem à resposta inicial das superfícies arenosas ao transporte pelo vento. Estas formas se orientam perpendicularmente à direção do vento e movimentam-se mais rapidamente que as dunas. Alguns *ripples* possuem cristas agudas enquanto outras cristas arredondadas, o comprimento de onda pode variar entre centímetros e dezenas de metros enquanto a altura pode ir de 1 até 30 centímetros (PEDRAZA,

1996; GUTIERREZ, 2001).

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

O termo *erg* “mar de areia”, se refere a uma grande superfície coberta de areia que possui no mínimo uma área de 125 km². O desenvolvimento dos *ergs* requer três elementos fundamentais: grandes fontes de areia, condições climáticas e topográficas adequadas, suficiente energia do vento (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, 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:

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

B) Dunas barcanas: se refere a dunas isoladas em forma de meia lua desenvolvidas em corredores de transporte de areias com relação às áreas de deposição. As dunas de menor tamanho se deslocam mais rapidamente do que as de maior tamanho. A área de barlavento é

convexa, com declividade próxima a 12° enquanto a declividade do sotavento é de 33 a 34° (PYE E TSOAR, 2009), 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.

C) Dunas barcanóide: conforme aumentam as quantidades de areia, as dunas barcanas unem-se lateralmente formando cordões barcanóides. Estas dunas são caracterizadas por possuir um cordão principal que pode ter entre 20 e 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 barlavento e sedimentação na área de sotavento (FRYBERGER e GOUDIE, 1981). A alternância de formas com cristas convexas e um fornecimento de areia mais limitado pode transformar dunas transversais em dunas barcanóides e até barcanas com movimentos de até 50 m por ano (PEDRAZA, 1996).

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. 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.

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.

Existem outras feições de deposição associadas às dunas, chamadas de eolianitos, que ocorrem amplamente na linha de costa em áreas áridas e semiáridas do mundo, particularmente áreas costeiras, onde o fornecimento de sedimentos siliciclásticos são restritos e as taxas de produção de carbonato biogênico são altas (PYE e TSOAR, 2009). Os eolianitos são dunas arenosas cimentadas por carbonato de cálcio, que têm sido formadas como resultados dos processos de erosão, transporte e deposição do vento (GOUDIE, 2004). Os eolianitos constituem um tipo

distinto de paleoduna que apresenta características particulares, como preservação de estratificações planares de alto ângulo e ausência de vegetação (VALENÇA et al., 2005).

Ao longo da linha de costa os eolianitos frequentemente formam corpos alongados dispostos de forma paralela ou oblíqua, depositados como cristas transversais. O tamanho do material é tipicamente silte ao tamanho da areia. Os eolianitos têm estratificação particular como planar e laminar, sendo mais comuns as estratificações plano-paralelas, cruzadas tangenciais e estratos truncados por superfícies erosivas e cíclicas, gerando formas em ziguezague, com segmentos de vertentes íngremes e cristas bastante irregulares (CARVALHO et al., 2008; GOUDIE, 2004; CLAUDINO-SALES, 2002).

Os eolianitos apresentam além da estratificação, um variado grau de litificação - entre friáveis a fortemente litificados, com formas de relevo ruiforme, produzidas por abrasão eólica (erosão gerada pelo vento), caracterizados pela presença de sulcos orientados na direção do vento principal. Frequentemente, estão presentes raízes litificadas, que mostram o processo de substituição parcial da matéria orgânica por carbonato de cálcio, indicando terem sido as dunas fixadas por vegetação costeira antes de sofrerem o processo de cimentação (CARVALHO et al.; 2008; CLAUDINO-SALES, PEULVAST, J.P., 2002).

Outra feição encontrada na área de estudo, ocorrem ao longo do litoral cearense e estão posicionadas preferencialmente na desembocadura dos estuários; refere-se às rochas de praia ou *beach rock*, que resultam da litificação de sedimentos não consolidados, cimentados por carbonato de cálcio, na zona de praias tropicais e subtropicais. Todos os tipos de sedimentos de praia podem ser cimentados, isto explica as grandes variações de textura e grau de litificação (HOPLEY, 2011).

As rochas de praia, com fácies relacionadas à zona intermaré, cimentadas por carbonato de cálcio, mostraram-se indicadoras de flutuações do nível do mar. Além disso, são geomorfológicamente importantes na preservação da linha de costa, já que atuam como uma defesa natural das praias (GOUDIE, 2004; HOPLEY, 2011).

A relação das dunas com as mudanças climáticas, foi mencionada por Lancaster (1995) quando afirma que as dunas têm se desenvolvido em períodos de 1000 a 100.000 anos. Neste período de tempo têm sido produzidas expansões e reduções nas regiões polares, acontecimentos que afetaram sensivelmente as áreas

de latitude baixa na forma de mudanças climáticas e do nível do mar. As manifestações destas alterações se encontram na variação dos limites dos grandes desertos de areia, nas modificações nas fontes de partículas de areia e na mobilidade das dunas. Ao longo do Quaternário se constata a existência de períodos secos, que mostram importantes variações na intensidade da atividade eólica. Lancaster (1995) menciona que os campos de dunas ativos e inativos proporcionam dados importantes sobre sua extensão, duração e distribuição nos períodos de marcada aridez, assim como as mudanças nas direções do vento e sistemas de circulação atmosférica ao longo do tempo.

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 a precipitação é fraca, a vegetação cresce nas partes baixas da duna e na parte superior mobiliza a areia a sotavento. Quando aumenta a precipitação, a vegetação começa a cobrir algumas áreas da duna, com exceção da crista, e pode começar se produzir calcificação nas áreas de acumulação. Quando os períodos de precipitação são importantes e prolongados, o nível freático sobe e aflora nas partes baixas gerando lagoas interdunares, 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 em 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 a estabilizar-se.

Nas dunas ativas, o transporte e sedimentação se manifesta por superfícies com *ripples no barlavento* e áreas mais inclinadas na área de sotavento.

2.7 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. A sustentabilidade abrange várias dimensões: política, social, técnico-econômica e ambiental, sendo que o setor energético está vinculado a todas estas dimensões, pois elas geram impactos positivos ou negativos.

Desde o início dos anos 1990, diversos levantamentos e estudos voltados a identificação de dados de superfície e à 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).

O governo brasileiro, desejando expandir a oferta de energia do país para garantir o crescimento econômico, vem, desde 2001 aperfeiçoando políticas de fomento às fontes renováveis de energia. Estas também são vistas como alternativas à fonte hidrelétrica que representa cerca de 64% na matriz de energia elétrica nacional (ANEEL 2014; SANTOS, 2014).

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 do 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.

2.8 Unidades Geoambientais

A análise geoambiental, como concepção integrativa, pauta-se através de uma análise integrada da paisagem, tendo como método o modelo geossistêmico, sendo o termo unidade de paisagem ou sistema ambiental sinônimos de geossistema (MAGALHÃES E DA SILVA, 2010).

Souza e Carvalho (2009) apontam que o conjunto dos componentes, processos e sistemas de meio físico-geográfico, são expressos através da concepção de unidade geoambiental ou geossistemas.

O Geossistema deriva da Teoria Geral dos Sistemas, sendo que o sistema é um conjunto de elementos interdependentes, cada qual com uma ou mais funções específicas, funcionando de forma interconectada, abertos ou fechados segundo exista ou não troca de energia e matéria com o meio, respectivamente. Os estudos do russo Sotchava e o francês Bertrand mostraram como os geossistemas surgiram como forma de analisar as paisagens geográficas complexas (MAGALHÃES E DA SILVA, 2010).

A planície costeira é um exemplo de geossistema, como menciona Christopherson (2012), adaptando-se à descrição de Christofletti (1999) que mostra o geossistema como complexo essencialmente dinâmico, não necessariamente homogêneo, que resulta da combinação de um potencial ecológico (geomorfologia, clima, hidrografia), uma exploração biológica (vegetação, solo e fauna) e uma ação antrópica.

Como o geossistema está relacionado com a análise geoambiental, neste sentido, a partir da integração dos componentes naturais e elementos dos sistemas antrópico, é possível gerar uma documentação cartográfica síntese, denominada Mapa de Unidades Geoambientais. Os estudos de Souza (2005) e da FUNCEME (2009) apresentam as unidades geoambientais, tendo como base de delimitação a geomorfologia, para sintetizar o conjunto dos componentes geoambientais.

A delimitação das unidades geoambientais como suporte para a análise de mudanças no uso e cobertura, mostra as formas de relevo presentes nas áreas de estudo, que sintetizam um conjunto de elementos, dinâmicas e interações com base na morfogênese e morfodinâmica predominantes.

As formas de terreno e os tipos de vertentes estão fortemente relacionados, cujas formas estão relacionadas com os perfis de curvatura, aspectos considerados por Bigarella (2003) e Valeriano (2003), sendo este último autor quem destaca nove classes distintas para a forma das vertentes, como produto final da associação da curvatura vertical (côncava, retilínea e convexa) e curvatura horizontal (convergente, planar e divergente).

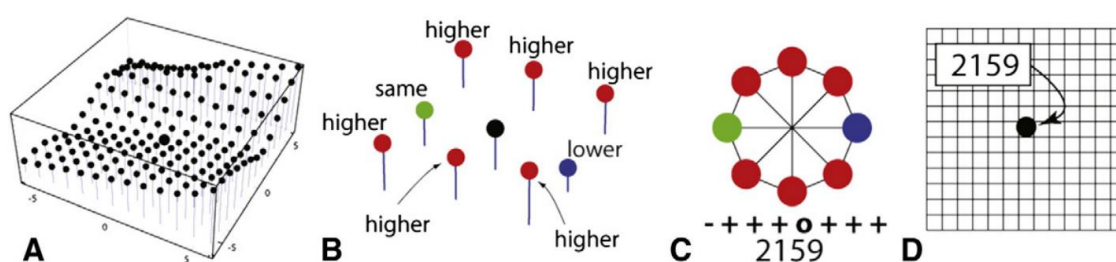
A forma das vertentes como variável morfométrica, já foi considerada e utilizada nos trabalhos de Schmidt & Hewitt (2004), Iwahashi & Pike (2007) que propuseram métodos de classificação de formas de terreno; sendo também utilizada nos *geomorphons*, que são uma metodologia de análise de relevo caracterizada pela avaliação de variáveis morfométricas correlacionadas através de métodos estatísticos em um aplicativo específico. Está baseada no trabalho desenvolvido por Jasiewicz & Stepinski (2013), e aplicada nos trabalhos de Robaina et al. (2016) e Scoti (2017), Silveira et al (2018), Trentin e Robaina (2020) onde os autores determinam diferentes formas de terreno através da utilização de Modelos Digitais de Terreno. Aplicações sobre ambientes litorâneos não foram encontradas.

A classificação de texturas é um tópico de pesquisa ativo no campo da visão computacional, já que a textura da imagem se refere ao arranjo espacial de intensidades de tons de cinza em uma região selecionada de uma imagem. Da mesma forma, os elementos do relevo podem ser considerados como um arranjo espacial de valores de elevação em uma região selecionada de um DEM. En esse contexto aparece o conceito de *Local Ternary Patterns (LTP)* (LIAO, 2010, JASIEWICZ & STEPINSKI, 2013).

Ojala et al. (2002) introduziram os Padrões Binários Locais (*Local Binary Patterns - LBP*) como descritores de textura. O LBP é construído a partir de um vizinhança local 3×3 sobre uma célula central; os 8 vizinhos são rotulados como 0 se o nível de cinza de um vizinho for menor que o nível de cinza de a célula central, ou 1 caso contrário. Padrões Ternários Locais (LTP) estendem o LBP para padrões de 3 valores, permitindo que pequenos níveis de contraste sejam considerados como falta de contraste. Assim, um vizinho é rotulado como 1 se o seu valor exceder o valor da célula central em pelo menos t , onde t é um valor especificado de limite. Um vizinho é rotulado como -1 se seu valor estiver em pelo menos t menor que o valor da célula central. Caso contrário, o vizinho é rotulado como 0 (LIAO, 2010; JASIEWICZ & STEPINSKI, 2013).

A figura 4 ilustra o conceito de aplicação de LTP à classificação de formas de relevo. O painel A mostra uma parte de um DEM na vizinhança do célula central. O painel B mostra apenas os 8 vizinhos imediatos da célula central - eles são rotulados com cores diferentes para indicar se seus valores de elevação são mais altos, mais baixos ou da mesma altitude valor como a célula central. O painel C mostra um padrão ternário derivado de rótulos de vizinhos. Esse padrão pode ser mostrado de três maneiras diferentes. Primeiro, visualmente como um octógono com cada vértice colorido de acordo com a convenção usada no Painel B. (+ = “Superior”, - = “inferior” e 0 = “igual”). o primeiro símbolo no string corresponde ao vizinho leste e os símbolos subsequentes correspondem aos vizinhos em ordem anti-horária. Finalmente, o painel D indica que a célula central foi classificada como geomorphon # 2159.

Figura 4 - Conceito de *Local Ternary Patterns* (LTP) para classificação de elementos de terreno. A) Um DEM com a célula de interesse. (B) Representação ternária de elevações relativas entre a célula de interesse e seus vizinhos. (C) Três formas diferentes de padrão ternário. (D) Atribuição de LTP a uma célula no raster classificada como geomorphon #2159.



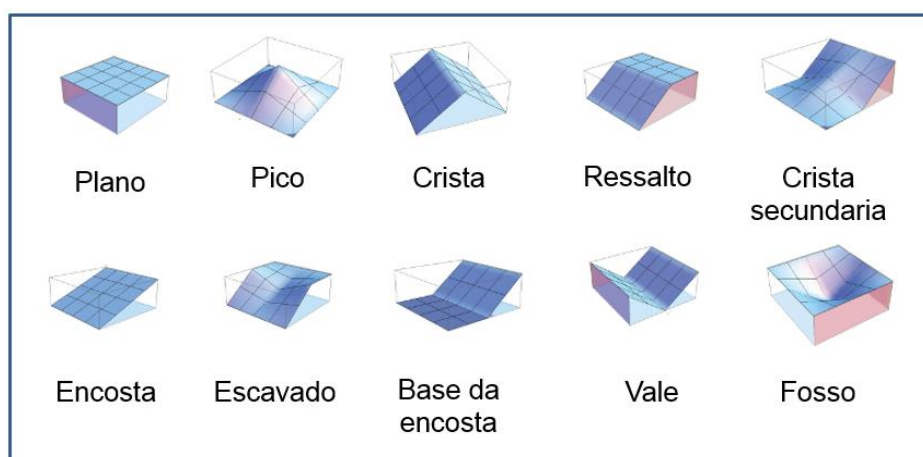
Fonte: Jasiewicz & Stepinski (2013).

Para caracterizar a altura do relevo além da diferença de altura, se faz necessária a distância do ângulo de direção dos pontos vizinhos em relação à célula central (ângulos Zenith e Nadir). Para esse cálculo, são traçados perfis para as principais direções a partir da célula central “*lookup distance*” (L).

A classificação de elementos do relevo utiliza ferramentas de visão computacional ao invés de ferramentas da geometria diferencial. Faz-se uma analogia entre a classificação textural de imagem, com base em um arranjo espacial

de tons de cinza para uma determinada região com arranjo espacial de elevação. Jasiewicz & Stepinski (2013) demonstram como gerar um mapa com os 10 mais comuns elementos de formas de relevo designadamente: áreas planas (*flat*), pico (*peak*), crista (*ridge*), ressaltos (*shoulder*), crista secundária (*spur*), encosta (*slope*), escavado (*hollow*), base de encosta (*footslope*), vales (*valley*), e fosso (*pit*) (Figura 5).

Figura 5 - Morfologias e seus correspondentes geomorphons.



Fonte: modificado de Jasiewicz & Stepinski (2013).

Os *geomorphons* oferecem uma nova perspectiva sobre como abordar a análise quantitativa do terreno. representam uma mudança de paradigma na classificação de um DEM, sendo sustentado por princípios de visão de máquina, em vez de geometria diferencial. Na abordagem de visão de máquina, as formas de relevo são identificadas holisticamente a partir do padrão de um terreno local, aspecto que contribui com a robustez e eficiência de geomorfos (JASIEWICZ & STEPINSKI, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na análise multitemporal em escala média foram utilizadas imagens orbitais imageadas em datas relacionadas a época de seca. Foram selecionadas várias datas de imagens do sensor LANDSAT 5-TM (com 30 metros de resolução espacial), Landsat 7-ETM+ e LANDSAT 8-OLI (com 30 metros de resolução espacial nas bandas multiespectrais e 15 m na banda pancromática) entre os anos 1985 até 2018 (Tabela 13).

As imagens do sensor MSS não foram utilizadas nesta pesquisa, na série temporal para classificação de uso e cobertura da terra, devido a: resolução espectral de largura grosseira, com apenas 4 bandas, que limita as combinações de bandas; a resolução espacial de 80 m que limita a identificação de alvos com superfície inferior a 6400m², possuindo grande mistura espectral; resolução radiométrica de 6 bits, que limita a medição das propriedades dos alvos e a discriminação dos alvos numa classificação de numerosas classes, como foi o caso desta pesquisa, onde foram identificadas 11 classes de uso e cobertura.

As imagens obtidas pelo site da *United States Geological Survey* (USGS), foram solicitadas no produto reflectância de superfície. As imagens disponíveis no catálogo de imagens Landsat no *Google Earth Engine*, são fornecidas pela USGS e foram utilizadas as correspondentes ao produto reflectância de superfície.

Na aplicação de técnicas de radar, foram utilizadas imagens entre os anos 2007 e 2011, em formato CEOS, nível de processamento 1.5 com pré-processamento, dual polarização com 4 *looks* e projeção, do satélite japonês ALOS (*Advanced Land Observing System*), sensor PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*), que opera na frequência da banda L (23 cm), modo fino FBD, (Fine Beam Dual), com ângulos de incidência variando de 8° a 60°, tamanho do pixel de 12,5 metros, polarização HH e VV e uma cobertura de 70 km. Estas imagens encontram-se disponibilizadas no site *Alaska Satellite Facility* ASF Vertex.

Tabela 13 - Imagens disponíveis para área de Aracati e Camocim

	Aracati		Camocim			Aracati		Camocim	
					Anos	Data	Sensor*	Data	Sensor*
1985			19/08/1985	TM					
1986	02/09/1986	TM	06/08/1986	TM	2007	27/08/2007	TM	09/08/2007	TM
1987	04/08/1987	TM				23/08/2007	AP	16/08/2007	AP
1988	07/09/1988	TM			2008	13/08/2008	TM	11/08/2008	TM
1989	09/08/1989	TM	07/08/1989	TM		09/08/2008	QB	2008	Ort
1990	27/07/1990	TM				10/07/2008	AP	03/07/2008	AP
1991	15/08/1991	TM	13/08/1991	TM	2009	16/08/2009	TM	05/08/2009	TM
1992	16/07/1992	TM	23/08/1992	TM		09/01/2009	QB	21/08/2009	AP
1993	04/08/1993	TM	02/08/1993	TM		28/08/2009	AP		
1998			01/09/1998	TM	2010	15/05/2010	TM	29/05/2010	TM
1999	05/08/1999	TM				31/08/2010	AP	24/08/2010	AP
2000	23/08/2000	TM	21/08/2000	TM	2011	06/08/2011	TM	20/09/2011	RE
			30/09/2000	ETM+		03/06/2011	RE		
2001	25/07/2001	TM	16/08/2001	TM	2012	01/09/2012	ETM+	08/09/2012	ETM+
	18/08/2001	ETM+	15/09/2001	ETM+		06/06/2012	RE	08/09/2012	RE
2002	05/08/2002	ETM+	17/08/2002	ETM+	2013	21/08/2013	RE	25/08/2013	OLI
	08/09/2002	QB						16/08/2014	RE
2003	08/09/2002	TM	14/08/2003	TM	2014	21/08/2013	OLI	12/08/2014	OLI
			03/04/2003	QB		08/08/2014	RE	14/10/2014	RE
2004	02/08/2004	TM	16/08/2004	TM		2014	Ort	2014	Ort
			04/09/2004	QB	2015	01/08/2015	OLI	06/08/2015	OLI
2005	21/08/2005	TM	19/08/2005	TM		27/06/2015	RE	12/09/2015	RE
	03/08/2005	QB			2016	03/08/2016	OLI	01/08/2016	OLI
2006	08/08/2006	TM	06/08/2016	TM	2017	06/08/2017	OLI	04/08/2017	OLI
					2018	09/08/2018	OLI	23/08/2018	OLI
						10/09/2018	OLI	08/09/2018	OLI

***Sensores:** MSS = Landsat MSS; TM = Landsat TM; ETM+ = Landsat ETM+; OLI = Landsat OLI; QB = QuickBird; RE = RapidEye; Ort = Ortofotos; AP = ALOS PALSAR

Fonte: Durán (2017).

Como dados auxiliares foram utilizados dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), de 1 arc seg, para criação do Modelo Digital de Elevação (MDE), estes dados estão disponíveis no site da United State Geological Survey (USGS).

Em escala detalhada foram utilizadas imagens de alta resolução como referência para interpretação visual, validação de feições do terreno nos campos de dunas e geração dos *Geomorphons*:

- Imagens RapidEye disponibilizadas no Geocatálogo do Ministério do Meio

Ambiente, ortorretificadas, 5 bandas espectrais (visível e infravermelho próximo), com resolução espacial de 5m, entre os anos 2011 e 2015.

- Imagens QuickBird entre 2003 e 2009 para área de Aracati e Camocim, produto 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, disponíveis na base de dados geoespaciais da SEMACE.
- Ortofotos (ano 2007) do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE) do ano 2007, disponíveis na base de dados geoespaciais da SEMACE, correspondentes ao Município de Camocim, 2 m de resolução espacial.
- Ortofotos da SEMACE (2016) do ano 2014, 0,2 m de resolução espacial, compatível com a escala 1:2.000, Padrão de Exatidão Cartográfica PEC – Classe A) – Recobrimento de uma faixa de aproximadamente 3 km contíguos a linha de costa do Município de Camocim e de Aracati.
- Dados altimétricos de perfilamentos laser – LIDAR (*Light Detection And Ranging*) (ano 2014) da SEMACE (2016) – Recobrimento de uma faixa de aproximadamente 3 km contíguos a linha de costa dos Municípios de Camocim e de Aracati. Subprodutos do levantamento: Modelo Digital de Terreno – MDT (0,5 m de resolução espacial, processados para gerar dados de declividade, hipsometria, relevo sombreado e geomorphons) e curvas de nível (1 m de equidistância), compatíveis com a escala 1:2.000, Padrão de Exatidão Cartográfica PEC – Classe A.

O processamento digital das imagens foi realizado com os softwares: ERDAS Imagine 2014, ENVI 5.1, ESA SNAP, TerrSet 18.21, R 3.6.1, e Google Earth Engine. A geração dos *geomorphons* foi utilizando a extensão do mesmo nome no software GRASS 7.2.2. A visualização, integração com dados SIG e representação, com os softwares ArcGis 10.4 e QGis 2.10. As análises de transições significativas foram executadas no Excel.

O sistema de projeção das bases cartográficas e as imagens de satélite foram reprojatadas para o sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 24 Sul, *Datum* SIRGAS 2000.

Na delimitação das unidades geoambientais, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM de 1arc seg e as imagens óticas de data mais recente

disponíveis, aproveitando as diferenças na resolução espectral dos produtos na delimitação das diferentes unidades. O campo de dunas nas planícies litorâneas objeto do estudo possuem algumas feições que requerem dados de terreno mais detalhados. Neste sentido, foi utilizada interpretação visual das ortofotos da SEMACE ano 2014 e o produto dos geomorphons gerado a partir do modelo MDT de 0,5 m de resolução espacial, com base em padrões e elementos visuais tais como forma, amplitude e declividade do relevo. Os dados foram validados em campo.

Foram utilizadas imagens de sensores passivos e ativos para determinar as mudanças de uso e cobertura na planície costeira como objeto de estudo, a uma escala 1:100.000, que é adequada na extração de informações temáticas a partir de imagens dos sensores da série Landsat e ALOS PALSAR.

Para detecção de mudanças nos campos de dunas foram utilizadas as imagens Landsat, enquanto as imagens RapidEye, QuickBird, Ortofotos, facilitaram a localização dos pontos de observação e verificação de resultados obtidos pelo método de análise de mistura espectral.

3.1 Métodos aplicados aos sensores óticos

3.1.1 Correção Geométrica

Para obter a correspondência espacial entre as imagens Landsat, 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 Landsat ortorretificada. No processo, é possível incluir pontos de controle e selecionar uma linha de corte para o erro, que foi então fixado em 0.5 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.

O *AutoSync* gera um relatório sobre os *tie point*, que inclui dados sobre as coordenadas dos pontos, valores residuais e RMSE, sendo este último utilizado, segundo Nelson e Khorram (2019), como uma estimativa da exatidão ou precisão

posicional nos eixos X e Y, onde o RMSE é a raiz quadrada da média do conjunto das diferenças ao quadrado entre o conjunto de valores das coordenadas da imagem que deve ser corrigida, assim como os valores das coordenadas da imagem referência (Equação 21).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum \frac{(y_{pred} - y_{ref})^2}{N}}$$
(21)

Onde: y_{pred} é o valor previsto; y_{ref} é o valor observado e N é o número total de observações.

O RMSE incorpora os RMS individuais de cada ponto de controle, sendo assim que mede quanta distorsão ou stretching ocorreu na imagem que está sendo georreferenciada e indica que tão bom foi o ajuste do modelo de transformação sobre a imagem a ser georreferenciada (NELSON E KHORRAM, 2019).

3.1.2 Correção Radiométrica

Para tentar manter um padrão de qualidade de dados com reflectância de superfície, aspecto imprescindível para deixar os dados multitemporais na mesma escala radiométrica, as imagens selecionadas para este trabalho correspondem ao produto de reflectância de superfície, que se encontram disponíveis nos catálogos do Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) e *Google Earth Engine* (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat>).

Desta forma evitou-se fazer correções manuais que pudessem introduzir erros adicionais ou aleatórios, já que como menciona USGS (2019a), a eficácia da correção de reflectância de superfície provavelmente é reduzida em áreas onde a correção atmosférica é afetada por condições adversas tais como regiões hiperáridas e regiões costeiras onde a área terrestre é pequena em relação à água adjacente, que se apresentam nas áreas de estudo deste trabalho.

Os produtos de reflectância da superfície são gerados a partir de *softwares* especializados que foram desenvolvidos pela Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA). Os produtos de dados Landsat 4-7 SR são gerados a partir de *Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System* (LEDAPS), enquanto os dados Landsat 8 SR são gerados a partir *Landsat 8 Surface*

Reflectance Code (LaSRC).

O LEDAPS gera a refletância do topo da atmosfera (TOA) e a temperatura de brilho do topo da atmosfera (BT) usando os parâmetros de calibração dos metadados. Dados auxiliares como vapor de água, ozônio, altura geopotencial, espessura óptica do aerossol (AOT) e elevação digital são inseridos com os dados de Landsat TOA Reflectance e TOA BT no modelo de transferência radiativa *Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6S) para gerar refletância de superfície (USGS, 2019a).

O LaSRC gera a reflectância da parte superior da atmosfera (TOA) e a temperatura de brilho do topo da atmosfera (BT) usando os parâmetros de calibração dos metadados. As rotinas de correção atmosférica são aplicadas aos dados de reflectância do Landsat 8 TOA, usando dados de entrada auxiliares como vapor de água, ozônio e espessura óptica do aerossol (AOT) recuperados do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e elevação digital derivada do GTOPO5 para gerar a refletância de superfície (USGS, 2019b).

3.1.3 Correção de Gap Fill na Imagem Landsat-7 SLC-OFF

Na série temporal deste trabalho existia um vazio de imagens entre os anos 2010 e 2012, já que não tem disponibilidade de imagens adequadas do Landsat 5 TM (que falhou em novembro de 2011) e sem imagens do Landsat 8 OLI porque foi lançado em fevereiro de 2013.

As únicas imagens disponíveis correspondem ao Landsat 7 ETM+ SLC off, que também têm falhas devido a que o mecanismo projetado para corrigir a subamostragem do espelho corretor de linha, o chamado *scan-line corrector* (SLC), falhou em 31 de maio de 2003, gerando imagens com linhas sem informação, denominadas *gaps*.

Para corrigir esse problema e permitir a utilização destas imagens foi criada por Scaramuzza et al. (2004) a metodologia para preenchimento destes vazios na imagem, denominada "*Gap Fill*", sendo recomendada pela USGS (2004) e utilizada no *software* ENVI como algoritmo: "*landsat_gapfill*", que proporciona bons resultados. Esse método foi selecionado com base em sua simplicidade e facilidade de implementação rápida.

Entre duas cenas com diferentes resoluções temporais, foi observado que

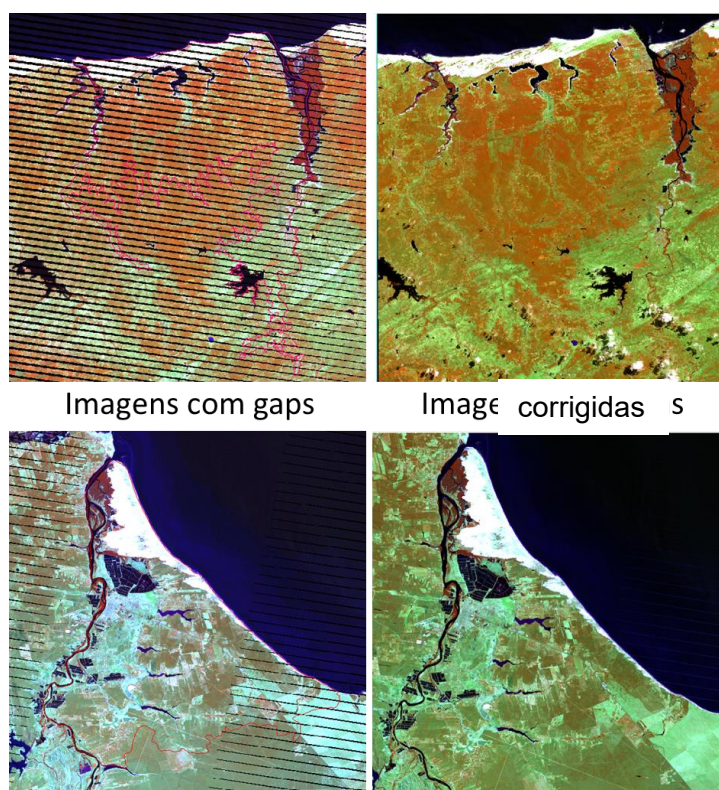
cada faixa escura distribuída nas imagens com “gaps” não vá estritamente alinhada na mesma posição da cena seguinte (há uma variação de imagem para imagem). Neste caso, foram atendidos os critérios de seleção das imagens de acordo com USGS (2004):

- a) Todas as cenas que foram integradas em um único produto devem estar corrigidas geometricamente antes da etapa de ajuste radiométrico.
- b) O preenchimento de “gaps” emprega um algoritmo de composição baseado na correspondência do histograma. Nesta fase é calculada uma função de transferência que converte os valores radiométricos de uma cena em valores radiométricos equivalentes de uma segunda cena. Os dados transformados são usados para preencher os “gaps”. Este processo foi projetado para combinar uma imagem SLC *off* com uma ou mais cenas, que podem ser com SLC desativado e / ou com SLC ativado. A descrição sobre a criação da máscara e janela adaptativa encontra-se em USGS (2004).
- c) Selecione cenas de preenchimento o mais livre de nuvens possível e que contenham o mínimo de alterações óbvias no conteúdo da cena (por exemplo, cobertura de neve diferente, cobertura de gelo no corpo da água / diferenças de brilho do sol) possível.
- d) Selecione cenas de SLC-off com datas mais próximas possíveis da cena principal, para minimizar as mudanças nas condições da vegetação e aproveitar as semelhanças nos ciclos de vegetação sazonais.
- e) Selecione cenas de preenchimento com SLC que estejam dentro de +/- 4 ciclos WRS da cena principal, se possível. Como o período de varredura do ETM + aumenta lentamente com o tempo, a fase do intervalo de varredura relativa da cena principal / de preenchimento varia em toda a cena se as datas de aquisição estiverem muito afastadas.

Para este trabalho foram corrigidas as cenas do Landsat 7 ETM+ SLC-off, correspondentes as áreas de estudo, com o algoritmo: *landsat_gapfill*, criado para ser instalado no *software* ENVI. Foram utilizadas cenas com gaps sem nuvens e a opção *Global histogram matching* para correspondência do histograma. Em Aracati foi utilizada como base a imagem de 01/09/2012 e preenchendo os gaps com a imagem de 03/10/2012. Em Camocim foi utilizada como base a imagem de 08/09/2012 e preenchendo os gaps com as imagens correspondentes 23/08/2012 e

15/09/2012. Todas as imagens correspondem a estação seca da área em estudo, para tentar reduzir as diferenças fenológicas da cobertura vegetal (Figura 6).

Figura 6 - Resultado do Gap Fill nas imagens Landsat de Camocim (superior) e Aracati (inferior).



Fonte: Duran, 2019

3.1.4 Mascara de Nuvens

Nas imagens da série temporal onde houve presença de nuvens finas, semitransparentes, com sombras difusas, não foi possível mascarar as nuvens e suas sombras apenas com a banda *Quality Assessment* (QA). Neste sentido, de acordo a Zhu e Woodcock (2012), Zhu et al. (2015), Foga et al. (2017), Qiu et al. (2019) não existe um limite quantitativo no algoritmo para distinguir nuvem fina e elementos transparentes, como neblina ou aerossóis, tornando a identificação de nuvem fina inerentemente subjetiva para qualquer analista.

Devido a necessidade de classificar imagens sem nuvens correspondentes aos anos seleccionados para a análise e evitar comprometer o resultado da classificação, conforme mencionado por Riaño (2002), Lu et al. (2004), Jensen et al.

(2007), a solução encontrada foi criar compostos simples de imagens Landsat sem nuvens. Neste sentido, o GEE fornece o método “*ee.Algorithms.Landsat.simpleComposite*”. Esse método seleciona um subconjunto de cenas do local selecionado, aplica a calibração TOA padrão, atribui uma pontuação simples na nuvem a cada pixel e mede os pixels menos nublados.

Ele seleciona o menor intervalo possível de pontuações na nuvem em cada ponto e calcula os valores percentuais por banda a partir dos pixels aceitos, usando parâmetros personalizados para o limite de pontuação da nuvem e o percentil. Esse algoritmo também usa o algoritmo “*LandsatPathRowLimit*” para ajudar ao usuário a selecionar apenas as cenas menos nubladas. Neste trabalho foram consideradas as cenas correspondentes ao período de seca, com preferência as próximas ao mês de agosto, para tentar reduzir as diferenças fenológicas nas coberturas de vegetação.

3.1.5 - Fatores adicionais

Para melhorar a separabilidade entre as classes é possível introduzir mais fatores. Entre mais variáveis são relacionadas as bandas da imagem original melhora a discriminação entre as classes da imagem classificada. As possibilidades consideradas neste trabalho foram: NDVI, transformação Tasseled Cap e medida de textura.

O NDVI é um indicador sensível a quantidade e condição da vegetação, especialmente no estado de senescência da vegetação e reduz o efeito topográfico. A aplicação do NDVI permitiu melhor visualização do comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos; identificando e destacando as áreas como “vegetação densa”, “vegetação moderada”, “vegetação escassa”, “solo aberto” ou “sem vegetação” (JENSEN, 2009).

A transformação Tasseled Cap contribui com gerar novos componentes que ajudam na discriminação e reconhecimento de alvos com variação espectral, sendo eficiente na detecção de mudanças em áreas espectralmente semelhantes (LILLESAND et al. 2004). Foram utilizados os coeficientes para transformar imagens: Landsat 5 TM de Crist e Cicone (1984), Landsat 7 ETM+ de Huang et al. (2002) e Landsat 8 OLI de Baig et al. (2014).

A geração de informação de textura utilizando a variância, neste trabalho

considerou que quanto maior seja a variância, maior será a dispersão dos dados. A textura oferece informação de contexto baseado nos valores dos píxeis, mostrando que áreas escuras possuem menor variância, menor dispersão e menor variação, enquanto as áreas mais claras mostram uma maior variação, indicando mudanças, reforçando o contexto das áreas com maior variabilidade. Por este motivo, foi considerada uma variável importante para ajudar a discriminar as classes no processo de classificação em cada ano selecionado para a análise (FARIAS, 2015).

Os melhores resultados nas classificações são obtidas quando consideradas a totalidade das bandas espectrais, que implicam, portanto, a utilização do maior número possível de dados radiométricos. A intenção é obter a maior clareza da interpretação e caracterização da cobertura. Portanto, os valores numéricos definidos pelo pixel da imagem, que, por sua vez é associado à informação espectral dos alvos captados pelo sensor, correlacionado com variáveis onde são identificados e associados a temas distintos, permite um mapeamento mais eficaz com a linearização dos contornos das diferentes classes consideradas, ajudando na configuração de regiões homogêneas.

3.1.6 Trabalho de campo

Para contribuir no conhecimento sobre os diferentes usos e cobertura da terra nas áreas de estudo e validar a interpretação previa de uso e cobertura, foram realizados trabalhos de campo entre os dias 19 e 22 de agosto de 2017 e 02 a 04 de dezembro de 2017; 17 a 23 de agosto de 2018, nas seguintes áreas: (a) planície costeira entre Camocim, (b) Rio Coreaú, (c) Rio Tapuio, (d) limite do tabuleiro, na área de dunas móveis, próximas as comunidades Maceió e Xavier onde está localizado o parque eólico e (d) a foz do Rio Tapuio (Mapa 1). Em uma área com uma superfície de 69.159,51 ha, foram levantados 192 pontos.

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, foram realizados trabalhos de campo 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 (Mapa 2). Em uma área com uma superfície de 41.963,7 ha, foram levantados 151 pontos.

Os pontos localizados em campo possuem as coordenadas UTM SIRGAS

2000 Fuso 24 S, medidas com GPS etrex da Garmim, registro fotográfico e anotações sobre o tipo de uso e cobertura da terra observada. O objetivo do trabalho de campo foi fazer reconhecimento de toda a área de estudo, para ter dados que auxiliem na escolha de áreas de treinamento e possam ser considerados dados de comprovação da realidade de campo, para classificação supervisionada das imagens de satélite da área de estudo que serão utilizadas para detecção de mudanças.

3.1.7 Classificação supervisionada

Antes de aplicar o método de classificação, as imagens em reflectância de superfície sem nuvens, foram pré-processadas utilizando scripts em R e as imagens com nuvens no *Google Earth Engine*. Este pré-processamento consistiu no empilhamento das bandas, reprojeção, geração dos índices NDVI e *Tasseled Cap*, normalização dos valores num intervalo de 0 a 1, recorte baseado no limite da área em estudo e mesclagem final das bandas originais da imagem com os produtos de NDVI, *Tasseled Cap* e Textura. No caso das imagens com nuvens, além do pré-processamento já mencionado, foi adicionado o método *ee.Algorithms.Landsat.simpleComposite*, para gerar compostos simples de imagens Landsat sem nuvens.

As áreas de treinamento foram escolhidas com base nas informações da assinatura espectral dos alvos para cada ponto de GPS coletado. Neste caso, somente para avaliar, se a seleção dos pixels que conformaram as áreas de treinamento possuem uma boa separabilidade, foram aplicadas as medidas de separabilidade de Jeffries-Matusita e de divergência transformada disponíveis no software ENVI 5.1 procurando valores maiores que 1,9, que indicam que as amostras têm boa separabilidade. No caso das amostras com valores mais baixos de separabilidade, foi necessária a edição e/ou seleção de novas amostras.

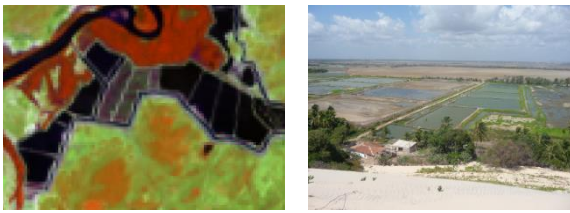
Como classificador foi utilizado o método Máquinas de Vetor Suporte (SVM) citado por Hsu et al. (2007), Tso e Mather (2009) e Garcia e Ramos, (2019) como um dos classificadores não paramétricos mais robustos que fornece bons resultados de classificação a partir de dados complexos e ruidosos. Optou-se por utilizar a função de Base Radial Gaussiana, pois foi a que apresentou maior acurácia, com valor de penalidade entre 5 e 10. Em seguida à etapa de pós-classificação foi

aplicado um filtro de mediana 3x3 para melhorar a aparência das imagens classificadas e reduzir o efeito sal e pimenta.

Com os trabalhos de campo, foram observadas diferenças entre as coberturas naturais e usos presentes nas áreas de estudo. Foram estabelecidas 11 classes para o mapeamento de uso e cobertura, considerando a classificação de cobertura vegetal de Fernandez (2003) e Fernandes (2007) (Figura 7 e 8).

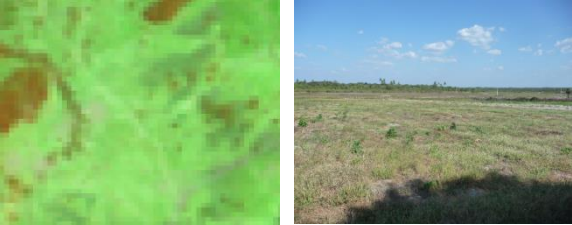

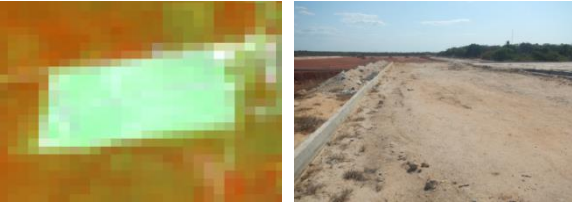
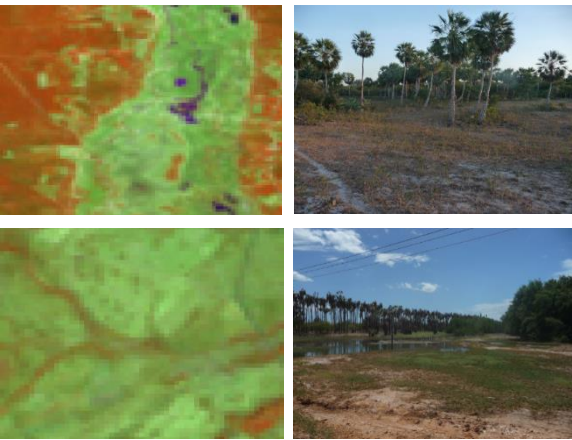
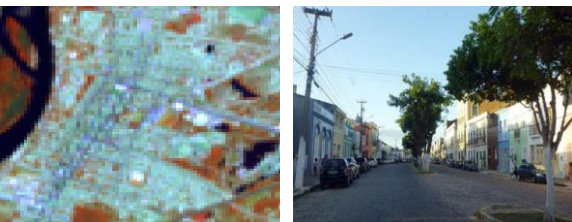
O trabalho de campo teve a função de auxiliar na compilação de um conjunto de amostras que descrevam o padrão espectral de cada classe de uso e cobertura a ser classificada na imagem. Dependendo da natureza das classes de informação procuradas e da complexidade da área geográfica, é comum considerar adquirir dados de 100 ou mais áreas de treinamento para representar adequadamente a variabilidade espectral em uma imagem (CONGALTON e GREEN, 1999; LILLESAND et al., 2004).

Figura 7 - Descrição das classes para o mapeamento de uso e cobertura em Aracati e Camocim

Classe de Uso e Cobertura (Avb)	Descrição*	Chave de Interpretação
Corpos d'água (Água)	Inclui rios, riachos, lagoas, lagoas costeiras, lagoas interduais, áreas úmidas com lamina de água.	
Arbustivo (Arbustivo)	Inclui a vegetação do tabuleiro sub-perene-fólia, cujas árvores tem maior porte e ficam no entorno de cursos de água, as arbores e arbustos são densos e permanecem sempre verde no período mais seco. Inclui a mata ciliar associada a mata de galeria, que possui porte mediano até 8 metros de altura e copas muito esgalhadas, algumas espécies são: Coccoloba (coaçu), Cecropia (torém), Anacardium occidentale (cajueiro), Zyziphus joazeiro (juazeiro). Nas planícies aluviais e áreas úmidas domina a Copernicea prunifera (carnaúba).	
Arbustivo caducifólio (Arbustivo sec)	Inclui a vegetação do tabuleiro sub-caducifolia, mais arbustiva entre 2 e 5m de altura, com muita ramificação, formando manchas esparsas e irregulares. Entre estes conjuntos de arbustos, são comuns herbáceas rasteiras cobrindo o solo e a presença próxima de cactáceas. Inclui as espécies arbustivas que possuem caráter caducifólio e folhas pequenas, algumas são: Mimosa caesalpiniaefolia (sabiá), Mimosa acutistipula (jurema preta), Combretum (mofumbo). Outras espécies como: Tocayena (jenipapo bravo), Zyziphus joazeiro (juazeiro), Cereus (mandacaru), Cassia ramiflora (pau-ferro), podem ser encontradas.	
Carcinicultura (Carcinicultura)	inclui aquelas áreas construídas com formato de piscina e lamina de água onde se desenvolve a cria de camarão.	
Cultivos (Cultivos)	Áreas destinadas principalmente a cultivo de Anacardium occidentale (cajueiro), assim como agricultura de subsistência, onde foi observado: mandioca, milho, batata doce, banana, coco, hortaliças, feijão.	
Dunas (Dunas)	Inclui todas as superfícies arenosas tais como as praias, ante-duna ou berma, campo de dunas móveis, planície de deflação e dunas sobre as falésias.	

Nota (*): a descrição dos tipos de uso e cobertura da terra correspondem a: Leal (2003), Fernandez (2003), Fernandez (2007).

Figura 8 - Descrição das classes para o mapeamento de uso e cobertura em Aracati e Camocim

Classe de Uso e Cobertura (Avb)	Descrição*	Chave de Interpretação
Gramíneas (Gramíneas)	inclui as espécies herbáceas que crescem na borda da berma, no limite superior da zona de praia, algumas das espécies florísticas são: Ipomoea pes-caprae (salsa), remirea marítima (cipó da praia), Cyperus (capim). Nas planícies de deflação e nas lagoas interdunais, vegetação que ajuda no processo de fixação das dunas, encontra-se: Tephrosia cinérea (anil bravo), Paspalum aquaticum (capim), Eleocharis (junco), Cyperus (capim), Chrysobalaus icaco (guajiru), Byrsonima (muricí), Stysolanntes humilis (vassourinha), Cocos nucifera (coco). Este tipo de vegetação também encontra-se presente também em áreas onde previamente houve algum tipo de cultivo, bordes de lagoas, partes mas “elevadas” das áreas úmidas, áreas com intervenção antrópica.	
Manguezal (Mangue)	vegetação caraterística nas proximidades da foz do rio Jaguaribe em Aracati, Rio Coreaú e Rio Tapuio em Camocim, onde predomina o mangue e outras espécies herbáceas. Algumas espécies arbóreas são: Rhizophora mangle (mangue vermelho, mangue roxo, mangue verdadeiro), Laguncularia racemosa (mangue branco ou mangue manso), AVECENNIA nítida (mangue canoé) e Conocarpus erectus (mangue botão). As herbáceas que ocupam as áreas como salgados e apicuns, mais comuns são: Iresine portulacoides (embira do mangue), Acrostichum aureum (samambaia do mangue), Batis marítima (bredinho).	
Solo exposto (solo exposto)	Inclui as áreas sem cobertura vegetal diferentes das dunas, inclui as margens de rios, lagoas e estradas de chão.	
Áreas úmidas (úmidas)	inclui ambientes lacustres pre-dunares e pós-dunares, ambientes alagáveis interdunares, campos de várzea com carnaubeiras, carnaubal nas áreas margunais das faixas interfluviais. Alguns destes ambientes pode ter lamina de água baixo alguma cobertura vegetal.	
Urbano (urbano)	Inclui as áreas residenciais, edificadas, com desenvolvimento do setor terciário na área de bens e serviços, com instalações destinadas ao desenvolvimento do setor turismo.	

Nota (*): a descrição dos tipos de uso e cobertura da terra correspondem a: Leal (2003), Fernandez (2003), Fernandez (2007).

3.1.8 Avaliação de acurácia

Além da comprovação visual dos resultados, para a validação do método de classificação desenvolvido neste trabalho, utilizou-se a medida de avaliação quantitativa matriz de confusão com o cálculo do coeficiente de concordância Kappa (CONGALTON e GREEN, 1999). Foram geradas áreas de treinamento e de validação, para avaliar a acurácia das áreas de treinamento da imagem.

A amostragem utilizada para definir as áreas de treinamento foi aleatória, com o trabalho de campo foi possível escolher as amostras de treinamento e as amostras de validação de forma que todos possuem a mesma probabilidade de serem selecionados sendo que a eleição de qualquer um não influi na seguinte amostra (CONGALTON e GREEN, 1999).

A fim de poder avaliar os resultados das classificações obtidas, foram utilizados como verdade terrestre, um conjunto de referências da superfície obtidas em campo por meio de fotografias e medição de pontos com um aparelho GPS etrex da Garmim.

Para a construção da matriz de erro, foram selecionadas as amostras de validação numa imagem de referência estratificada por classes temáticas. A utilização de amostras de treinamento diferentes das amostras de validação, de acordo a Chuvieco (2010), ajuda a evitar que a fiabilidade estimada seja maior que a real, incluindo um viés positivo que não mostra a verdadeira fiabilidade do produto da classificação.

A partir da matriz de confusão, foi possível calcular algumas medidas descritivas como a exatidão global em uma escala que varia de 0 a 100%, além da exatidão do usuário e exatidão do produtor, que refletem os erros de comissão e omissão, respectivamente (PINHO, 2006; MENESES, 2012).

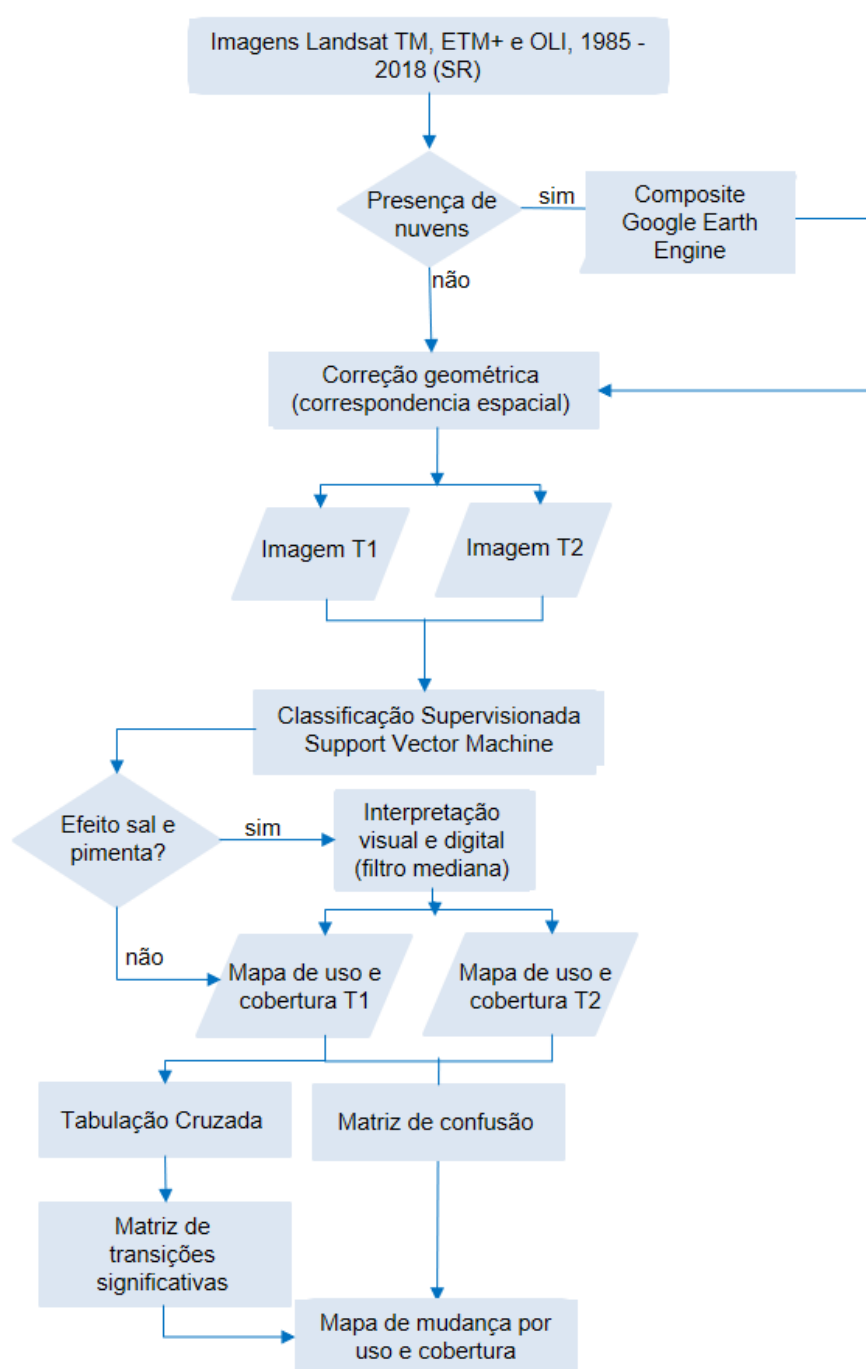
Com o cálculo do coeficiente de concordância Kappa, foi utilizada a escala de avaliação proposta por Landis e Koch (1977) modificada por Moreira (2005) na qual os intervalos de valores são atribuídos à qualidade da classificação: 0 – 0,2 = ruim; 0,2 – 0,4 = razoável; 0,4 – 0,6 = boa; 0,6 – 0,8 = muito boa; e 0,8 – 1,0 = excelente.

Procurou-se que os produtos da classificação das imagens Landsat TM, ETM+ e OLI utilizadas para a classificação de uso e cobertura da terra na área de estudo em Aracati, obtiveram valores de exatidão global e índice Kappa, superiores

a 85%, que é o valor mínimo recomendada por Foody (2002) na classificação de imagens.

Os passos para detectar as mudanças nos sensores óticos, apresentam-se no seguinte esquema metodológico (Figura 9):

Figura 9 - Métodos de detecção de mudanças com sensores óticos.



Fonte: Elaboração própria.

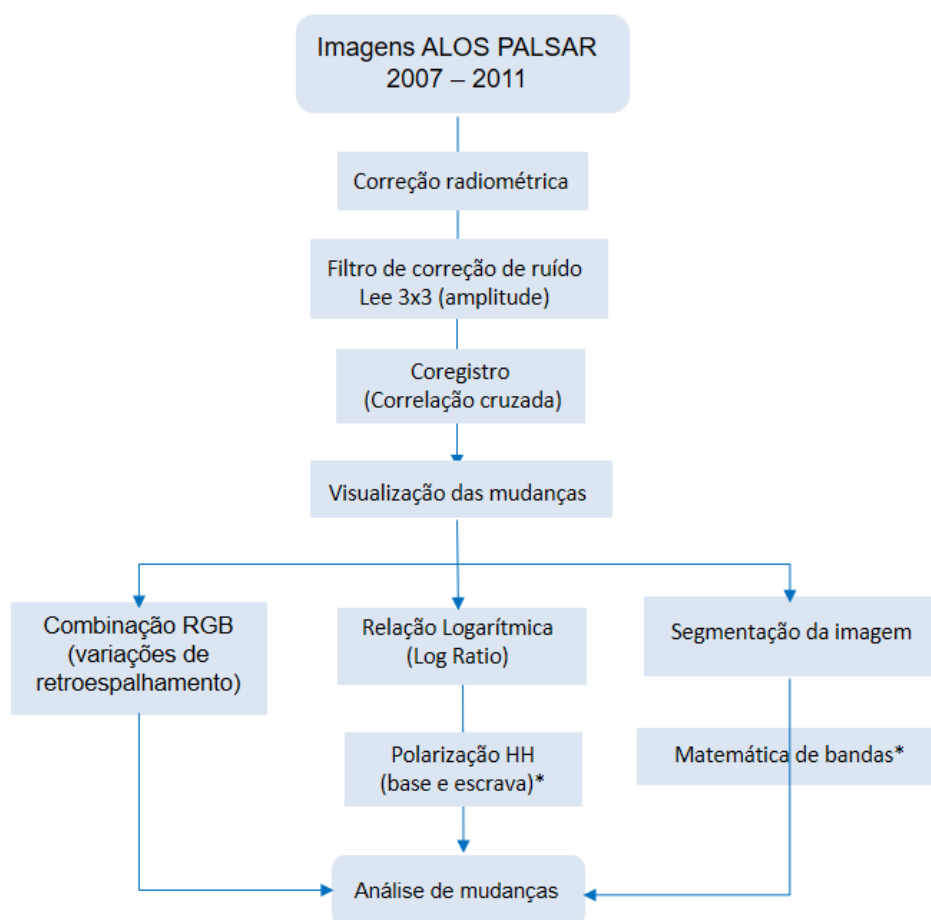
3.2 Métodos aplicados ao sensor de radar

3.2.1 Detecção de mudanças com o método Incoerente com ALOS Palsar

Os passos para detectar as mudanças nos sensores ativos apresentam-se no seguinte esquema metodológico (Figura 10).

Com as imagens seleccionadas, foi utilizado o dado de amplitude dos pares de imagens ALOS PALSAR. Para iniciar a detecção de mudanças entre um par de imagens, foram definidas uma imagem mestra e uma imagem dependente, para aplicar o procedimento complementar para este nível. O nível 1,5 vem com processamento prévio, multilooks e georreferenciamento para dual polarização com 4 looks.

Figura 10 - Métodos de detecção de mudanças com sensor ativo.



*Limiar baseado no valor da média +/- 2 desvio padrão

Aplicou-se a Calibração Radiométrica, onde o valor do píxel pode ser relacionado diretamente com o retroespalhamento obtido da cena. A mesma é aplicada de acordo à seguinte equação 22:

$$value(i) = \frac{[DN_i]^2}{A_j^2}$$

$$value(i) = \beta_i^0, \sigma^0, \gamma_i, o \text{ original } DN_i$$

(22)

$A_i = \text{betaNought } (i), \text{ sigmaNough } t(i)$

Para reduzir o ruído, aplicou-se filtro do sinal baseada no cálculo da média com o uso de um filtro Kernel 3x3.

Para conduzir as análises, é necessária a correção geométrica utilizando o MDE SRTM de 1 arc seg e um co-registro entre pares para reduzir os erros posicionais, isto consiste em gerar um registro espacial entre a imagem considerada mestra com relação a imagem dependente, aplicando interpolação bilinear e geolocalização entre pares.

Para o cálculo da detecção de mudanças pelo método incoerente, foram aplicadas três metodologias diferentes:

3.2.2 Composição multitemporal em RGB

A combinação RGB é um método que permite gerar uma primeira visão de mudança, sendo possível identificar qualitativamente as mudanças entre duas datas: a imagem de data mais antiga é considerada a imagem principal e a imagem de data posterior é considerada a imagem secundária. Nos canais RGB são inseridas as imagens na seguinte ordem: principal – secundária – principal. As variações do retroespalhamento em termos de aumento e diminuição podem ser comparadas com níveis de brilho em cada imagem e quando é inserida a combinação de imagens nos canais RGB, aqueles lugares com aumento do retroespalhamento acima do valor médio nos canais vermelho e azul, aparecem em tons roxos, indicando a remoção do elemento que causa o retroespalhamento, gerando aumento da energia que volta para o sensor que pode ser interpretado como uma mudança na cobertura superficial, como a remoção no campo de dunas.

Baseado no incremento e decréscimo do retroespalhamento através dos coeficientes de retroespalhamento, gerando três classes: a) Verde: Diminuição do retroespalhamento, indica mudanças leves, por exemplo fenologia da vegetação; b) Roxo Aumento do retroespalhamento, indica áreas de mudanças; c) Negro: Áreas sem mudanças.

3.2.3 Log Ratio ou índice de probabilidade

Outra forma de determinar mudanças nos dados estatísticos é considerando a estimação de proporções. Diversos autores utilizam a medida da intensidade como o método mais comum, mas neste caso é utilizada a metodologia de Fomelis (2015) que utiliza a amplitude como parâmetro para estimação, obtendo uma variância independente dos valores absolutos da média de retroespalhamento, sendo definida pelas seguintes equações (23) e (24):

-A diferença do logaritmo da amplitude:

$$\begin{aligned} D_L &= \log(A_f) - \log(A_g) \\ &= \log\left(\frac{A_f}{A_g}\right) \end{aligned} \quad (23)$$

-O estatístico para proporção da mudança:

$$R^* = \exp(D_L) = \left(\frac{A_f}{A_g}\right) \quad (24)$$

O cálculo da estatística de proporção de mudanças, comumente utilizado em SAR, tem uma função de densidade dada por R :

$$R = \frac{\sigma_f^2}{\sigma_g^2} \quad (25)$$

A média e a variância de R^* são dadas por:

$$E\{R^*\} = \frac{N}{N-1} R \quad (26)$$

$$\text{Var}\{R^*\} = \left(\frac{N(2N-1)R}{(N-1)^2(N-2)} \right)^2 \quad (27)$$

O estatístico da proporção R^* toma valores no intervalo de $(0, \infty)$ e na prática requerer dois limiares para identificar mudanças na cena causando uma redução ou incremento na média do poder do retroespalhamento. O chamado detector de Touzi baseado no estatístico de proporção foi calculado por (equação 27):

$$r^* = \begin{cases} R^*, & \text{si } R^* \leq 1 \\ R^{*-1}, & \text{si } R^* > 1 \end{cases} \quad (28)$$

Este estatístico tem valores entre 0 e 1, onde os valores próximos a 0 indicam ausência de mudança e os próximos a 1 mudança, gerando um resultado de detecção de mudança. A probabilidade da função de densidade é dada por (equação 29):

$$p(r^* | R) = \frac{r(2N)}{r(N)^2} \left(\frac{R^N}{(r^* + R)^{2N}} + \frac{R^{-N}}{(r^* + R^{-1})^{2N}} \right) r^{*N-1} \quad (29)$$

Uma forma de discriminar com mudanças e não mudanças antrópicas, é através da utilização de um teste de hipótese. Nesta aproximação a detecção de mudança é determinada se o par de píxeis atende a equação 28:

$$X_k = \{f_k, g_k\}^T, k = 1 \dots N \quad (30)$$

Na área de estudo, a hipótese nula corresponde as áreas da cena sem mudanças (Hipótese H_0) e a hipótese alternativa corresponde às áreas com mudanças (Hipótese H_1).

Numa localidade constituída por um conjunto de N píxeis independentes, para determinar quais píxeis se enquadram na hipótese nula ou sem ausência de mudanças e com a hipótese alternativa ou mudanças, é aplicada uma equação estatística denominada índice de probabilidade, definida como (equação 31):

$$L = \frac{P(X_1, X_2, \dots, X_N, H_0)}{P(X_1, X_2, \dots, X_N, H_1)}$$

$$= \prod_{k=1}^N \frac{P(X_k; H_0)}{P(X_k; H_1)} \quad (31)$$

Onde X_k é a média da energia de retroespalhamento por píxel na cena.

3.2.4 Segmentação

Após os cálculos do Log Ratio foram definidos os limiares para geração da segmentação de mudanças, considerando a média e o desvio padrão da banda de proporções, tendo a média +/- o desvio padrão, permitindo gerar um mapa binário onde os valores próximos ou iguais a 1 mostram as mudanças presentes no local.

$$S = X + \sigma \quad \text{ou} \quad S = X - \sigma \quad (32)$$

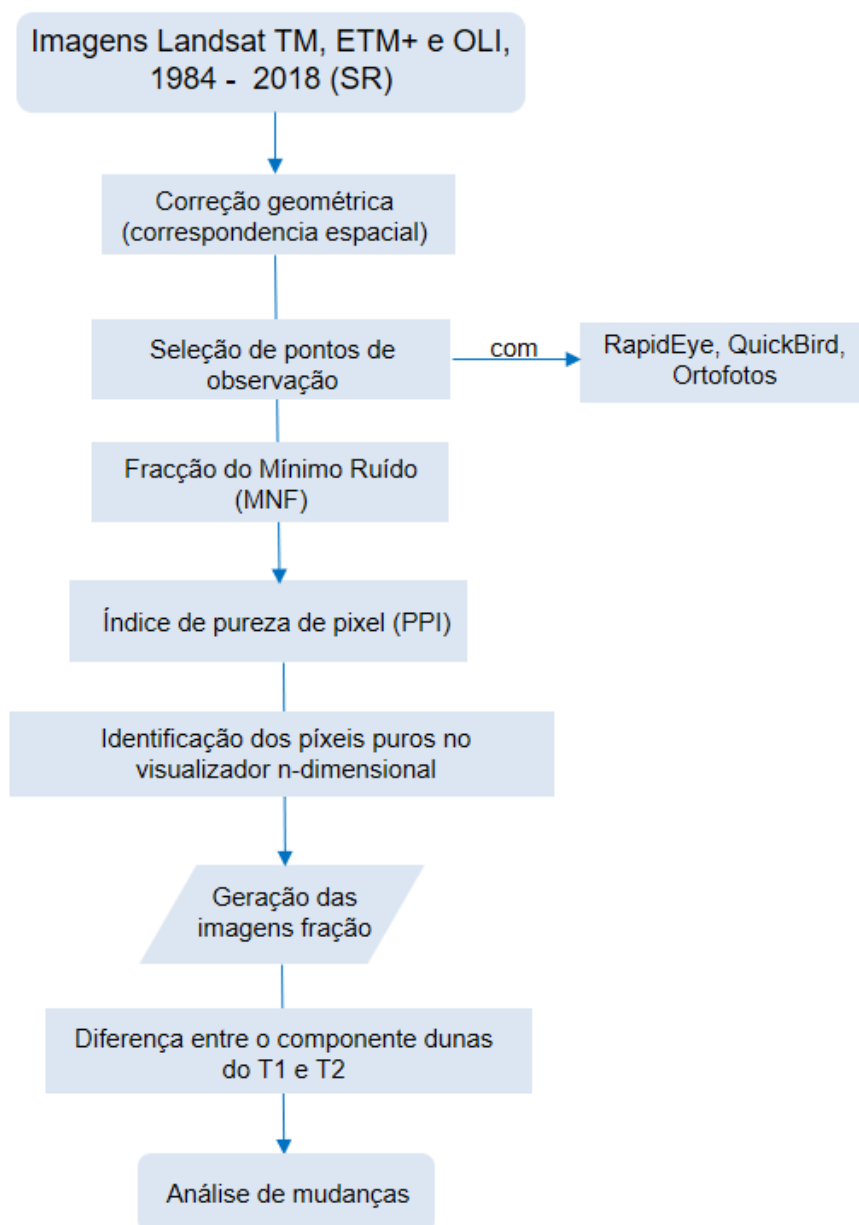
3.2.5 Detecção de mudanças no campo de dunas

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, disponível no software Envi 5.1. 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, umidade. 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. A Figura 11 apresenta o esquema metodológico.

Figura 11 - Métodos de detecção de mudanças no campo de dunas.



Fonte: Elaboração própria

4 RESULTADOS

4.1 Unidades Geoambientais

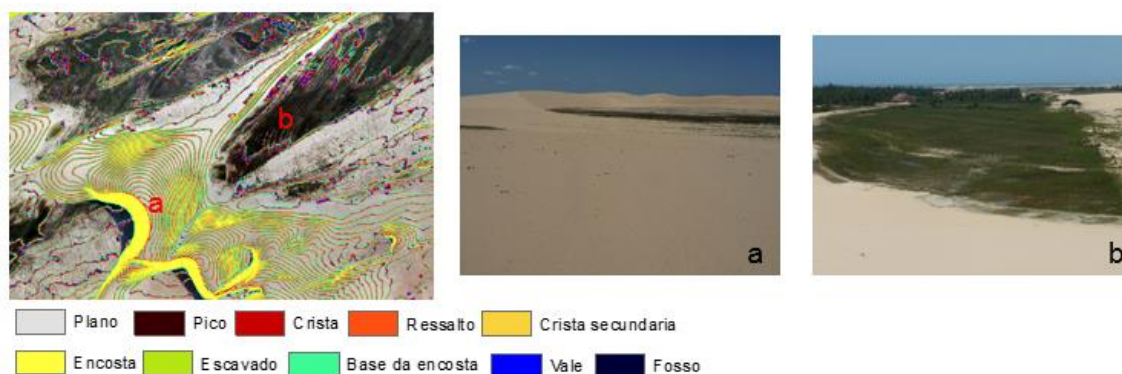
Estabelecer quais são os processos e unidades geoambientais característicos em cada área de estudo foi fundamental para entender as transformações ocorridas nas planícies costeiras e sua relação com as mudanças no uso e cobertura da terra, sendo esta última uma intervenção sistemática que se relaciona às atividades humanas sobre duas áreas do litoral cearense.

Para compreender o uso e ocupação do solo sobre a planície costeira, é necessário considerar a definição de planície costeira, como elemento importante de discussão de cada área de estudo. De acordo com Souza (2005), a planície costeira é uma superfície submetida às influências marinha, eólica, fluvial e pluvial, cuja feições são formadas por processos erosivos e/ou deposicionais.

A classificação de elemento do terreno através de *geomorphons* facilitou a identificação e delimitação das unidades geoambientais na faixa do litoral onde se localizam os campos de dunas, conforme às morfologias apresentadas por Jasiewicz & Stepinski (2013), já que algumas feições do ambiente eólico apresentaram dificuldades na diferenciação apenas considerando padrões e elementos visuais como forma, tom, associação por meio da interpretação visual. Considerando que as áreas de estudo possuem campos de dunas com morfologias diferentes, apresenta-se alguns exemplos de identificação de formas de terreno utilizando os *geomorphons* no Aracati e em Camocim.

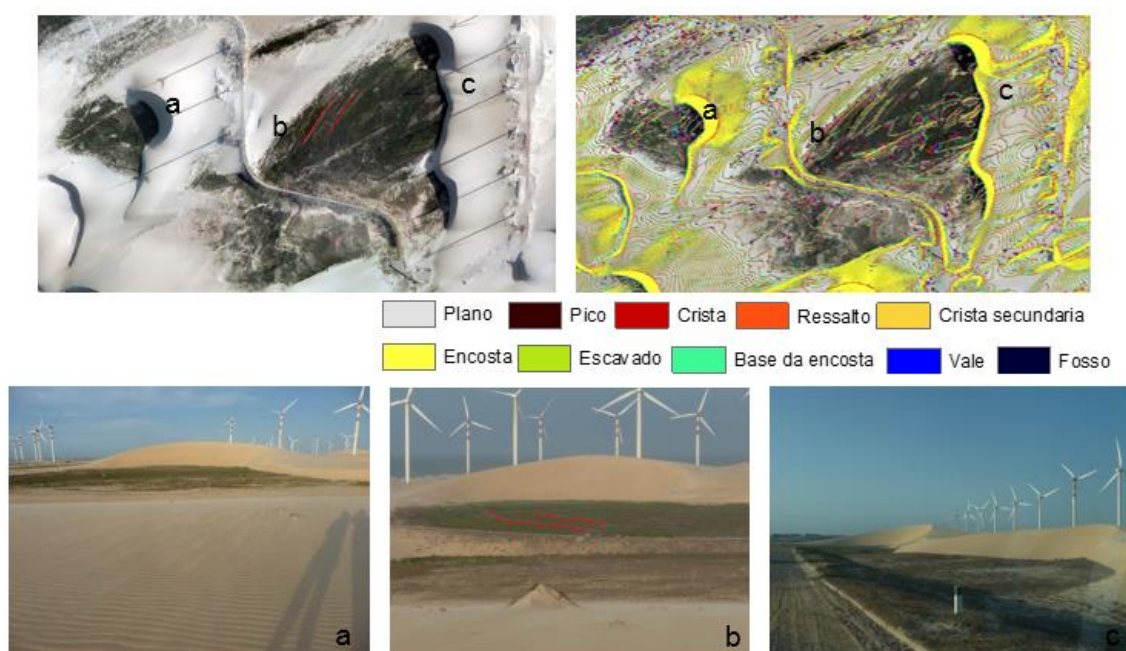
No campo de dunas localizado no litoral oeste, no Município de Camocim, destacam-se as dunas barcanóides, sendo que os *geomorphons* destacam a superfície de avalanche e a área de barlavento como encosta (que proporciona uma ideia da extensão e superfície aproximada da duna), a crista da duna, a base da duna como base da encosta, e a planície litoral como uma área plana (Figuras 12 e 13). Devido à alta resolução do MDT, são classificadas como formas de terreno algumas feições menores, nas Figuras 12 e 13, merecem destaque aquelas associadas a áreas brejo e lagoas interdunares, como são o caso das marcas espaço-temporais (paralelas ao corpo da duna) e espaço direcionais (perpendiculares ao eixo da duna).

Figura 12 - Ortofoto e resultado dos geomorphons. a: Duna barcanoide; b: Evidências de marcas espaço-temporais no campo de dunas móveis em Camocim



Fonte: Semace (2014); Durán, 2017.

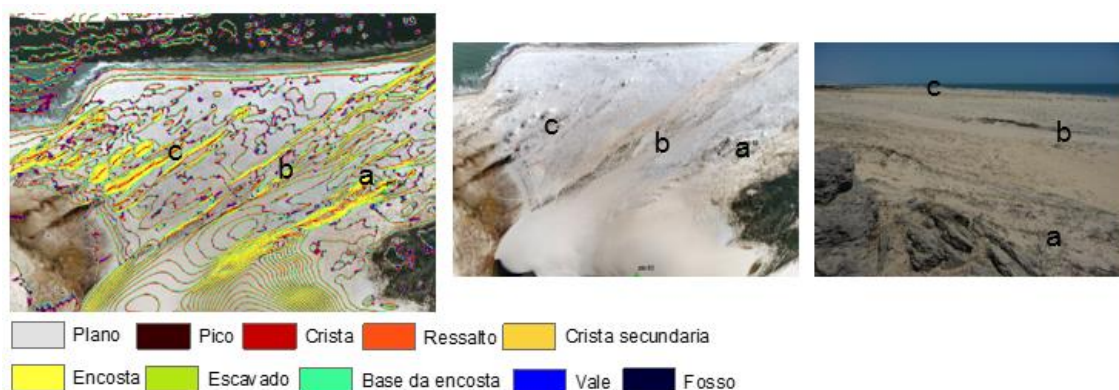
Figura 13 - Ortofoto e resultado dos geomorphons. a: Duna barcana; b: Lagoa interdunal cortada por uma estrada de acesso do parque eólico em Camocim, com evidências de marcas espaço-temporais; c: Série de dunas barcanóides cuja altura é superior a 35 m.



Fonte: Semace (2014); Durán, 2017.

Outra forma de terreno que os *geomorphons* identificaram, foi a configuração linear dos eolianitos, a Figura 14 mostra uma seção da ortofotos com um conjunto de feições lineares paralelas, com cristas vermelhas e encostas amarelas, que na comprovação de campo foi constatado que correspondem a formações de eolianitos dispostos de forma paralela com variações de altura e tamanho.

Figura 14 - Estruturas lineares de eolianitos em Camocim e localização no ortofoto e em campo.



Fonte: Semace (2014); Durán, 2017.

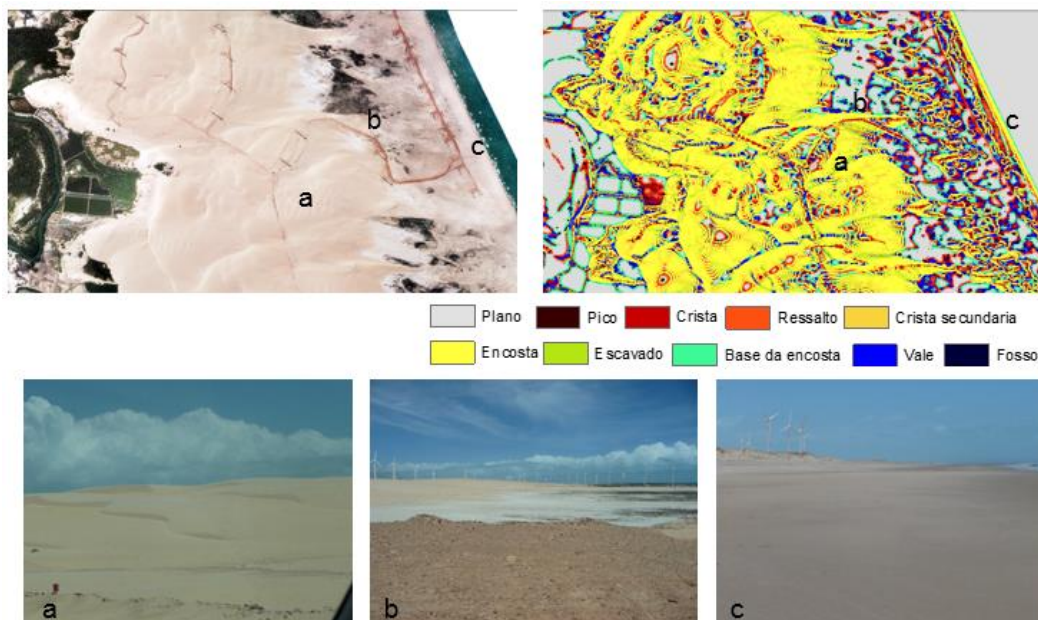
No campo de dunas localizado no litoral leste, no Município de Aracati, as dunas longitudinais e barcanóides apresentam menor proporção. Na Figura 15, pode ser observada uma seção do campo de dunas e a planície de deflação nas ortofotos, que não podem ser diferenciadas adequadamente apenas pela cor clara das areias, pela interpretação visual. Neste sentido os *geomorphons* foram importantes na identificação de: cristas das dunas (na cor vermelha), observação do limite entre as dunas móveis (na cor amarela) e a planície de deflação (na cor cinza), na identificação de lagoas interdunares, assim como na delimitação da faixa de praia.

A Figura 16, mostra como os *geomorphons* classificam as “formas geométricas” de uma construção dedicada à criação de camarão e permitem diferenciar as cristas de uma série de dunas longitudinais (na cor vermelha), que neste caso, talvez devido a morfologia deste tipo de duna e a falta de superfícies planas entre estas, a base das dunas não foi classificada como base da encosta senão como vale (na cor azul).

A Figura 17, mostra como os *geomorphons* auxiliam na delimitação de dunas semi-fixas cobertas com vegetação. O limite do campo de dunas móveis é claramente diferenciado pela cor clara das dunas na ortofoto, mas as dunas semi-fixas cobertas pela vegetação são identificadas apenas no *geomorphon*. A parte posterior desta seção do campo de dunas foi classificada na cor predominantemente amarela, uma superfície com características semelhantes às cristas e encosta de dunas, diferente da topografia ao redor descrita com curvas de nível, mas coberta com vegetação. Este resultado coincide com o mapeamento da unidade

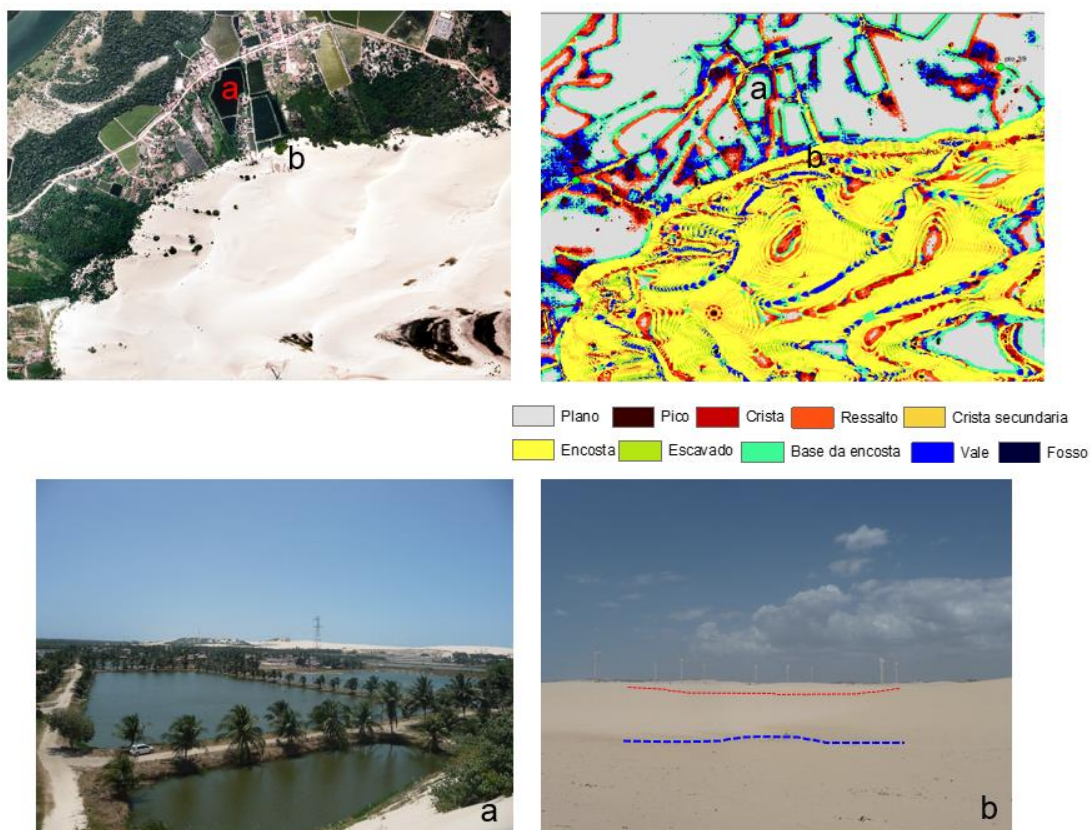
geoambiental de dunas semi-fixas de Pedraza (2016).

Figura 15 - Ortofoto e resultado dos geomorphons. a: Dunas longitudinais em Aracati; b: Lagoa interdunal que encontrava-se seca; c: Faixa de praia.



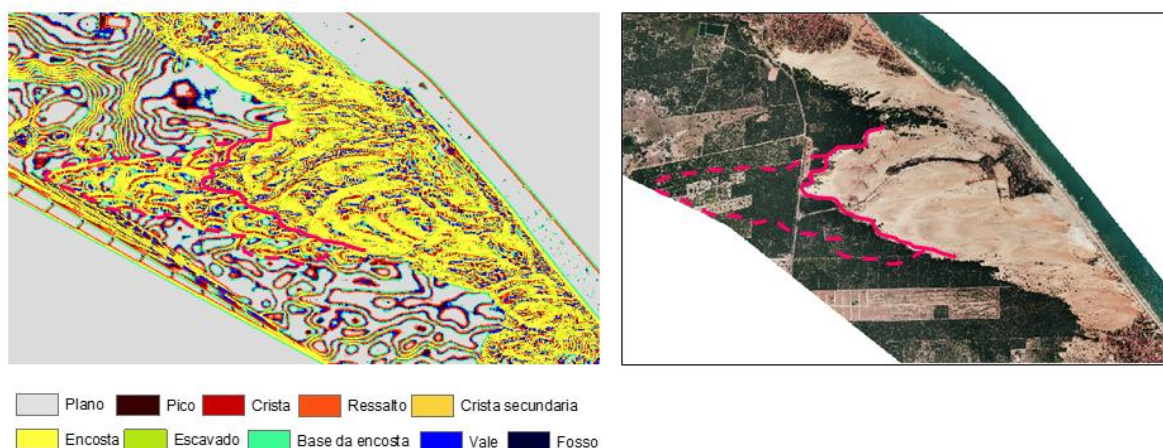
Fonte: Semace (2014); Durán, 2017.

Figura 16 - Ortofoto e resultado dos geomorphons. a: Tanques de criação de camarão; b: Crista da duna longitudinal e a base da duna em Aracati.



Fonte: Semace (2014); Durán, 2016.

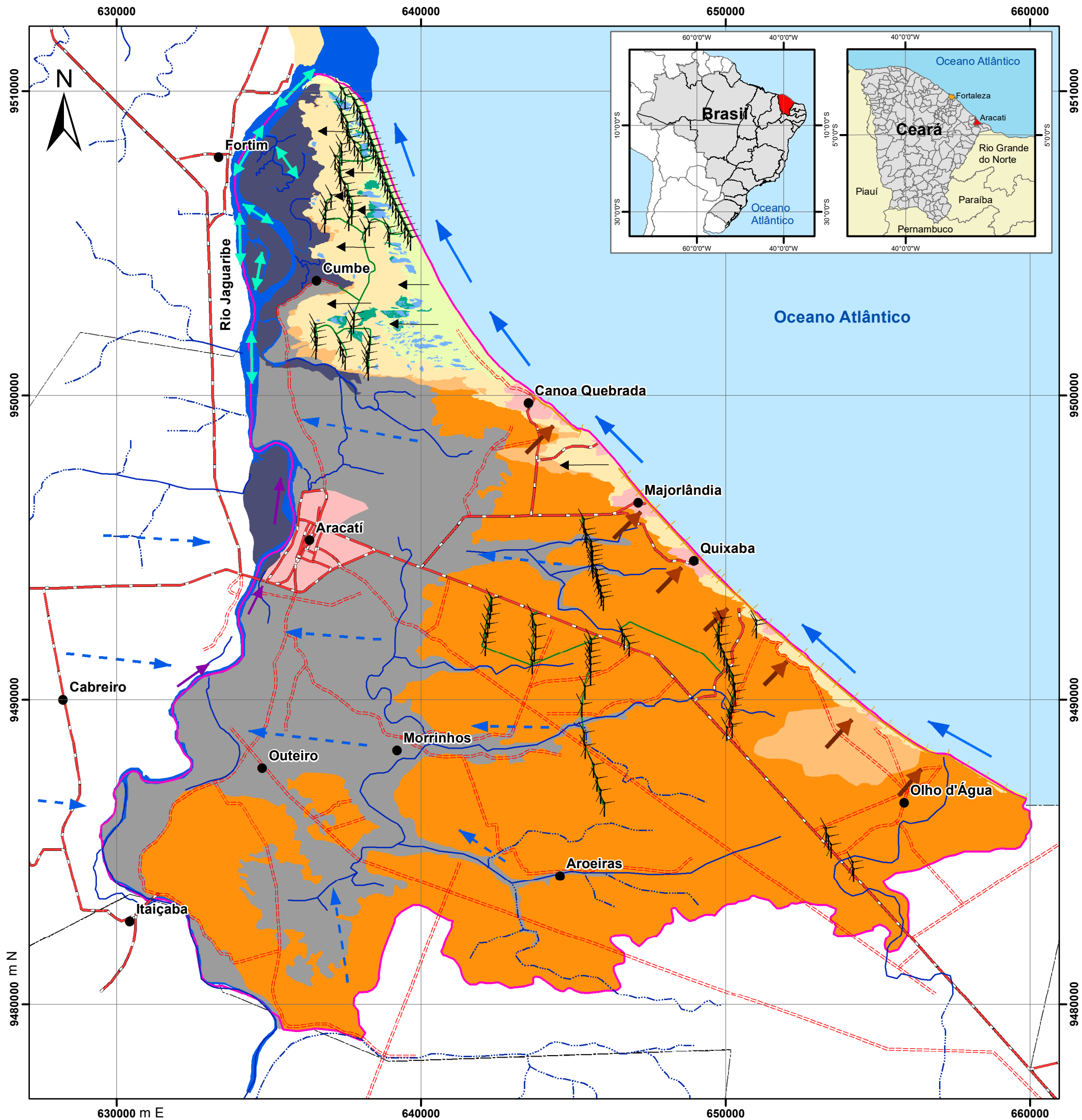
Figura 17 - Delimitação de dunas móveis e dunas fixas com o resultado dos geomorphons em Aracati.



Fonte: Semace (2014); Durán, 2017.

Foram identificadas 11 unidades geoambientais no Baixo Jaguaribe e 13 unidades geoambientais em Camocim. Como são duas planícies costeiras as unidades e os fluxos de matéria e energia são constantes na maioria dos casos, o incremento corresponde na área de estudo localizada em Camocim deve-se ao que nesta área do litoral oeste se apresentam algumas condições morfológicas que não possui a área de estudo do Baixo Jaguaribe.

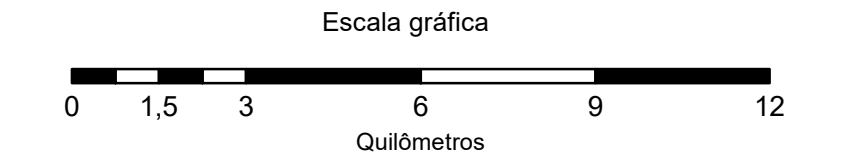
Foram elaborados os mapas de unidades geoambientais e a espacialidade dos fluxos de matéria e energia distribuídos nas planícies costeiras objeto deste estudo (Mapa 3 e 4). A seguir são apresentadas as descrições associadas aos fluxos para cada unidade, com base nas observações de campo e contrastadas com informações publicadas por vários autores tais como Lei estadual nº 13.796, de 30/06/2006, Bezerra (2009), Meireles (2012), SEMACE (2015), Dias (2015), Pedraza (2016), Meireles (2016) e Mendes (2016).



Mapa 3
Mapa de Unidades Geoambientais e Fluxos de Materia e Energia no Baixo Jaguaribe

- Legenda**
- | Unidades Geoambientais | Fluxos de Materia e Energia |
|---------------------------|-----------------------------|
| Campo de Dunas Moveis | Fluxo Litorâneo |
| Campo de Dunas Semi-Fixas | Fluxo Eólico |
| Cordão Litorâneo | Fluxo Fluvio-marinho |
| Faixa de Praia | Fluxo Fluvial |
| Brejo Interdunar | Fluxo Subterrâneo |
| Lagoa Interdunar | Processo gravitacional |
| Planície de Deflação | |
| Planície Fluvial | |
| Planície Fluvio-Marinha | |
| Tabuleiro Litorâneo | |
| Áreas Urbanizadas | |
| Rio Jaguaribe | |
| Falesia | |

- Convenções**
- Limite da área de estudo
 - Limite municipal
 - Limite da área de estudo
 - 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. 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: Glória Durán
Orientadora: Profa Dra. Adryane Gorayeb



Mapa 4 Mapa de Unidades Geoambientais e Fluxos de Matéria e Energia na área de Camocim

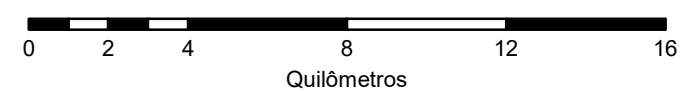
Legenda

- | Unidades Geoambientais | Fluxos de Matéria e Energia |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Campo de Dunas Móveis | Fluxo Litorâneo |
| Campo de Dunas Fixas | Fluxo Eólico |
| Cordão Litorâneo | Fluxo Fluvio-marinho |
| Faixa de Praia | Fluxo Fluvial |
| Brejo Interdunar | Fluxo Subterrâneo |
| Lagoa Interdunar | Fluxo Fluvio-lacustre |
| Planície de Deflação Ativa | Processo Gravitacional |
| Planície de Deflação Estabilizada | |
| Planície Fluvial | |
| Planície Fluvio-marinha | |
| Planície Fluvio-lacustre | |
| Tabuleiro Pré-Litorâneo | |
| Eolianito | |
| Beach Rocks | |
| Falesia | |

Convenções

- Limite da área de estudo
- Limite municipal
- Limite da área de estudo
- Aerogeradores
- Povoados
- Sistema Hídrico**
- Cursos d'água perenes
- Cursos d'água intermitentes
- Sistema Viário**
- Estrada pavimentada
- Estrada sem pavimentação
- Acesso aos aerogeradores

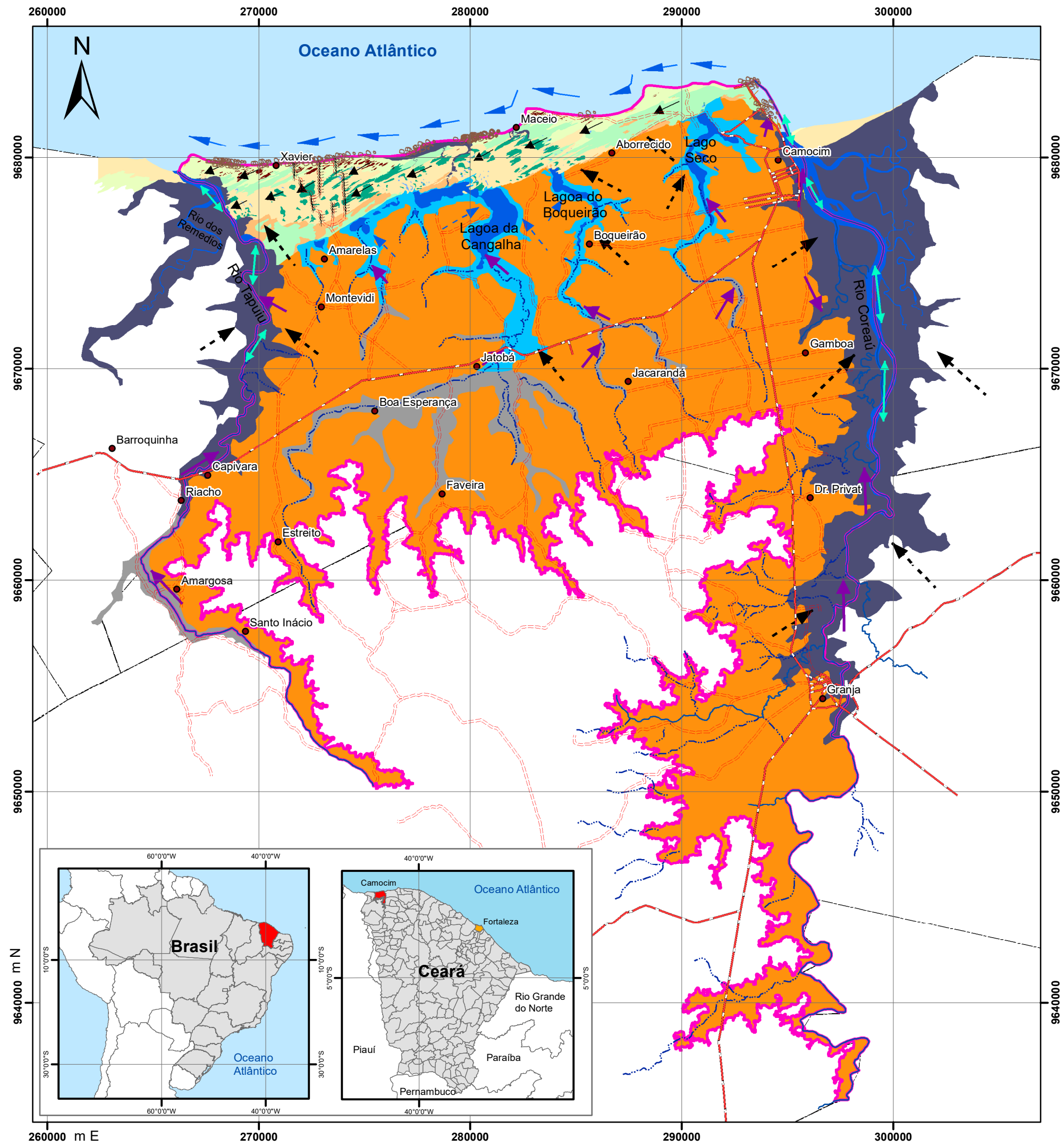
Escala gráfica



Projeção UTM, Datum SIRGAS 2000, Fuso 24 S

Fonte: Malha municipal digital IBGE, 2015. Folha: S03 W041, S03 W042, S04 W041, S04 W042, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) - USGS, Ano 2000. 1 arc segundo. Base Cartográfica de infraestrutura hídrica do Ceará - COGERH, 2015. Ortofotos a escala 1:2.000 SEMACE, 2016.

Elaboração: Glória Durán
Orientadora: Profa Dra. Adryane Gorayeb



4.1.1 Fluxos de matéria e energia

4.1.1.1 Fluxo Litorâneo:

Ocorre pela ação das ondas e marés. A também chamada deriva litorânea que ocorre predominantemente de leste para oeste e localmente em alguma direção preferencial conforme à fisiografia da linha de costa. A relação da deriva litorânea com o fluxo das marés, influenciando os fluxos de enchente e vazante, apresenta-se na hidrodinâmica estuarina no ecossistema manguezal do baixo Jaguaribe no litoral leste e no Rio Tapuio e barra dos Remédios no litoral oeste. Contribui na formação de bancos de areia e dos cordões litorâneos, estes últimos posicionados na desembocadura dos rios Jaguaribe e Tapuio, que parecem atuar como morfologias de proteção ao manguezal, proporcionando barramento do fluxo fluvio-marinho, permitindo o depósito de sedimentos (areia e argila) para expansão de áreas do manguezal. Com disponibilidade de sedimentos para a deriva litorânea, o sistema praial conta com material para expandir a zona de berma e se mantém a disponibilidade de areia para o fluxo eólico, que será responsável pela formação dos campos de dunas que localmente migram na direção das margens dos complexos estuarinos.

4.1.1.2 Fluxo eólico:

Possui uma relação direta com a sazonalidade climática regional e a direção predominante do vento. Como o período de ventos mais intenso está associado aos períodos de seca, é a partir do segundo semestre do ano que se ativa a dinâmica morfológica das dunas móveis, aumentando o transporte de sedimentos. Os ventos em direção preferencial leste para oeste, proporcionam o transporte de sedimentos, atuando na formação dos campos de dunas móveis de tipo longitudinais e barcanóides na planície costeira do Baixo Jaguaribe, assim como outras acumulações de areia distribuídas sobre as falésias desde Canoa Quebrada até as proximidades da praia de Ponta Grossa. A direção predominante dos ventos no litoral leste, contribui no avanço das dunas móveis em direção ao continente, no encontro da planície fluvio-marinha e o ecossistema manguezal do rio Jaguaribe. No caso do litoral oeste, na planície costeira em Camocim, o fluxo eólico atua na

formação dos campos de dunas móveis de tipo barcanóides e barcanas e teve influência na formação de eolianitos. Nesta parte do litoral cearense as dunas móveis avançam no encontro da planície fluvio-marinha do Rio Tapuio e a barra dos Remédios, sendo que o material das dunas vai se depositando na margem do estuário e formando os bancos de areia, sendo o fluxo fluvio-marinho o encarregado de redistribuir os sedimentos. As dunas que se direcionam para a margem direita do complexo estuarino rio Tapuio - Barra dos Remédios produziram marcas espaço-direcionais que definiram corpos eólicos que atingiram os canais estuarinos, estas evidências podem ser observadas ao longo do campo de dunas móveis. Os fluxos eólicos em Camocim contribuíram para o fechamento da desembocadura dos rios pelos campos de dunas móveis, os cursos fluviais com baixa competência de transporte durante as fases de estiagem, passaram a formar lagoas costeiras.

4.1.1.3 Fluxo Fluvio-marinho:

Corresponde à dinâmica imposta pelas oscilações diárias das marés e os processos hidrodinâmicos do aquífero, canais estuarinos e sistema fluvial da bacia hidrográfica, sendo um ambiente de redistribuição de sedimentos e de controle dos fluxos hidrodinâmicos e gravitacionais. Tem influência do componente de sazonalidade climática, já que o fluxo de água doce rege a hidrodinâmica no período de maiores precipitações pluviométricas enquanto na época de estiagem o fluxo hidrodinâmico é regido pelas oscilações da maré. O fluxo fluvio-marinho pode ser vinculado a variações interanuais e a processos de transporte de sedimentos, expansão e retração de áreas com manguezais e setores de apicum. O fluxo fluvio-marinho no Baixo Jaguaribe e em alguns setores da planície fluvio-marinha dos rios Coreaú e Tapuio, foi fragmentado com a introdução de salinas e fazendas de camarão, já que estas atividades requerem a edificação de diques e canais de adução. A indústria do camarão altera a qualidade da água, já que as descargas dos diques vão para o sistema estuarino, sendo que a dinâmica fluvio-marinha dissemina os rejeitos por todo o complexo estuarino.

4.1.1.4 *Fluxo Fluvial:*

Responsável pelo aporte de água doce das bacias hidrográficas, a dinâmica de vazão de água doce controlado pela sazonalidade climática, sedimentos e nutrientes provenientes da erosão dos canais fluviais. Durante o período de maior precipitação pluviométrica (no primeiro semestre do ano) contribui em aumentar as lagoas costeiras, alterando as estruturas pedológica e físico-química do solo, alterando a salinidade e disponibilizando nutrientes nos setores de apicum e mangue. A entrada de sedimentos provenientes dos canais fluviais durante a cheia, atua como no processo dinâmico relacionado com a morfologia do leito e as margens dos canais estuarinos. Os bancos de areia e argila dispostos nas desembocaduras dos rios Jaguaribe e Tapuio, passam por processos erosivos e de deposição, contribuindo com a hidrodinâmica estuarina.

4.1.1.5 *Fluxo Subterrâneo:*

Movimento da água armazenada nos aquíferos localizados nos campos de dunas, planície pré-litorânea, terraços marinhos na direção dos complexos estuarinos. O campo de dunas, o sistema de drenagem superficial, a linha de costa, os terraços marinhos e o tabuleiro pré-litorâneo, são indicadores morfológicos para a identificação preferencial do fluxo subterrâneo que atuam como ambientes de recarga do aquífero. Tem uma forte relação com a vazão do sistema estuarino, lagoas e lagoas costeiras, já que influência as condições hidrodinâmicas e os processos sedimentares, físico-químicos e biológicos dos complexos estuarinos, quando no período de maiores precipitações pluviométricas, o conteúdo de água no aquífero aumenta, sendo conseqüentemente repassado para as lagoas costeiras e sistemas fluvial e fluviomarinho. No campo de dunas móveis no Baixo Jaguaribe e em Camocim, a presença de lagoas interdunares, o tamanho e nível de água podem indicar se o período de maiores precipitações proporcionou recargas importantes ou se foram insuficientes para manter espelhos de água perene nos brejos interdunares. A instalação dos parques eólicos sobre o campo de dunas móveis produz segmentação de algumas lagoas interdunares, afetando o sistema natural de recarga da lagoa e, por conseguinte, do aquífero. O fluxo hidrodinâmico e a pressão hidrostática exercidos pelo aquífero na zona de contato entre a água doce e a

salgada mantêm a disponibilidade de água doce para esta região. Dois exemplos da utilização de água doce, estão no abastecimento de água na comunidade do Cumbe em Aracati e Xavier em Camocim, sendo que as águas proveem do aquífero localizado no campo de dunas móveis.

4.1.1.6 *Fluxo Fluviolacustre:*

Relacionado com a disponibilidade de água doce superficial para o sistema estuarino, sobre influência do aquífero e das oscilações da maré, estas últimas quando contribuem ao rompimento das flechas de areia, possibilitando a formação de pequenos deltas de maré. Nos períodos de baixa vazão fluvial, a integração dos fluxos litorâneos e eólico possibilitaram o aporte de sedimentos que possibilitaram o fechamento dos canais estuarinos. Dependendo da vazão fluvial em períodos chuvosos, as flechas de areia são rompidas, restabelecendo a dinâmica com as marés, como ocorre entre as comunidades de Xavier e Maceió, em Camocim.

4.1.1.7 *Processo Gravitacional:*

Envolve o escorregamento de areia e argila das margens dos estuários, assim como corridas de lama associados aos depósitos de mangue, produzindo alterações na dinâmica morfológica dos canais, como ocorre na desembocadura do rio Jaguaribe e rio Tapuio. Estes processos geralmente estão relacionados com a amplitude das marés e quantidade de precipitação pluviométrica. As falésias vivas afetadas por movimentos em massa promovem fontes de sedimentos para os fluxos litorâneos e fluviomarinhos, como no caso das falésias entre Canoa Quebrada, Quixabá, Majorlândia até a praia de Ponta Grossa no litoral leste, e as falésias na foz do rio Coreaú em Camocim. Tendo nas áreas de estudo um trecho de falésias vivas, destaca-se que a direção predominante das ondas que atingem a plataforma de abrasão, pode remobilizar os sedimentos não consolidados e atingir a base do maciço sedimentar, promovendo a erosão tanto das escarpas como do sopé da falésia, induzindo tipos de movimentos de massa tais como desmoronamentos, quedas de blocos, escorregamentos e deslizamentos. De acordo com Meirelles (2016), as correntes pluviais e as ondas do mar são energias modeladoras que associadas com características sedimentológicas e estruturais dos sedimentos da

Formação Barreiras e as interferências humanas, originaram falésias com níveis (terraços) vinculados aos processos erosivos diferenciais. Destacam dois níveis, o primeiro com sedimentos areno-argilosos e conglomeráticos mais susceptível à erosão pluvial; o segundo com sedimentos argilo-arenosos que é submetido à ação das ondas.

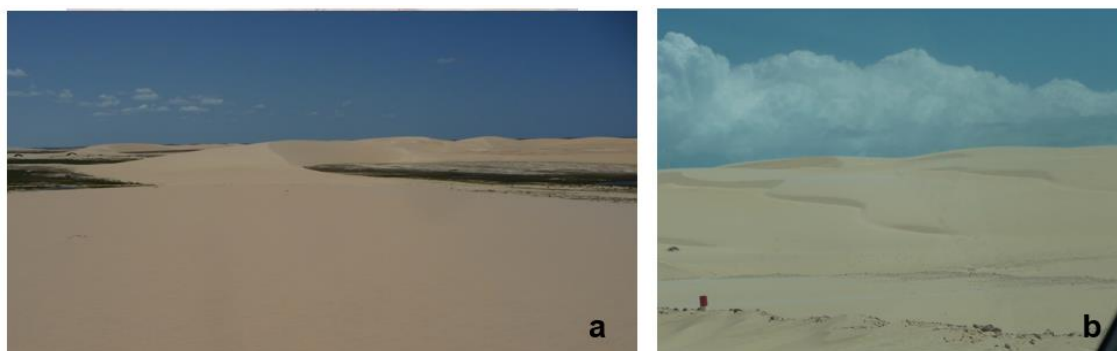
4.1.2 Unidades Geoambientais

4.1.2.1 Campo de Dunas Móveis:

Conjunto de depósitos eólicos, sem cobertura vegetal, cujos sedimentos possuem uma granulometria fina a muito fina, possuem uma morfologia variável. Em Aracati, foram identificadas dunas longitudinais (Figura 18) onde está localizado o parque eólico próximo a localidade de Cumbe, dunas barcanóides expressivas ao sul do campo de dunas, próximo às localidades Beirada e Canavieira, assim como lençóis de areias, identificados como acumulações de areia livre sem forma definida, próximo ao campo de dunas móveis. Não foram observadas dunas barcanas. O campo de dunas é uma unidade geoambiental altamente dinâmica, que funciona como indicador de mudanças, mostrando variações da precipitação pluviométrica, direção e velocidade dos ventos, dinâmica hidrostática do aquífero e associações fitoecológicas. O parque eólico sobre o campo de dunas próximo à comunidade do Cumbe, pode estar afetando o fluxo de areia que migra na direção da margem direita o Rio Jaguaribe e os canais de maré, afetando o aporte de sedimentos no sistema estuarino e praial, assim como os bancos e flechas de areia no sistema fluviomarinho, bem como a impermeabilização de setores do campo de dunas que contribuem nas oscilações do lençol freático.

Em Camocim, foram identificadas dunas barcanóides e algumas barcanas com alturas entre 35 e 50 m, nas quais predominam no lado do barlavento as marcas de ondulação (*ripple marks*) decorrentes do movimento de saltação dos sedimentos. A disposição na forma de cristas e brejos dunares favorece a formação de lagoas interdunares sazonais e outras permanentes, assim como a identificação das marcas espaço direcionais que mostram como foi o avanço das dunas ao longo do tempo (Figura 18).

Figura 18 - a. Dunas barcanóides no campo de dunas móveis em Camocim. b. Dunas longitudinais no campo de dunas móveis em Aracati



Fonte: Gloria Durán (Agosto 2017).

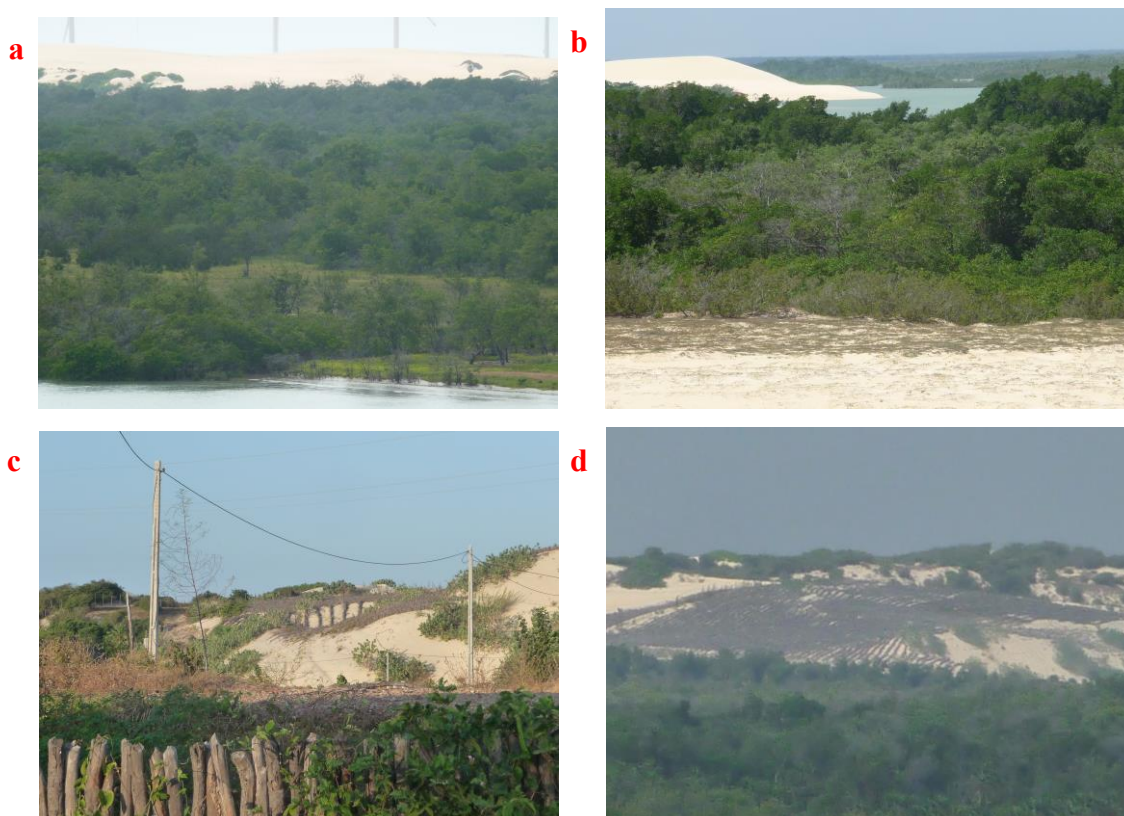
4.1.2.2 *Campo de Dunas Fixas:*

Típico depósito eólico, mais antigo geologicamente, cuja morfogênese está associada ao retrabalhamento dos ventos sobre os sedimentos de praias e da plataforma continental, com uma cobertura vegetal mais densa de herbáceas e componentes arbóreo-arbustivo. Pedrosa (2016) refere-se a estas dunas como paleodunas. Os *geomorphons* mostraram feições curvas com crista e vale, semelhantes às dunas móveis, mas que no ortofotos encontram-se com cobertura vegetal, estas características permitiram identificar as dunas fixas, algumas no contato com as áreas de manguezal e outras próximas a antiga comunidade Olho d'água em Aracati, assim como as dunas fixas localizadas ao sul do campo de dunas móveis em Camocim e próximas a planície fluvio-marinha na foz do Rio Tapuio.

A baixa concentração de dunas fixas ao redor do campo de dunas móveis em Aracati, 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). Neste caso fatores climáticos tais como precipitação e intensidade do vento podem interferir no processo de migração do campo de dunas, impedindo o estabelecimento de vegetação. Existem algumas dunas próximas a localidade do Cumbe que estão sendo fixadas de forma artificial devido a que o avanço natural em direção ao continente estaria afetando alguns locais onde se desenvolve a atividade de carcinicultura. Em Aracati 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) (Figura 19).

Figura 19 - a. Dunas fixas em Aracati. b. Dunas fixas em Camocim próximas a planície fluviomarinha na foz do Rio Tapuio no campo de dunas móveis em Aracati; c. e d. Dunas em processo de fixação natural e artificial em Aracati.



Fonte: Gloria Durán (Agosto 2018).

Na área de estudo em Camocim, as dunas fixas dispõem-se em forma de cristas esparsas, com aparência de colina, com sedimentos arenosos de granulometria média a fina, predomínio de quartzo, cuja coloração é branca, cinza e alaranjada; algumas delas sendo consideradas paleodunas por Dias (2015) pela coloração avermelhada pela presença de óxidos de ferro.

4.1.2.3 Cordões Litorâneos:

Estas barreiras inconsolidadas apresentam forma alongada e se distribuem paralelamente na linha de costa, localizados a jusante das planícies

fluviomarinhas. Próximo a foz do Rio Tapuio e na foz do Rio Jaguaribe, nesta faixa do litoral com amplas zonas de berma e estirâncio, muito planas, se formaram cordões arenosos (Figura 20). A morfodinâmica está sujeita aos processos costeiros, fluviais e eólicos e de morfogênese recente. Estas feições se distribuem conforme a direção da corrente de deriva litorânea, na época das cheias sazonais podem ser desconectados do continente, em época de seca tem efeito no transporte eólico. Os cordões eventualmente contribuem na formação de praias, dunas e na dispersão da vegetação de restinga.

Figura 20 – Cordão litorâneo em Camocim próximo a foz do Rio Tapuio



Fonte: Gloria Durán (Agosto 2018).

4.1.2.4 Faixa de Praia:

Essa unidade, de acordo com Goudie (2006) e Fontes (2011) corresponde a acumulação deposicional de sedimentos inconsolidados, cujo tamanho varia entre areias finas e cascalho e se estende em direção a costa, do limite médio de marés baixas até o limite médio de maré alta ou alguma alteração fisiográfica como uma falésia, um campo de dunas ou a planície de deflação eólica. As áreas de estudo caracterizam-se pela presença de extensas faixas de praia, em Aracati, desde Canoa Quebrada até a desembocadura do rio Jaguaribe (Figura 21). A presença de falésias é marcada na praia de Canoa Quebrada, passando por Majorlândia, Quixabá estendendo-se até Icapuí. Neste trecho, a faixa de praia é a área limitada entre o tabuleiro e a zona de estirâncio.

Em todo esse trecho foram observadas falésias vivas, já que ainda recebem o impacto constante da dinâmica das marés e das ondas, assim como também representam o limite da faixa de praia para estas áreas. A faixa de praia é

mantida pelo transporte de sedimentos através dos ventos, ondas e marés. Ao longo das praias da área de estudo foram identificados trechos de erosão na faixa de praia.

Na área de estudo em Camocim, a faixa de praia apresenta praias arenosas com algumas áreas rochosas (Figura 21). Os sedimentos arenosos na praia são mais grosseiros do que os encontrados no campo de dunas, com alguns restos de conchas e pequenos seixos de provável origem fluvial nas zonas próximas a foz dos rios.



Figura 21 - a. Faixa de praia próxima ao campo de dunas móveis em Aracati. b. Faixa de praia próxima da comunidade de Xavier em Camocim.

Fonte: Gloria Durán (Agosto 2017).

As áreas rochosas encontradas tanto na faixa de praia como na pós-praia são caracterizadas por promontórios rochosos (pontas), *beachrocks* e plataforma de abrasão/recife de arenito que destacam na foz do Rio Coreaú e na foz do Rio Tapuio – Remédios. De acordo a Meireles (2016) estes recifes (arenitos de praia), formam quebra-mares constituindo proteção da costa ao dissipar parte da energia das ondas. Os recifes de arenito são uma feição presente no litoral de Camocim cuja composição dominante é de grãos de quartzo e quartzito, cimentados por óxido de ferro e tem a origem de seus componentes relacionados à Formação Barreiras, base geológica principal da área, que propiciam a fixação de algas e comunidades bentônicas (BAPTISTA, 2010; ÂNGULO; SOUZA, 2014). Essa formação fica exposta em marés baixas, sendo visível principalmente em marés de sizígia. A diferença com os *beachrocks* segundo Ângulo; Souza (2014) consiste na localização na paisagem, já Vousdoukas et al. (2007) destacam o processo de cimentação das rochas litificadas através da precipitação de cimentos carbonato de cálcio.

4.1.2.5 Brejo e Lagoa Interdunar.

Dispostas nas depressões dos campos de dunas, associadas à recarga do aquífero, à sazonalidade climática e migração dos campos de dunas. No período de maiores precipitações pluviométricas, o lençol freático aflora, formando lagoas interdunares alongadas no brejo interdunar, na direção das marcas espaço temporais de migração das dunas, além da colonização de vegetação pioneira e ribeirinha próxima a estas lagoas e vegetação aquática no interior de algumas lagoas (Figura 22).

Figura 22 - Marcas espaço-temporais e lagoas interdunares, próximas à localidade de Maceió em Camocim.



Fonte: Semace (2014), Gloria Durán (Agosto, 2017).

Muitas destas lagoas são efêmeras, já que representam o afloramento do lençol freático no período chuvoso. No período de seca, diminui o lençol freático, as lagoas são reduzidas e se intensifica a migração das dunas, soterrando setores de lagoas. No período chuvoso seguinte parte das lagoas foi deslocada pelo avanço das dunas e outras se mantêm com variações na sua morfologia. De acordo com Claudino Sales (2002), as regiões onde as dunas barcanas e barcanóides se formam são caracterizadas pela existência de lagoas intermitentes periódicas (Figura 23).

Figura 23 - a. Brejo interdunal. b e c. Lagoas interdunares entre dunas barcanóides em Camocim em época de seca.



Fonte: Semace (2014), Durán (Agosto, 2017).

Estas áreas próximas a planície de deflação, foram denominadas por Silva (1998) planícies de aspersão eólica, por ser unidades tipológicas da paisagem que atuam como corredores de vento, através dos quais ocorre o transporte de sedimentos arenosos para o campo de dunas. Nessas áreas, quando estabiliza a ação eólica, forma-se uma vegetação rasteira e também as lagoas interdunares e brejos, que são terrenos úmidos propícios ao plantio, conhecidos localmente como “vazantes”, caracterização que coincide com as afirmações de Meireles (2012) e Mendes (2016). Nas proximidades da comunidade de Xavier em Camocim, as áreas de vazante/brejos interdunares são utilizadas para cultivos agrícolas tais como: hortaliças, feijão, milho, batata-doce, macaxeira (mandioca), cana-de-açúcar, pimentão, cajueiro e coqueiros, sendo esta uma forma de agricultura de subsistência que contribui com renda e alimentação das famílias que moram no local, como foi constatado nos trabalhos de campo e por Mendes (2016) (Figura 24). No setor sudeste do campo de dunas em Cumbe, próximo às localidades Beirada e Canavieira, as áreas de vazante/brejos interdunares também são utilizadas na agricultura de subsistência e uso turístico com a presença de restaurantes, tirolesas e trânsito de bugies (Figura 24).

Figura 24 - a. Área de vazante próxima à comunidade de Xavier em Camocim. b. Área de vazante próxima à localidade Canavieira em Aracati.



Fonte: Durán (Agosto, 2017).

Um processo de soterramento de lagoas interdunares foi efetivado com a construção das vias de acesso aos parques eólicos sobre o campo de dunas móveis nas duas áreas de estudo, realizado com o material arenoso proveniente dos cortes realizados em dunas fixas e móveis, provocando na maioria dos casos, a perda de uma área receptora natural de água.

4.1.2.6 *Planície de Deflação:*

Estas superfícies representam áreas de transição ativa ou estabilizada, por onde há ou houve recarga de dunas, fazendo parte do sistema que inclui dunas, lagoas interdunares e eolianitos. São superfícies planas, com composição litológica de areias finas e quartzosas bem selecionadas que se estendem desde o limite de maré alta até a base dos campos de dunas. Em Aracati, a planície de deflação pode ser considerada ativa, já que possui vegetação herbácea pouco densa.

Com o objetivo de criar terrenos para a construção civil, nas praias de Quixabá, Majorlândia, Canoa Quebrada, foram registradas atividades relacionadas com terraplenagem de áreas de falésias, desmatamentos no topo das encostas que induzem os processos de ravinamento, assim como o incremento do escoamento superficial, provocando erosão pluvial que sendo um evento natural é acelerada pela intervenção humana, tal como menciona Meireles (2016). Entre Canoa Quebrada e o parque eólico sobre as dunas móveis, na planície de deflação, estão sendo criados e vendidos loteamentos, que por estar localizados numa superfície onde a dinâmica

eólica de transporte de material favorece acumulações de areia, mostra a inviabilidade de construção civil. Estas construções comportam-se como barreiras físicas que se interpõem ao transporte eólico, favorecendo a ocorrência de *nebkas* (Figura 25). As *nebkas* em Camocim têm uma origem semelhante.

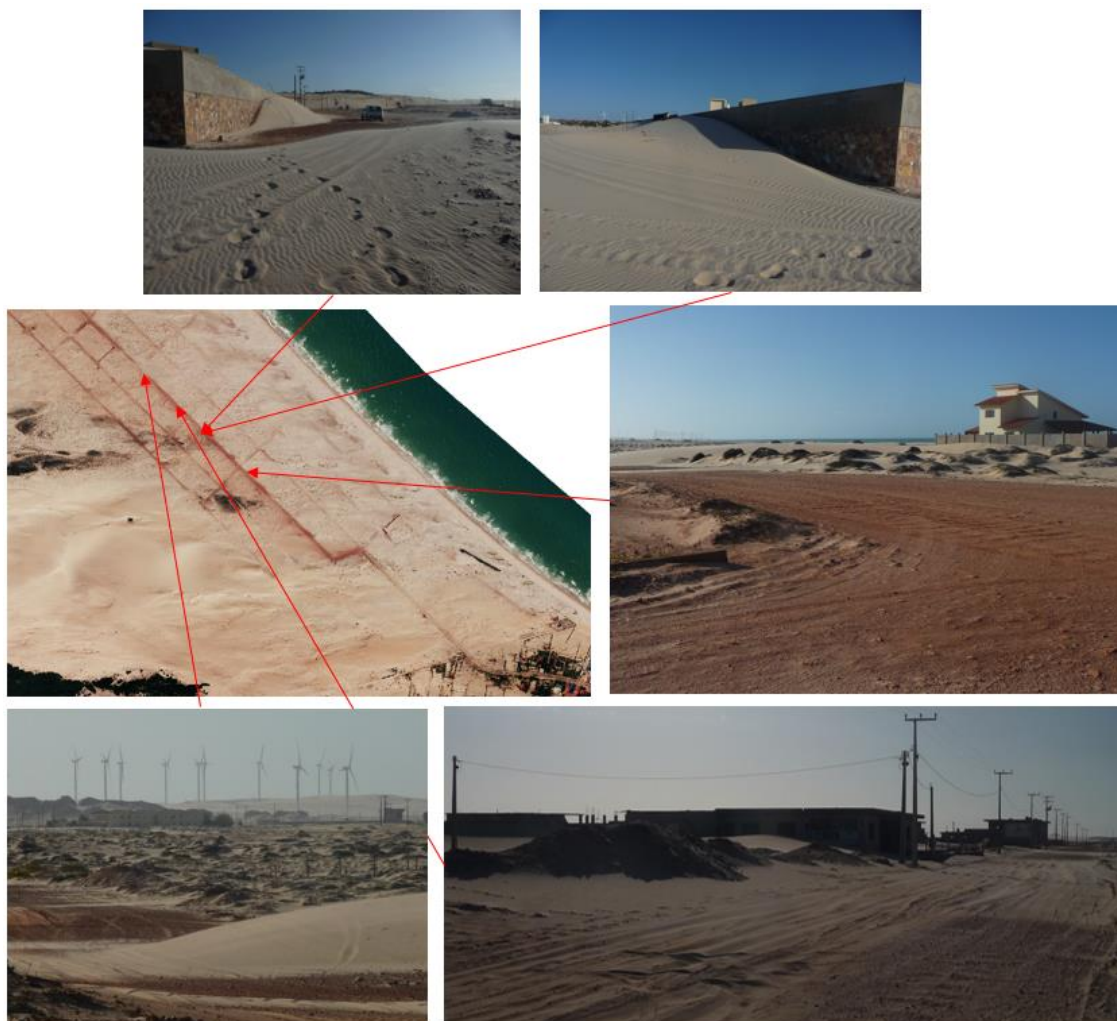
Figura 25 - a. Ocorrência de *nebkas* em loteamento próximo à Canoa Quebrada. b. Ocorrência de *nebkas* em Camocim.



Fonte: Durán (Agosto, 2017).

Na Figura 26, pode ser observado que são construídos muros cercando as edificações, atuando como barreiras antrópicas para conter a movimentação de areia. Mas pela dinâmica de transporte de material e ventos contínuos, cujo destino é o campo de dunas móveis, estas barreiras acabam formando acúmulos de areia que vão se incrementando até que o material invade o interior das construções. Esta situação é previsível, já que foi constatado que algumas casas em construção estavam sendo invadidas pela areia, o que demonstra que esses loteamentos estão localizados numa área que não é apta para construção civil, mas que respondem ao interesse econômico.

Figura 26 - Dinâmica eólica afetando construções em um loteamento sobre a planície de deflação próximo à Canoa Quebrada em Aracati.



Fonte: Semace (2014), Durán (Agosto, 2017).

A planície de deflação no Camocim possui setores ativos e inativos que foram separadas, para fins de mapeamento, por apresentarem processos morfodinâmicos diferentes e ser identificáveis nas imagens e no trabalho de campo: nas superfícies ativas a vegetação é herbácea e pouco densa, enquanto nas superfícies estabilizadas a cobertura vegetal é mais densa e são encontradas além de herbáceas, outras espécies de pequeno porte.

4.1.2.7 Planície Fluvial

Esta superfície de acumulação de sedimentos, resultado morfodinâmico dos processos fluviais (PEDRAZA, 1996), onde ocorre o escoamento superficial e a aportação da água doce proveniente dos rios e a recarga dos aquíferos, está associada aos maiores rios das áreas de estudo que escoam num sistema deposicional continental de morfogênese recente. Destacam os sistemas fluviais de regime intermitente, cuja descarga fluvial se reduz na época de seca. Os rios de regime permanente e de maior largura tais como Rio Jaguaribe em Aracati e os Rio Coreaú e Rio Tapuio em Camocim, apresentam-se nas áreas da planície, sobre influência do litoral. Nesta área os desníveis topográficos são pouco expressivos e de sedimentos com textura predominantemente areno-argilosa, comparado com as superfícies circunjacentes mais aplainadas e pedregosas. Alguns trechos dos rios apresentam terraços aluviais e planície de inundação cobertos com areia muito fina e silte, áreas que coincidem com locais de mineração de areia como foi constatado no Rio Coreaú no trecho próximo ao açude Gangorra em Granja e em outro lugar próximo ao manguezal do mesmo rio, mais próximo a cidade de Camocim (Figura 27). De um modo geral, as planícies fluviais são circundadas por vegetação arbóreo/arbustiva com função ciliar. Nas áreas mais planas, o leito fluvial clássico transforma-se em planícies amplas e rasas, onde ocorre vegetação de várzea, como por exemplo, carnaúba.

Figura 27 - Mineração na planície aluvial do rio Coreaú.



Fonte: Durán (Agosto, 2017).

4.1.2.8 Planície Fluviomarinha:

É a superfície plana do estuário onde desembocam o Rio Jaguaribe em Aracati, e os Rio Coreaú e Rio Tapuio (Figura 28) em Camocim. Nesta área os rios encontram-se com o Oceano Atlântico, sendo, por tanto, influenciado pelas marés, onde o encontro do material orgânico trazido pelos rios com os trazidos pelas marés forma um campo fértil para o estabelecimento de manguezais, que de acordo com Meireles (2016) e Leal (2003) é um ecossistema litorâneo que ocorre em terrenos baixos, sujeitos à ação das marés baixa e alta, formado por solo tipicamente argiloso, rico em matéria orgânica, às quais se associa, predominantemente, a vegetação natural conhecida como mangue, com influência fluviomarinha, típica de solos limosos de regiões estuarinas.

Figura 28 - Foz do rio Tapuio em Camocim.



Fonte: Durán (Setembro, 2016).

Nesta unidade geoambiental estão os setores de apicum ou salgado, que são áreas alagadas periodicamente pelas oscilações de maré e pelas variações sazonais da descarga fluvial, que deixam sobre seu solo arenoso um tapete de fitoplâncton (algas e bactérias), início da cadeia alimentar que mantém todo o ecossistema. Espécies como *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia schaueriana* são de ocorrência comum nas áreas de estudo (Figura 29).

Figura 29 - Área de manguezal na planície fluvio-marinha do rio Jaguaribe, em Aracati, ao fundo o parque eólico sobre o campo de dunas móveis.



Fonte: Semace (2014), Durán (Novembro, 2017).

Sobre a planície fluvio-marinha, estão instaladas as fazendas produtoras de camarões, alocadas, em sua maioria, no manguezal, e outras na margem do Rio Jaguaribe (Figura 30).

Figura 30 - a,b,c. Construção de tanques de carcinicultura na planície fluvio-marinha do rio Coreaú, Camocim. d. Tanque sem água para produção de camarão em Cumbe, Aracati. e. Criadouro de camarão em Cumbe, Aracati. f. Construção de tanque para criação de camarão no rio Coreaú, Camocim.



Fonte: Durán (Dezembro, 2017).

O crescimento desta atividade vem sendo associado à destruição do manguezal, além de atingir a mata ciliar e carnaubais e causar danos cumulativos às bacias hidrográficas onde se inserem, aspecto mencionado pelos moradores da

comunidade do Cumbe e discutido por Ribeiro et al. (2014) e Meireles (2016). As fazendas produtoras de camarão nos Rio Coreaú e Rio Tapuio em Camocim, encontram-se instaladas ao longo do manguezal próximo a estes rios, e como foi constatado em campo, a construção de novos tanques é indicativo de expansão desta atividade produtiva (Figura 30).

4.1.2.9 *Planície Fluviolacustre:*

Associada ao tabuleiro pré-litorâneo, desenvolvida a partir da interação entre o sistema fluvial e o sistema eólico, representando as relações com o campo de dunas e a faixa de praia. Esta unidade geoambiental apresenta-se em Camocim. A Lagoa Amarelas, Lagoa da Cangalha, Lagoa do Boqueirão e Lago Seco são as evidências de lagoas costeiras associadas ao fechamento do canal fluvial e da desembocadura dos rios pela migração dos campos de dunas e flechas de areia, sendo uma sequência de lagoas fragmentadas ao ser interceptados ou assoreadas pela ação das dunas móveis. Desta forma, os rios com baixa competência de transporte durante as fases de estiagem, converte-se em lagoas de formas alongadas, preservando a morfologia do canal fluvial, normalmente com regime perene e um espelho de água cuja extensão depende das variações do nível hidrostático e da vazão fluvial, em resposta às variações da descarga fluvial e da mobilidade do campo de dunas. Como parte da dinâmica das lagoas costeiras, os canais de ligação do sistema lacustre com o mar podem ser periodicamente desbloqueados pelo fluxo fluvial, que resulta em aporte de areia para a deriva litorânea; mas em alguns casos não apresentam conexão com o mar.

4.1.2.10 *Tabuleiro Pré-Litorâneo:*

É a unidade geoambiental com maior superfície nas áreas de estudo, são feições geomorfológicas características de ambientes deposicionais no continente, destacando-se a presença de depósitos conglomeráticos e sedimentos mal selecionados, tais como areia, argila, cascalho e silte; sendo correlacionados à Formação Barreiras. Esta unidade se estende por todo o litoral cearense, e no caso das áreas de estudo, encontra-se mais dissecada no lado oeste do Camocim. Nas bordas dos tabuleiros, podem ocorrer falésias, que na margem esquerda na foz do

rio Coreaú (corresponde a um afloramento da Formação Camocim) e no litoral de Aracati desde Canoa Quebrada até a praia de Ponta Grossa, afloram na linha de costa e são retrabalhadas pela dinâmica costeira e/ou fluvial, sendo falésias vivas. Esta unidade geoambiental é caracterizada pela predominância de relevo plano a suavemente ondulado, com altitude média em torno de 30 a 40 m, apresentando menor efeito de rugosidade na circulação dos ventos comparado com os campos de dunas. De acordo com Meireles (2016), o tabuleiro costeiro pode ser uma alternativa locacional de parques eólicos, como foi constatado em Aracati com a instalação de aerogeradores nessas áreas, próximos às localidades de Majorlândia e Quixabá (Figura 31).

Figura 31 - Aerogeradores instalados sobre o tabuleiro pré-litorâneo em Aracati



Fonte: Durán (Agosto, 2017).

O tabuleiro pré-litorâneo como unidade geoambiental proporciona uma amostra da compartimentação da unidade geomorfológica que configura a unidade morfopedológica. De acordo com Pereira e Silva (2005) e Pedrosa (2016), os solos na área de estudo em Aracati são formados por areias quartzosas, excessivamente drenados, muito ácidos e com baixa fertilidade natural, associados a feições de praia, campo de dunas móveis e planície fluvio-marinha do baixo Rio Jaguaribe, que apresenta associações de neossolos flúvicos, planossolos e vertissolos.

Na área de estudo em Camocim, de acordo com Dias (2015) e Moro et al. (2015) predominam os solos de tipo argissolos vermelho-amarelos e neossolos quartzarênicos. Sobre os tabuleiros pode se encontrar uma floresta semidecídua de médio porte chamada mata de tabuleiro, com uma flora que mistura elementos do cerrado e caatinga, por este motivo, Fernandes (2007); Castro et al. (2012), Moro et

al. (2015) destacam que a vegetação sobre o tabuleiro pré-litorâneo é um complexo florístico, dada a co-participação de elementos da vegetação vizinha: mata, caatinga e formações esclerófilas - cerrado e cerradão.

Exemplos de vegetação de tabuleiro pré-litorâneo encontrada são: caraíba (*Tabebuia caraíba*), arapiroca (*Pithecellobium foliolosum*), freijó (*Cordiaa trichotoma*), angelim (*Andira retusa*), cajueiro (*Anacardium occidentale*), chaparro (*Curatella americana*), juazeiro (*Ziziphus joazeiro*) e mandacaru (*Cereus mandacaru*).

4.1.2.11 Eolianito:

A ocorrência de eolianitos está associada a eventos transgressivos e condições climáticas favoráveis para cimentação dos grãos de quartzo. Estão posicionados ao longo da linha da costa oeste do Estado do Ceará, no caso da área de estudo em Camocim. Encontram-se normalmente na planície de deflação, entre a faixa de praia e o campo de dunas móveis à retaguarda. O uso dos *geomorphons* permitiu a identificação sobre os ortofotos para fins de mapeamento (Figura 32). De acordo com Meireles (2016), os eolianitos com uma mineralogia especial rica em biodetritos e algas calcárias, devem sua origem à remobilização das areias pela ação dos ventos, durante uma fase regressiva do mar. As condições atmosféricas mais úmidas permitiram a dissolução dos materiais carbonáticos e, nos períodos de aridez ocorreu, a precipitação que levou à cimentação dos grãos de quartzo, produzindo uma diagênese fraca a média.

Os eolianitos possuem uma estrutura sedimentar de estratificação plano-paralela. Atualmente estes depósitos são impactados por processos de deflação, expondo os estratos, as camadas cimentadas, a presença de concreções carbonáticas na forma de raízes vegetais (estruturas tubulares verticais) e de estruturas originadas por organismos (tubos de vermitídeos) (Figura 33).

Os eolianitos estão orientados na direção atual dos ventos (predominantemente de leste para oeste), com faixas interdunares por onde transitam as areias que formam as dunas móveis que migram para o interior do continente. Estes fatos permitem inferir que os ventos mantiveram a mesma direção, desde a formação dos eolianitos.

Figura 32 - Eolianitos vistos nas ortofotos e em visita de campo nas proximidades da comunidade de Maceió em Camocim.



Fonte: Semace (2014), Durán (Agosto, 2017).

Figura 33 - a. Estratificação plano-paralela dos eolianitos. b. Raízes petrificadas (rizocrisol) em forma de estruturas tubulares verticais na planície de deflação em Camocim.



Fonte: Durán (Agosto, 2017).

4.1.2.12 *Beach Rocks:*

Também chamados de arenitos de praia, foram constatados afloramentos ao longo da planície existente entre as desembocaduras dos estuários dos rios Coreaú e Tapuio. Na praia de Xavier *beachrocks* ocorrem na zona de estirâncio e estão posicionadas, preferencialmente, próximo a desembocadura dos estuários (Figura 34). Este tipo de rocha, que é produto da litificação de uma variada granulação de sedimentos re trabalhados pelas ondas e marés, passou por eventos favoráveis à cimentação, que incluem baixo ou nulo fluxo de sedimentos e água intersticial rica em carbonatos, portanto, pode ser um indicador de nível do mar em distintos eventos regressivos e transgressivos.

Figura 34 - Beachrocks na praia de Xavier em Camocim.



Fonte: Semace (2014), Durán (Dezembro, 2017).

4.1.2.13 *Falésias:*

As falésias marinhas constituem costas rochosas caracterizadas pela erosão devido à alta energia das ondas. A ação da erosão, quando causa retrogradação, representa um fator negativo, mas pode ser considerado positivo na alimentação com sedimentos de praias adjacentes (SUGUIO, 2003). Nas áreas de estudo estão presentes as falésias marinhas esculpidas na Formação Barreiras e Camocim.

No trecho entre Canoa Quebrada e nas proximidades da praia de Ponta Grossa, ao sudeste da área de estudo, foram observadas falésias (Figura 35), que de acordo com Morais et al. (2002) são testemunhos de Formação Barreiras. Os

sedimentos da Formação Barreiras, segundo Branco (2003), são constituídos por depósitos plio-pleistocênicos que em função das variações litológicas, tonalidades, estruturas sedimentares e inter-relações das fácies, são caracterizadas em três classes: a primeira classe marcada pelo predomínio de seixos de quartzo em relação à matriz areno-argilosa; a segunda classe de fácies inclui as exposições areno-argilosa, de coloração avermelhada, aspecto maciço, com presença de grânulos de quartzo dispersos no arcabouço da rocha; a terceira classe corresponde aos depósitos areno-argilosos de coloração avermelhada e aspecto maciço que afloram no topo das sequências plio-pleistocênicos, como se observa nas falésias em Aracati.

Figura 35 - Falésias em Aracati



Fonte: Durán (Agosto, 2017).

Na foz do Rio Coreaú, afloram na forma de falésias os depósitos da Formação Camocim. Um dos afloramentos que são observados na praia do farol, apresenta os contatos bruscos dos conglomerados que compõem a formação, com presença de areias finas com material argiloso inconsolidado não estratificado, como pode ser observado na Figura 36.

Figura 36 - Falésia em Camocim, próximo da foz do rio Coreau



Fonte: Durán (Agosto, 2017).

De acordo com Morais (2000), a Formação Camocim que aflora na praia do farol, se refere a um ortoconglomerado grosseiro, cimentado por material laterítico sílico-ferruginoso de cores marrons, castanhos e vermelhos, extremamente duros.

Nas falésias de Quixabá e Majorlândia, o primeiro, e mais recentemente, o segundo nível, estão sendo gradativamente utilizados para construção de residências e vias de acesso, atividades que promovem os movimentos em massa das vertentes das falésias, assim como afetam a zona de recarga do aquífero, impermeabilizam a superfície, suprimem fontes naturais de água e contribuem com a expansão das voçorocas. Nestas localidades as falésias encontram-se em processo de retroerosão (Figura 37).

Na praia de Quixabá foi constatada a construção de muros de arrimo para proteção de áreas residenciais que estão sobre a falésia, mas a falta de manutenção, e em alguns casos, falhas no projeto de engenharia, já que não foram levados em consideração fatores como energia dissipada pelas ondas e a hidrodinâmica envolvida na zona de estirâncio, originaram recalques e rachaduras que provocaram finalmente a destruição dos muros e a retomada da erosão nas vertentes das falésias. Fenômenos como marés de tempestade podem atingir com maior intensidade estas falésias com áreas urbanizadas (Figura 37).

Figura 37 - Construções sobre as falésias em Quixabá e Retirinho, Aracati.



a. e b. Construções nas falésias na localidade de Retirinho

c. Evidencia de destruição de barreiras construídas pelos moradores, na praia de Quixabá. A maré chega na falésia de acordo a fase da lua. Segundo os moradores a queda do muro aconteceu no ano 2016.

Fonte: Durán (Agosto, 2017).

4.2 Detecção de mudanças

Para facilitar a apresentação de resultados, as análises foram divididas para cada área de estudo.

4.2.1 Aracati

As mudanças ocorridas na planície costeira do baixo Jaguaribe, no litoral leste do Ceará desde a década de 1970, estão registradas nas imagens da Série de satélites Landsat.

A Figura 38 mostram as mudanças nas áreas de estudo em Aracati desde a década de 1975 até o ano 2018. Através destas figuras pretende-se discriminar qualitativamente de forma geral, as áreas com água, o manguezal, o campo de dunas e as áreas com diferentes tipos de cobertura vegetal.

As imagens correspondentes ao sensor MSS, apenas possuem quatro bandas espectrais, limitando as combinações de bandas a falsa cor, por isso as

imagens apresentam-se com a combinação RGB 4-3-2, que permite definir limites entre solo e água, mostrando a vegetação em tons de vermelho e as dunas em tom de branco.

Nas imagens dos sensores TM, ETM+, foi utilizada a combinação RGB 4-5-3, enquanto para o sensor OLI foi utilizada a combinação RGB 5-6-4, considerada adequada neste trabalho em termos de interpretação visual, para identificação de culturas, realçar contrastes entre solo/cultura/tipos de cobertura vegetal e terra/água, ressaltar a rede de drenagem, a morfologia da superfície e para a delimitação de corpos de água e áreas mais úmidas. Alguns exemplos visíveis foram:

- A evolução no tempo das áreas dedicadas a Carcinicultura, cuja expansão foi sobre a planície fluvio-marinha do Rio Jaguaribe em Aracati, sendo que a partir de 1998, mostra uma maior velocidade, progredindo em sentido a um dos canais do manguezal, na margem direita do rio.
- O aumento e redução da superfície dos corpos d'água, assim como também da cobertura vegetal, deu uma ideia sobre anos mais secos e anos mais chuvosos. A partir de 1980 se aprecia a expansão das áreas de cultivos sobre o tabuleiro pré-litorâneo, em termos de forma, tamanho, distribuição, assim como as variações da cobertura vegetal por mudança em tipo de cultivo ou estado fenológico, em áreas que para 1975 eram ocupadas pela vegetação natural.
- A extensão dos corpos de água caracterizados como lagoas interdunares e a vegetação principalmente herbácea presente no brejo interdunal, permitem realizar algumas associações que correspondem com o aumento ou redução da precipitação nos anos correspondentes aos anos das imagens. As lagoas interdunares mostram suas maiores cheias da Série nos anos 1986 e 2009, seguidas dos anos 2007, 2011 e 2018.
- A movimentação do campo de dunas, segue em direção ao continente e a Foz do Rio Jaguaribe.

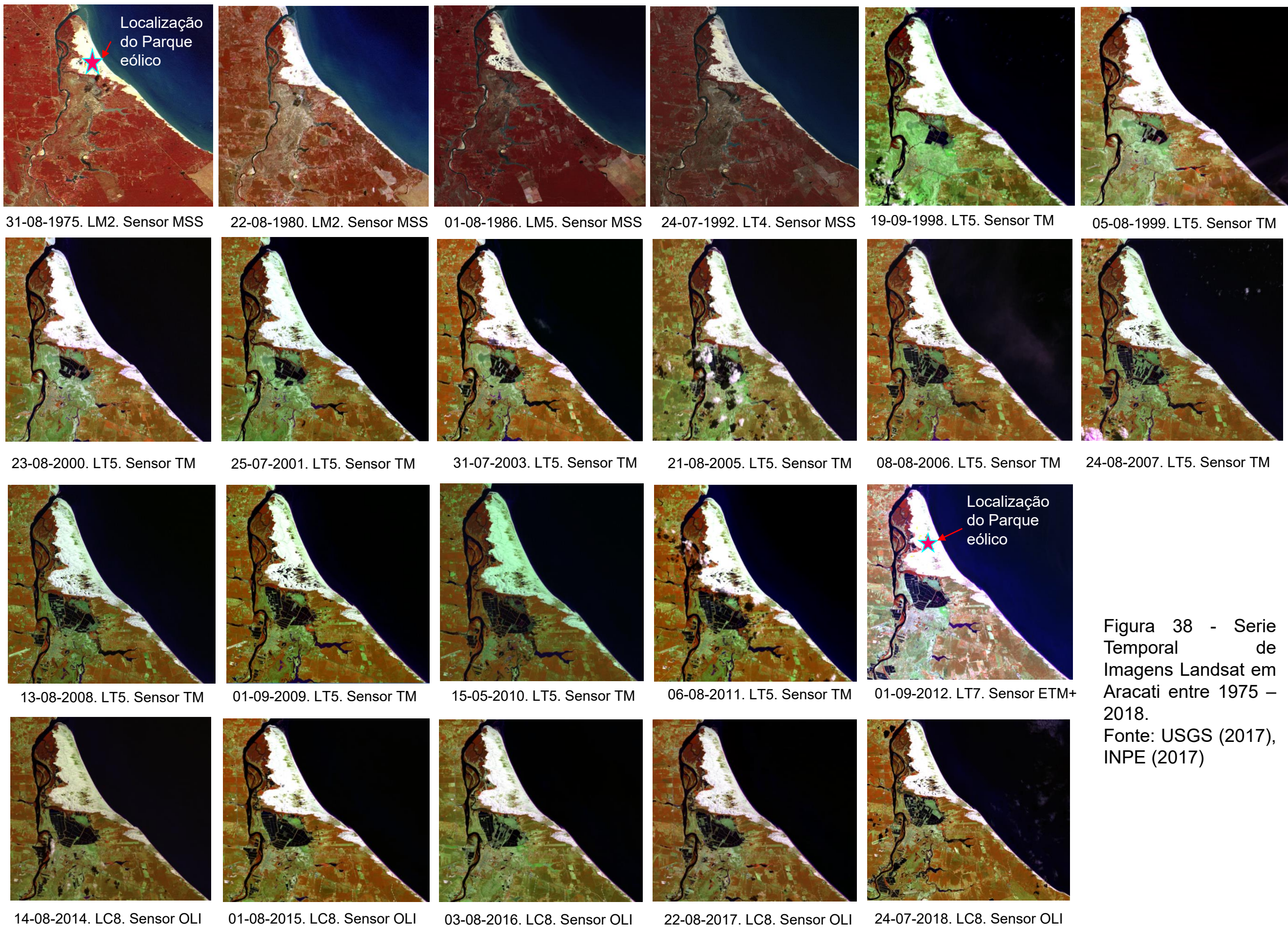


Figura 38 - Serie Temporal de Imagens Landsat em Aracati entre 1975 – 2018.

Fonte: USGS (2017), INPE (2017)

As imagens correspondentes ao sensor MSS, cuja resolução de 80 m atualmente pode ser considerada baixa, corresponde a um grupo de imagens que ainda são de valor significativo para este estudo, já que provam a existência e variação dos alvos ao longo do tempo.

A resolução espacial é outro fator que teve impacto no reconhecimento das classes de uso e cobertura assim como feições de menor tamanho tais como dunas, lagoas interdunares, construções de grande porte como os parques eólicos.

O classificador não paramétrico SVM, ajudou na melhor discriminação das classes, principalmente em casos onde a semelhança espectral de classes como arbustivos e cultivos de caju é alta. As áreas urbanas apresentaram uma mistura espectral pela diversidade de materiais que possuem.

No caso das áreas de Carcinicultura, inicialmente foram classificadas como corpos de água, já que não mostraram uma diferença espectral com outras lâminas de água. As áreas com os tanques de criação de camarão possuem divisórias cuja superfície pode ter solo exposto ou gramíneas, são feições cujo tamanho é consideravelmente menor do que a resolução espacial da imagem Landsat, mas o seu contraste com o objeto vizinho, que neste caso é o tanque de criação de camarão ativo ou inativo, é suficientemente alto, sendo possível identificar o alvo visualmente devido ao contraste espectral, mas não pela separação espectral que executa o classificador

Nos casos antes mencionados, na fase de pós classificação foram designadas as classes, de acordo com os casos onde foi observado o erro de classificação.

As imagens das áreas de estudo em Aracati, correspondentes a Figura 38, foram selecionadas considerando o princípio de um estudo multitemporal, que representassem as características de uso e cobertura numa mesma época do ano. Neste caso o maior número de imagens disponíveis, sem cobertura de nuvens corresponde ao mês de agosto, mas para alguns anos, nesta época do ano como mostra a Figura 38, não foi possível encontrar imagens sem nuvens. Para solucionar o problema, foram estabelecidas duas condições: 1) escolha de imagens representativas do período seco mais próximas possíveis ao mês de agosto (final de julho ou início de setembro). 2) se todas as imagens têm nuvens, aplicar o algoritmo: *ee.Algorithms.Landsat.simpleComposite*, para gerar uma imagem sem nuvens, utilizando como regra a primeira condição sobre as datas, para reduzir as mudanças

fenológicas que possam afetar o processo de classificação.

Embora a maioria das imagens corresponde a uma mesma época do ano, é possível observar diferenças nas cores dos alvos, relacionadas com as chamadas mudanças radiométricas e mudanças semânticas. Para reduzir estes problemas foram escolhidas imagens no produto reflectância de superfície, disponibilizado pela USGS no site: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

4.2.1.1 *Detecção de mudanças com o método de comparação pós-classificação*

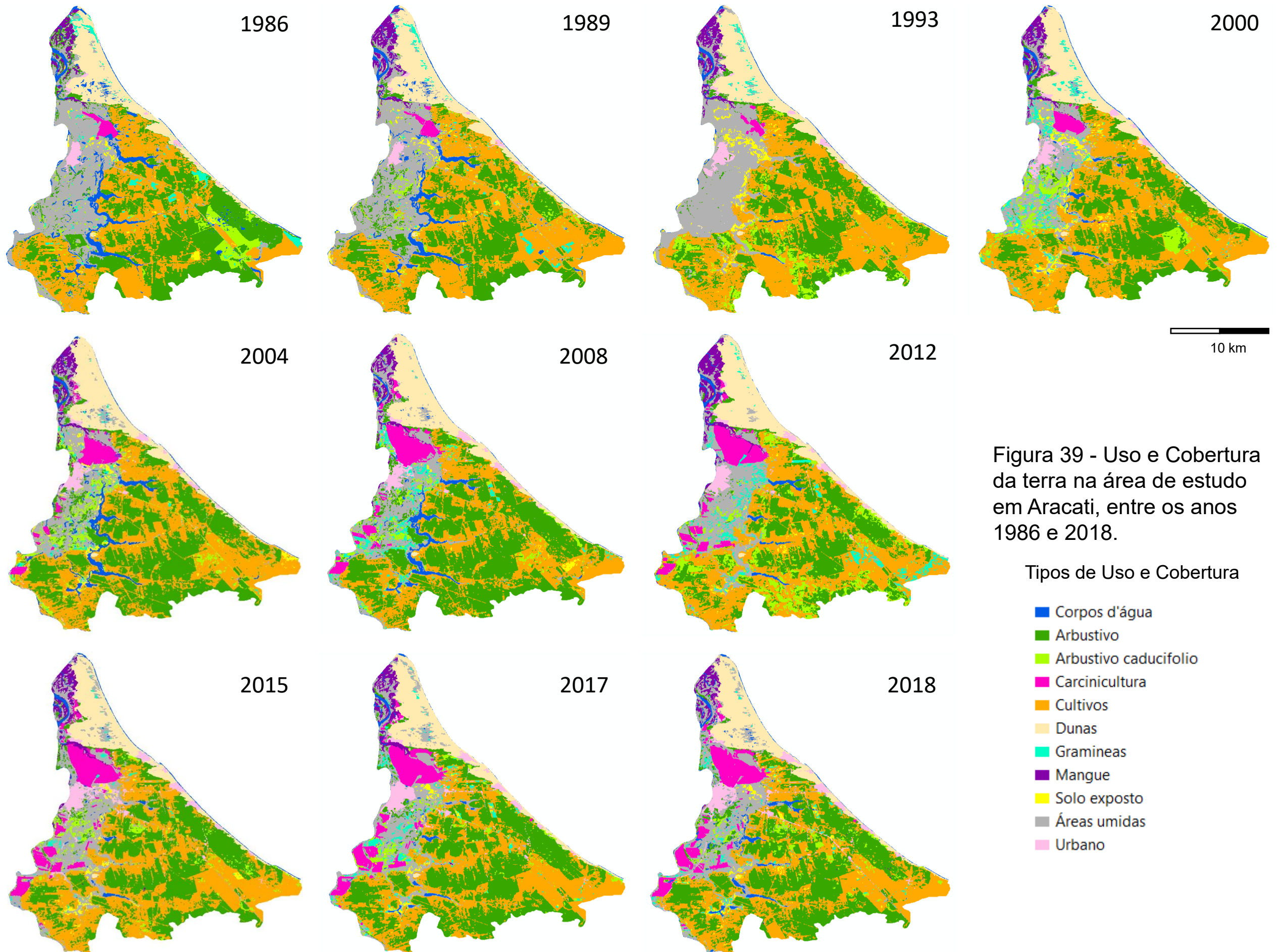
Os produtos da classificação das imagens Landsat TM, ETM+ e OLI utilizadas para a classificação de uso e cobertura da terra na área de estudo em Aracati, baseado nas áreas de treinamento e áreas de validação, obtiveram os valores de exatidão global e índice Kappa, apresentados na tabela 14, superando em todos os casos a exatidão de 85% mínima recomendada por Foody (2002) na classificação de imagens.

Tabela 14 - Valores de exatidão global e índice Kappa associadas as classificações de imagens na área de Aracati

Ano	Exatidão Global	Índice Kappa
1986	90,05	0,873
1989	89,45	0,867
1993	89,97	0,877
2000	87,29	0,844
2004	87,05	0,842
2008	87,31	0,851
2012	85,10	0,825
2015	89,07	0,865
2017	89,70	0,878
2018	88,58	0,864

Fonte: Duran (2020)

Na Figura 39, observam-se os resultados da classificação do uso e cobertura da terra na área de estudo em Aracati entre os anos 1986 e 2018, de acordo com as 11 classes estabelecidas.



1986

1989

1993

2000

2004

2008

2012

10 km

2015

2017

2018

Figura 39 - Uso e Cobertura da terra na área de estudo em Aracati, entre os anos 1986 e 2018.

Tipos de Uso e Cobertura

- Corpos d'água
- Arbustivo
- Arbustivo caducifolio
- Carcinicultura
- Cultivos
- Dunas
- Gramineas
- Mangue
- Solo exposto
- Áreas umidas
- Urbano

Na Tabela 15 e Figura 40, observam-se para cada ano de análise, a superfície total por classe e a mudança em termos de ganho ou perda de superfície num intervalo de anos, que proporciona uma ideia da evolução do uso e cobertura entre 1986 e 2018, sendo notável a perda da classe arbórea e o ganho da classe cultivos entre 2008 e 2012, depois de um comportamento inverso entre os anos 2000 e 2008. Outros exemplos são a redução das áreas úmidas e aumento das áreas com cobertura de gramíneas entre os anos 1994 e 2000 e um aumento dos corpos de água a partir do ano 2000. Foi constatado que geralmente quando existem períodos de seca, há uma redução da superfície dos corpos de água, aumenta a extensão das áreas úmidas e da cobertura de gramíneas, geralmente vinculadas a essas áreas úmidas.

Mas apenas a comparação das superfícies líquidas de ganhos e perdas, não mostra as relações de mudança em a proporção, intensidade, transição e hierarquia.

Classe	Area 1986 Ha	Mudanca da superficie	Area 1989 Ha	Mudanca da superficie	Area 1993 Ha	Mudanca da superficie	Area 2000 Ha	Mudanca da superficie	Area 2004 Ha	Mudanca da superficie	Area 2008 Ha	Mudanca da superficie	Area 2012 Ha	Mudanca da superficie	Area 2015 Ha	Mudanca da superficie	Area 2017 Ha	Mudanca da superficie	Area 2018 Ha
Corpos d'Água	2249,79	-508,78	1741,01	-1292,97	448,04	246,50	694,54	912,66	1607,20	-452,04	1155,16	-512,39	642,78	12,97	655,75	-140,94	514,81	418,71	933,52
Arbustivo	12178,78	-1719,66	10459,12	-642,36	9816,75	819,75	10636,50	2904,01	13540,51	1642,85	15183,36	-5844,21	9339,16	2655,05	11994,21	1855,90	13850,10	-723,07	13127,04
Arbustivo caducifolia	1608,04	-624,26	983,77	1116,49	2100,26	-186,34	1913,92	-200,70	1713,21	-456,70	1256,52	2141,86	3398,38	-2207,45	1190,93	-84,25	1106,68	-115,34	991,33
Carcinicultura	335,28	-10,56	324,72	-103,57	221,15	298,05	519,20	674,14	1193,35	668,61	1861,96	174,04	2036,00	407,95	2443,95	154,03	2597,97	-3,63	2594,34
Cultivos	11670,16	2988,78	14658,94	130,36	14789,30	472,41	15261,71	-2448,75	12812,96	-2377,15	10435,82	3266,32	13702,14	-267,97	13434,17	-1991,20	11442,97	169,59	11612,56
Dunas	3701,33	166,93	3868,27	44,37	3912,64	9,93	3922,57	-163,34	3759,23	252,88	4012,11	46,75	4058,86	-437,40	3621,46	181,23	3802,70	-77,67	3725,03
Gramineas	832,35	-284,41	547,94	-364,88	183,06	1140,97	1324,03	-929,53	394,50	820,01	1214,50	405,15	1619,66	-1403,36	216,30	786,86	1003,16	-342,28	660,88
Mangue	541,30	286,25	827,55	26,53	854,08	-58,47	795,61	23,43	819,03	-89,60	729,43	373,73	1103,16	-300,73	802,43	-26,58	775,84	-251,96	523,88
Solo exposto	342,67	75,63	418,30	484,35	902,64	166,89	1069,54	-536,19	533,35	-303,85	229,50	-27,99	201,51	237,43	438,94	-47,03	391,90	179,87	571,77
Área Umida	8203,61	-351,67	7851,94	385,91	8237,85	-3089,09	5148,76	-346,59	4802,17	367,24	5169,41	-41,65	5127,75	714,86	5842,62	-531,10	5311,52	634,96	5946,47
Urbano	398,36	-18,24	380,12	215,75	595,87	179,41	775,29	110,87	886,15	-72,26	813,89	18,38	832,27	588,65	1420,92	-156,91	1264,01	110,83	1374,85
Total	42061,66		42061,66		42061,66		42061,66		42061,66		42061,66		42061,66		42061,66		42061,66		42061,66

Tabela 15 - Superfície em ha correspondente a cada classe por ano, das mudanças líquidas entre cada classe de uso e cobertura entre 1986 e 2018 em Aracati.

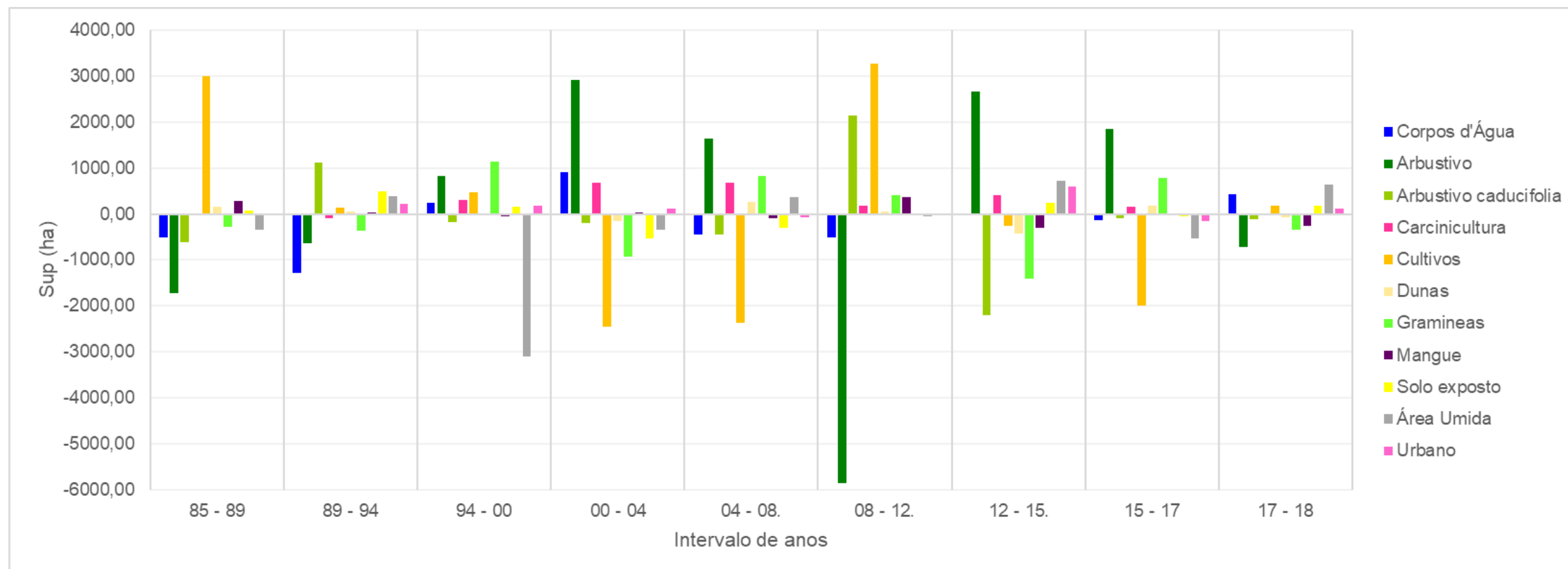
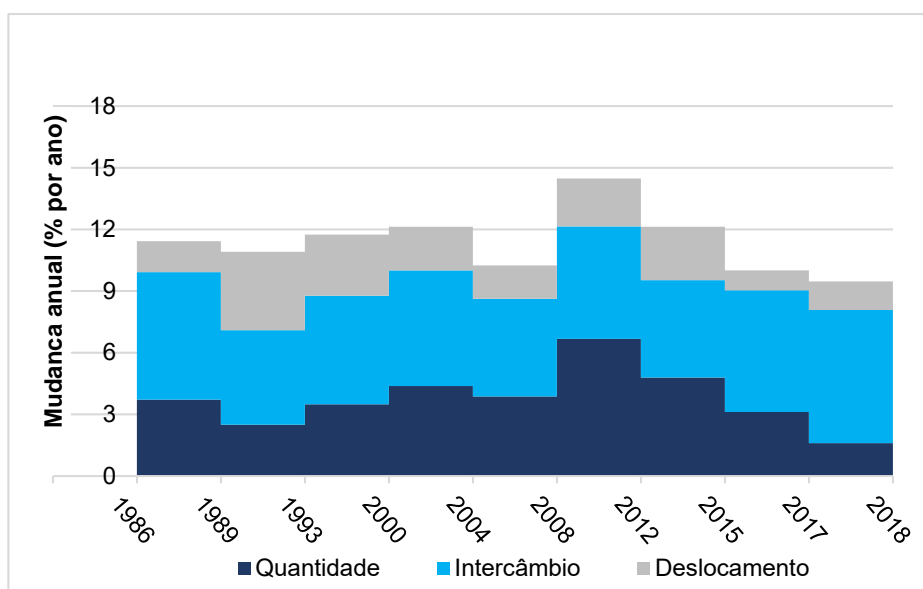


Figura 40 - Distribuição em ha, das mudanças positivas e negativas líquidas por cada classe de uso e cobertura entre 1986 e 2018 em Aracati.

Na análise de mudanças em Aracati aplicando as metodologias de Pontius et al. (2004), Aldwaik e Pontius (2012), Pontius e Santacruz (2014), foram derivados resultados gerais na comparação entre intervalos de tempo e resultados específicos a cada ano de estudo.

Em termos gerais, a Figura 41 mostrou que entre 1986 e 2018 houve mudanças gerais, principalmente em termos de quantidade (aumento ou redução da superfície de algumas classes) e intercâmbio (mudança de um tipo de classe a outro), sendo estes tipos de mudanças os esperados. O deslocamento é uma condição associada a mudanças entre pelo menos 3 categorias num mesmo espaço, onde não existe intercâmbio e pode existir algum nível de confusão entre classes, por exemplo; dunas e solo exposto, que pela semelhança espectral podem ser confundidas. De acordo com o gráfico entre os anos 2008 até 2015 ocorreram as maiores porcentagens de mudança em termos de quantidade. Entre 2017 e 2018, houve uma menor quantidade de superfície em processo de mudança, o intercâmbio foi o processo predominante.

Figura 41 - Mudanças anuais gerais (%) em Aracati entre os anos 1986 e 2018



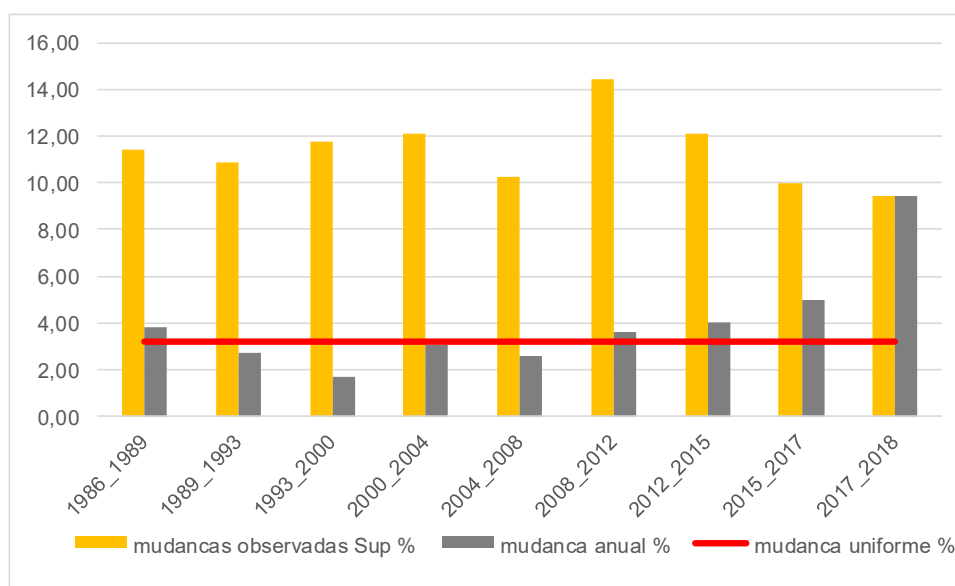
Fonte: Cálculos próprios

A Figura 41 mostrou as mudanças em termos de quantidade, intercambio e deslocamento. Agora na Figura 42 é observado padrão da mudança, onde foram identificadas as mudanças sistemáticas independentemente de qualquer tipo de

persistência. A análise de intensidade da mudança compara a intensidade de mudança uniforme, que serve de referência para comparar as mudanças no mesmo nível hierárquico, e observar como a taxa de mudança varia entre os intervalos de tempo. O intervalo de tempo entre 1989 até 2008 possui uma taxa de mudança anual abaixo da linha de mudança uniforme, indicando que durante este período as mudanças foram lentas. Nos intervalos de tempo 1986 – 1989, 2012 até 2018, a taxa de mudança anual superou a mudança uniforme, sendo desta forma períodos de mudanças rápidas.

As superfícies de mudança superam 10% entre 1986 e 2017, sendo que a maior porcentagem de superfície mudou entre 2008 e 2012, superando 14%, período que coincide com a instalação do parque eólico no campo de dunas móveis em Aracati. O período de 2017 e 2018 apresenta uma homogeneidade entre a quantidade de superfície que mudou e a taxa de mudança anual, isto pode ter relação com o fato de o intervalo de tempo avaliado corresponder a 1 ano, enquanto os outros intervalos encontram-se entre 3 e 7 anos. Desta forma, pode-se afirmar que conforme aumenta o intervalo de tempo avaliado, diminui a proporção real de mudança anual.

Figura 42 - Intensidade das mudanças em termos de velocidade entre 1986 e 2018 em Aracati.



Fonte: Cálculos próprios

Logo depois de ter uma visão geral do comportamento das mudanças entre 1986 e 2018, foram estimadas os ganhos e perdas por classe, durante cada intervalo de tempo e como mudam com relação a área da categoria. Desta forma foi comparada a intensidade da mudança anual por classe com a correspondente intensidade uniforme de mudança anual. Para cada intervalo de tempo foram identificadas condições de ganhos e perdas que podem ser interpretadas de diversas formas, tais como: relacionadas com erros da classificação, como mudanças fenológicas, mudanças estacionais, que são aspectos que devem ser considerados com cautela, já que é importante discriminar as verdadeiras mudanças no uso e cobertura das mudanças estacionais que podem ter relação com condições atmosféricas, ciclo hidrológico e anomalias devidas a secas.

A Figura 43 apresenta os gráficos com as variações para cada intervalo de tempo, destacando que a classe “Arbustivo” e “Dunas” ficaram sempre abaixo da linha de intensidade, o que quer dizer que estas duas classes permaneceram latentes durante todo período de estudo. O restante das categorias tem permanecido ativas. As classes “urbano” e “carcinicultura”, têm apresentado um crescimento constante, em termos de superfície, enquanto a classe “mangue” tem sofrido redução na sua superfície, seja pela morte do mangue e/ou expansão das áreas destinadas à carcinicultura. De acordo com o conhecimento da área em estudo, as perdas ou ganhos não são reais, pelo que denota um erro na classificação, confusão entre as classes de uso e cobertura nas classificações das imagens Landsat utilizadas.

No caso das categorias ativas, foram identificadas “Arbustivo Caducifólia” e “Gramíneas”, como as classes com maiores porcentagens de mudanças, tanto em ganhos como em perdas. A partir do conhecimento da área de estudo, baseado no trabalho de campo e interpretação das imagens, observaram-se algumas tendências com relação ao ganho e perda de algumas classes. Quando tem ganho na superfície de água superior a 15% (1989 -1993, 2008 – 2012, 2015 – 2017), diminui a proporção de ganhos nas áreas úmidas. Quando tem perda na superfície de água, aumentam as superfícies de área úmidas e solo exposto, a exceção, do período de 2017 – 2018 onde tanto os corpos de água como as áreas úmidas tiveram perdas, que coincide com o final do período da última seca documentada no Estado do Ceará.

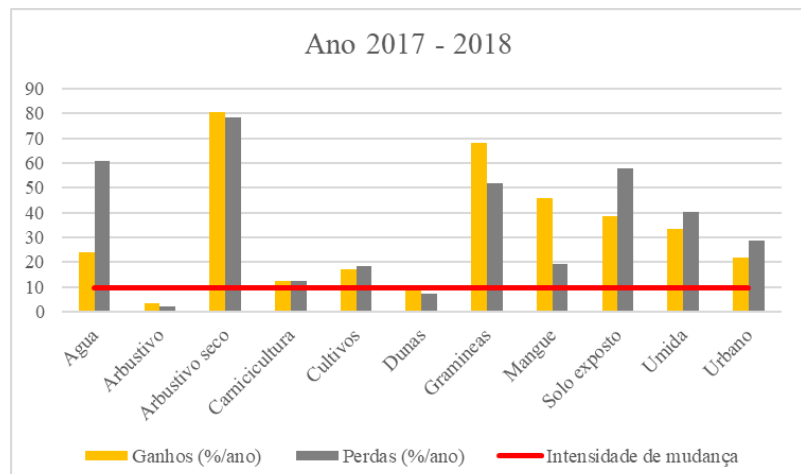
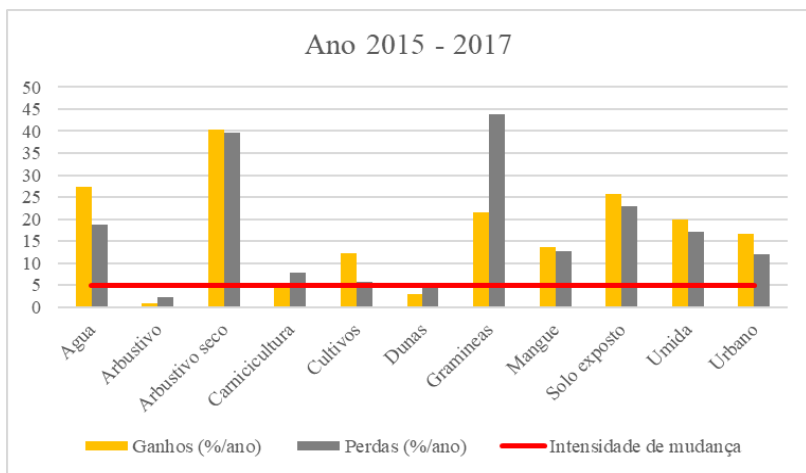
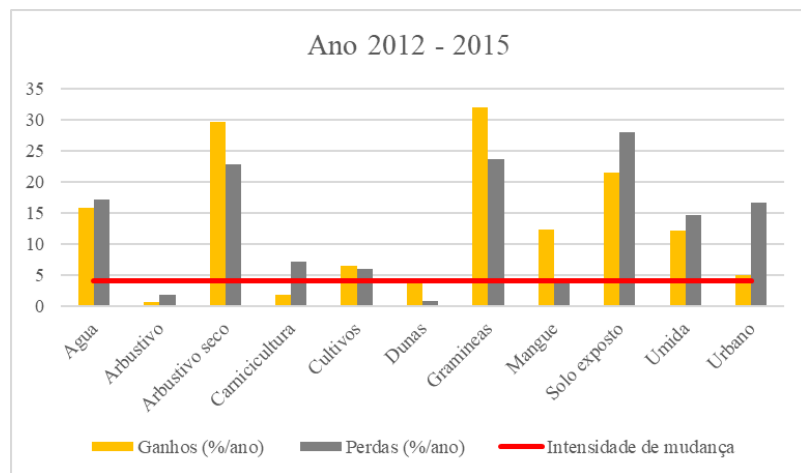
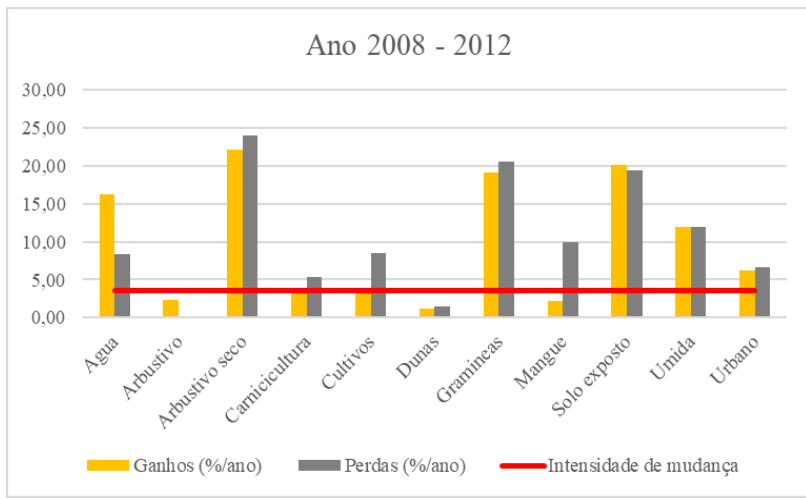
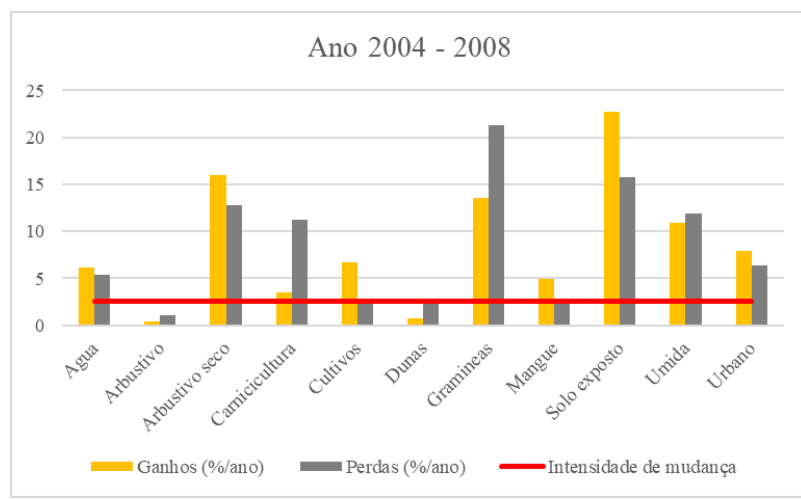
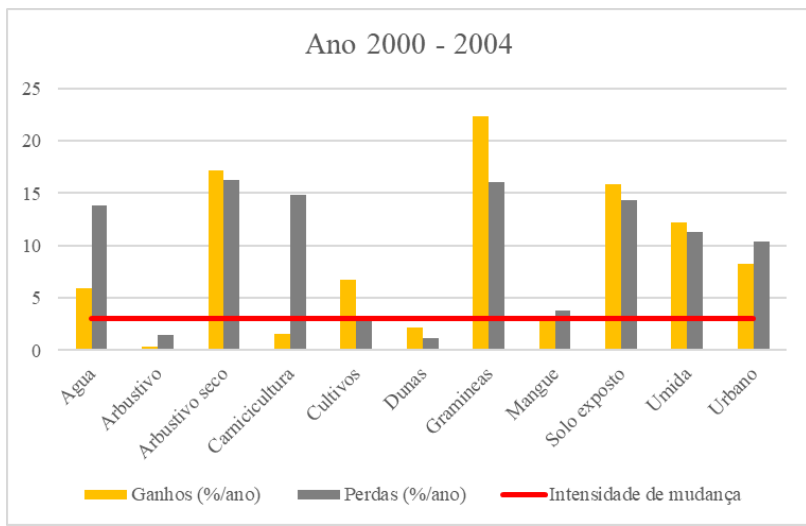
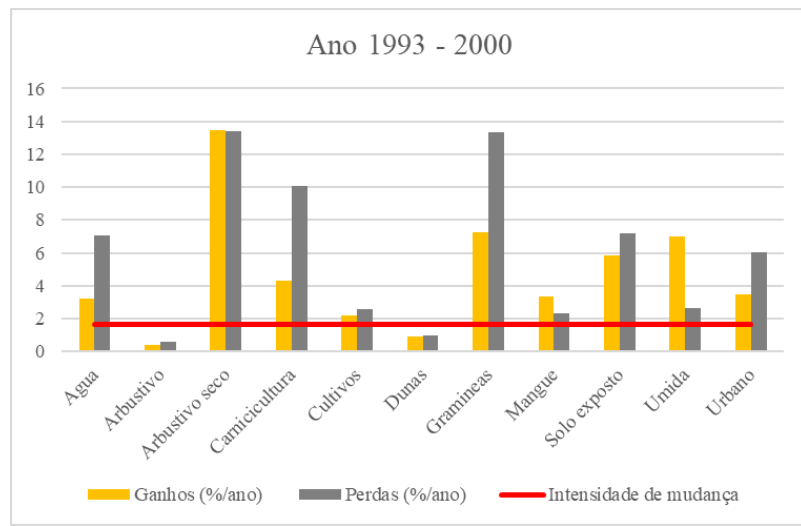
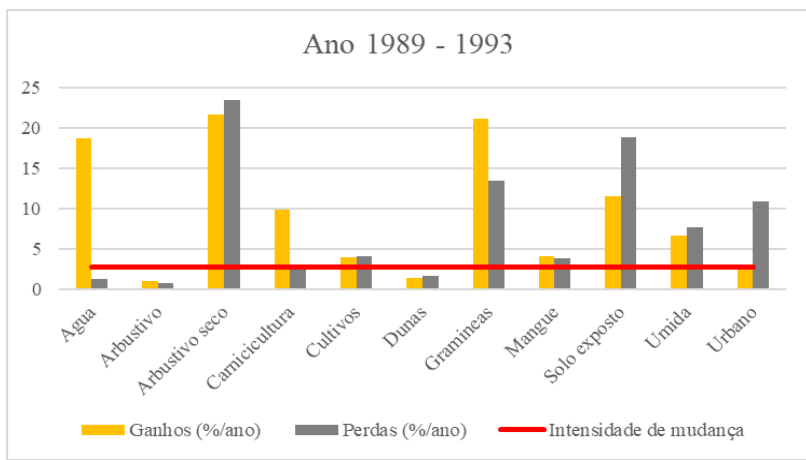
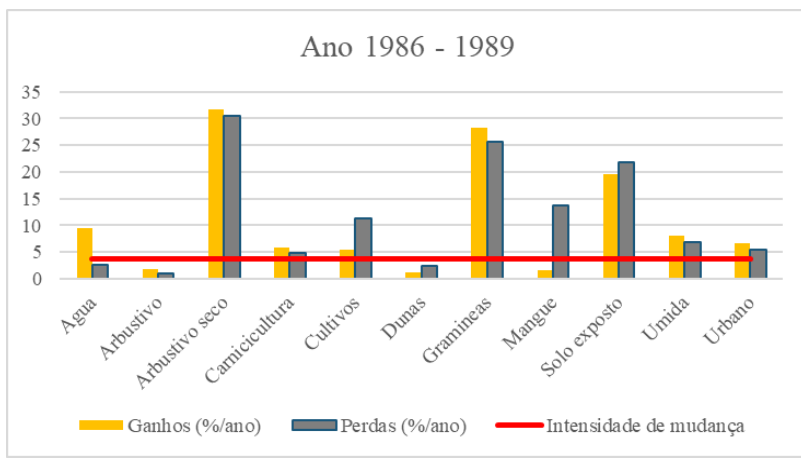


Figura 43 - Relação de ganhos e perdas por classe e sua correspondente intensidade de mudança anual em Aracati entre 1986 e 2018

Pode-se observar uma relação inversamente proporcional entre o arbustivo caducifólia e água, conforme tem ganho a superfície de água, a classe arbustiva caducifólia apresenta perdas. Isto reflete como a quantidade de água numa cobertura vegetal afeta seu vigor.

A Figura 44, mostra o conjunto de tabelas obtidas da matriz de transição, que resumem o comportamento dinâmico da área de estudo entre 1986 e 2018. Ressalta um resultado esperado e apontado por Pontius et al. (2004) e Salas e Aguilera (2019) como situação habitual na detecção de mudanças: as áreas de persistência ou estáveis predominam na superfície total da área de estudo em uma proporção maior ao 85,52 %, sendo este o menor valor de estabilidade já identificado e que corresponde ao período 2008 – 2012. No período de 2017 – 2018 as áreas estáveis correspondem a 90,53 %. Com relação às mudanças totais destaca-se um 14,48 % do período 2008 – 2012, enquanto o período 2017 -2018 ficou com 9,47 %. No restante dos intervalos de tempo encontraram-se mudanças totais entre 10 e 14%.

As classes que sofreram maiores mudanças totais entre 1986 – 1989 foram: cultivos (7,12 %), arbustivo (5,96%), urbano (3,71%), arbustivo caducifólio (2,51%). A mudança líquida negativa corresponde ao corpo d'água com 0,52%, enquanto as mudanças líquidas positivas foram em cultivos (3,13%) e arbustivo (1,79%). O intercâmbio se apresenta com maior magnitude no arbustivo (4,18%), seguido dos cultivos (3,99%) e áreas úmidas (2,28%).

Entre 1989 e 1993, as classes com as maiores mudanças totais foram: arbustivo (5,05%), cultivos (4,89%), urbano (4,79%), arbustivo caducifólio (2,95%). A mudança líquida negativa continua no corpo d'água com (0,52%), enquanto as mudanças líquidas positivas foram em maior proporção em arbustivo caducifólio (1,18%).

Entre 1993 e 2000, as classes com as maiores mudanças totais foram: cultivos (5,19%), urbano (5,17%), arbustivo (4,61%), arbustivo caducifólio (3,94%). Neste período não foram observadas mudanças negativas líquidas e destacam as mudanças líquidas positivas nas áreas úmidas (3,20%) e gramíneas (1,18%). O intercâmbio observa-se com maior magnitude nos cultivos (4,68%), seguido dos arbustivos (3,76%) e arbustivos caducifólios (3,72%).

Ano 1986 - 1989						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	1,68	0,67	0,15	0,81	-0,52	1,34
Arbustivo	65,12	3,87	2,09	5,96	1,79	4,18
Arbustivo caducifólio	0,09	1,58	0,93	2,51	0,65	1,86
Carcinicultura	0,29	0,06	0,05	0,11	0,01	0,10
Cultivos	10,11	2,00	5,12	7,12	3,13	3,99
Dunas	3,71	0,13	0,30	0,43	0,17	0,26
Gramineas	0,13	0,73	0,43	1,16	0,30	0,86
Manguezal	0,53	0,03	0,38	1,16	0,35	0,06
Solo exposto	0,15	0,21	0,28	0,40	0,07	0,42
Áreas Úmidas	6,43	2,07	1,64	0,49	0,43	3,28
Urbano	0,33	0,08	0,06	3,71	0,02	0,13
Totais	88,57	11,43	11,43	23,87	6,39	16,46

Ano 1989 - 1993						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,46	1,37	0,02	1,39	-1,34	2,73
Arbustivo	64,35	2,86	2,19	5,05	0,67	4,38
Arbustivo caducifólio	0,13	0,88	2,07	2,95	1,18	1,77
Carcinicultura	0,20	0,13	0,02	0,16	0,11	0,05
Cultivos	12,84	2,40	2,50	4,89	0,10	4,80
Dunas	3,79	0,23	0,27	0,50	0,04	0,45
Gramineas	0,09	0,48	0,10	0,58	0,37	0,20
Manguezal	0,76	0,15	0,14	0,58	0,01	0,28
Solo exposto	0,23	0,20	0,70	0,29	0,50	0,40
Áreas Úmidas	5,90	2,17	2,62	0,90	0,45	4,34
Urbano	0,34	0,05	0,27	4,79	0,22	0,10
Totais	89,09	10,91	10,91	22,08	2,32	19,50

Ano 1993 - 2000						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,38	0,11	0,37	0,48	0,26	0,22
Arbustivo	64,66	1,88	2,73	4,61	0,85	3,76
Arbustivo caducifólio	0,12	2,08	1,86	3,94	0,21	3,72
Carcinicultura	0,16	0,07	0,38	0,45	0,31	0,14
Cultivos	12,99	2,34	2,85	5,19	0,51	4,68
Dunas	3,80	0,26	0,27	0,53	0,01	0,51
Gramineas	0,09	0,10	1,28	1,38	1,18	0,19
Manguezal	0,69	0,21	0,13	1,38	0,07	0,27
Solo exposto	0,55	0,38	0,56	0,34	0,18	0,76
Áreas Úmidas	4,34	4,18	0,98	0,94	3,20	1,96
Urbano	0,46	0,15	0,34	5,17	0,19	0,30
Totais	88,25	11,75	11,75	24,38	6,98	16,51

Ano 2000 - 2004						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,57	0,18	0,71	0,88	0,53	0,36
Arbustivo	66,32	1,07	4,08	5,16	3,01	2,14
Arbustivo caducifólio	0,62	1,36	1,15	2,52	0,21	2,30
Carcinicultura	0,50	0,03	0,73	0,76	0,70	0,07
Cultivos	11,60	4,24	1,70	5,94	2,54	3,40
Dunas	3,72	0,35	0,18	0,54	0,17	0,37
Gramineas	0,15	1,23	0,26	1,49	0,96	0,53
Manguezal	0,72	0,10	0,13	1,49	0,02	0,21
Solo exposto	0,41	0,70	0,55	0,23	0,15	1,10
Áreas Úmidas	2,73	2,59	2,25	1,25	0,34	4,49
Urbano	0,54	0,27	0,38	4,84	0,12	0,53
Totais	87,87	12,13	12,13	25,10	8,76	15,50

Ano 2004 - 2008						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,96	0,31	0,27	0,58	-0,05	0,63
Arbustivo	69,16	1,24	2,95	4,19	1,71	2,49
Arbustivo caducifólio	0,64	1,14	0,67	1,80	0,47	1,33
Carcinicultura	1,06	0,18	0,87	1,04	0,69	0,35
Cultivos	9,76	3,54	1,08	4,62	2,46	2,16
Dunas	3,79	0,12	0,38	0,49	0,26	0,23
Gramineas	0,19	0,22	1,07	1,29	0,85	0,45
Manguezal	0,68	0,17	0,07	1,29	0,09	0,15
Solo exposto	0,09	0,87	0,15	0,24	0,72	0,30
Áreas Úmidas	2,81	2,17	2,53	1,02	0,36	4,34
Urbano	0,63	0,29	0,22	4,70	0,07	0,43
Totais	89,75	10,25	10,25	21,28	7,64	12,85

Ano 2008 - 2012						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,43	0,79	0,22	1,01	-0,57	1,58
Arbustivo	65,43	6,68	0,62	7,29	6,06	1,23
Arbustivo caducifólio	0,15	1,15	3,37	4,52	2,22	2,31
Carcinicultura	1,66	0,26	0,45	0,71	0,18	0,53
Cultivos	9,42	1,41	4,80	6,22	3,39	2,83
Dunas	3,96	0,20	0,25	0,46	0,05	0,40
Gramineas	0,30	0,96	1,39	2,35	0,42	1,93
Manguezal	0,69	0,06	0,45	2,35	0,39	0,13
Solo exposto	0,05	0,19	0,16	0,52	0,03	0,32
Áreas Úmidas	2,80	2,54	2,53	0,35	0,01	5,07
Urbano	0,63	0,21	0,23	5,08	0,02	0,42
Totais	85,52	14,48	14,48	30,86	12,20	16,76

Ano 2012 - 2015						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,34	0,31	0,36	0,67	0,05	0,62
Arbustivo	65,00	1,05	3,80	4,85	2,75	2,10
Arbustivo caducifólio	0,39	3,13	0,84	3,97	2,29	1,69
Carcinicultura	2,00	0,11	0,54	0,65	0,42	0,23
Cultivos	11,49	2,73	2,45	5,19	0,28	4,91
Dunas	3,66	0,55	0,10	0,65	0,46	0,19
Gramineas	0,07	1,62	0,16	1,77	1,46	0,32
Manguezal	0,72	0,42	0,10	1,77	0,31	0,21
Solo exposto	0,07	0,13	0,38	0,52	0,25	0,27
Áreas Úmidas	3,40	1,94	2,65	0,52	0,71	3,88
Urbano	0,74	0,13	0,74	4,59	0,61	0,26
Totais	87,87	12,13	12,13	25,16	9,59	14,66

Ano 2015 - 2017						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,32	0,38	0,19	0,57	-0,19	0,77
Arbustivo	67,54	1,26	3,20	4,46	1,94	2,51
Arbustivo caducifólio	0,24	1,00	0,91	1,91	0,09	1,83
Carcinicultura	2,28	0,26	0,42	0,68	0,17	0,51
Cultivos	10,51	3,43	1,37	4,80	2,07	2,73
Dunas	3,54	0,22	0,41	0,63	0,19	0,44
Gramineas	0,13	0,10	0,91	1,01	0,82	0,19
Manguezal	0,60	0,22	0,21	1,01	0,02	0,41
Solo exposto	0,22	0,23	0,19	0,43	0,05	0,37
Áreas Úmidas	3,63	2,41	1,89	0,42	0,53	3,77
Urbano	0,99	0,49	0,32	4,30	0,17	0,63
Totais	89,99	10,01	10,01	20,22	5,84	14,17

Ano 2015 - 2017						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,39	0,12	0,60	0,73	0,48	0,25
Arbustivo	68,44	2,30	1,54	3,84	0,77	3,08
Arbustivo caducifólio	0,22	0,93	0,80	1,73	0,12	1,61
Carcinicultura	2,36	0,34	0,33	0,67	0,01	0,66
Cultivos	9,82	2,06	2,23	4,29	0,18	4,11
Dunas	3,58	0,36	0,28	0,64	0,08	0,56
Gramineas	0,33	0,71	0,36	1,07	0,36	0,71
Manguezal	0,44	0,37	0,11	1,07	0,27	0,21
Solo exposto	0,25	0,16	0,34	0,48	0,19	0,31
Áreas Úmidas	3,69	1,83	2,47	0,50	0,63	3,67
Urbano	1,02	0,29	0,41	4,30	0,12	0,57
Totais	90,53	9,47	9,47	19,31	3,19	15,74

Figura 44 - Tabelas com o comportamento dinâmico de cada classe por intervalo de tempo em Aracati

No intervalo de 2000 – 2004, as classes com as maiores mudanças totais foram: cultivos (5,94%), arbustivo (5,16%) e urbano (4,84%). Neste período não foram observadas mudanças negativas líquidas e destacam-se as mudanças líquidas positivas no arbustivo (3,01%) e cultivos (2,54%). O intercâmbio observa-se com maior magnitude em áreas úmidas (4,49%), cultivos (3,40%), arbustivo caducifólio (2,30%) e arbustivo (2,14%).

No intervalo de 2004 – 2008, as classes com as maiores mudanças totais foram: urbano (4,70%), cultivos (4,62%), arbustivo (4,19%). A mudança líquida negativa continua no corpo d'água com (0,05%), enquanto as mudanças positivas foram em maior proporção em cultivos (2,46%). O intercâmbio se apresenta com maior magnitude nas áreas úmidas (4,34%), arbustivo (2,49%), e cultivos (2,16%).

Entre 2008 e 2012, as classes com as maiores mudanças totais foram: arbustivo (7,29%), cultivos (6,22%), urbano (5,08%) e arbustivo caducifólio (4,52%). A mudança líquida negativa volta no corpo d'água com (0,57%), enquanto as mudanças líquidas positivas foram: arbustivo (6,06%), cultivos (3,39%) e arbustivo caducifólio (2,22%). O intercâmbio observa-se com maior magnitude nas áreas úmidas (5,07%), cultivos (2,83%) e arbustivo caducifólio (2,31%).

Entre 2012 e 2015, as classes com as maiores mudanças totais foram: cultivos (5,19%), arbustivo (4,85%), urbano (4,59%) e arbustivo caducifólio (3,97%). Neste período não foram observadas mudanças negativas líquidas e destacam-se as mudanças líquidas positivas no arbustivo (2,75%) e arbustivo caducifólio (2,29%). O intercâmbio observa-se com maior magnitude nos cultivos (4,91%), áreas úmidas (3,88%) e arbustivo (2,10%).

No intervalo de 2015 – 2017, as classes com as maiores mudanças totais foram: cultivos (4,80%), arbustivo (4,46%) e urbano (4,30%). A mudança líquida negativa volta no corpo d'água com (0,19%), enquanto as mudanças líquidas positivas foram: cultivos (2,07%) e arbustivo (1,94%). O intercâmbio observa-se com maior magnitude nas áreas úmidas (3,77%), cultivos (2,73%) e arbustivo (2,51%).

Entre 2017 e 2018, as classes com as maiores mudanças totais foram: urbano (4,30%), cultivos (4,29%) e arbustivo (3,84%). Neste período não foram observadas mudanças negativas líquidas e destacam-se as mudanças líquidas positivas em arbustivo (0,77%) e áreas úmidas (0,63%). O intercâmbio observa-se com maior magnitude nos cultivos (4,11%), áreas úmidas (3,67%) e arbustivo (3,08%).

Depois de observar o comportamento das classes no tempo, destacaram-se no período 1986 – 2018 as mudanças e intercâmbio nas superfícies com cobertura: arbustivo, arbustivo caducifólio, cultivos, áreas úmidas, urbano e corpos d'água. Contudo, a interpretação do aumento ou redução das superfícies de mudança e sua significância, foi determinada com a análise da matriz de transição do ponto de vista dos ganhos e perdas. Foram selecionadas as transições com a maior diferença entre a porcentagem de área observada e esperada, dando maior prioridade à extensão da mudança. No caso de classes que não mostram grandes diferenças em extensão, mas um valor de índice alto, foram avaliados os casos onde a magnitude da mudança poderia corresponder a situações conhecidas dentro da área em estudo.

Nesta fase foram escolhidos os intervalos de tempo 2008 – 2012 e 2017 - 2018, por apresentarem o menor e o maior predomínio de áreas de estabilidade respectivamente. A tabela 16 mostra a matriz de transição considerando os ganhos entre 2008 e 2012.

O período 2008 – 2012, mostrou que o aumento da superfície do arbustivo substitui o arbustivo caducifólia (diferença de 0,731 e índice de 2,311) e os cultivos (diferença 0,809 e índice 1,862). Neste caso pode ter certa confusão porque os cultivos de caju são arbóreos e em ocasiões pode se confundir com uma cobertura arbustiva densa. Outras transições numa magnitude próxima ao esperado pela sorte correspondem aos cultivos substituindo os arbustivos caducifólios (diferença 0,110 e índice 0,910) e as áreas úmidas substituindo os corpos d'água (diferença 0,054 e índice 3,103), sendo que neste último caso a substituição não representa um ganho de superfície, senão uma mudança temporária pela perda de lâmina de água pela seca, por exemplo, que eventualmente poderia ser categorizada como um intercâmbio.

Tabela 16 - Matriz de transição desde os ganhos entre 2008 – 2012 em Aracati.

	Água	Arbustivo	Arbustivo caducifólio	Carcinicultura	Cultivos	Dunas	Gramineas	Mangue	Solo exposto	Áreas Úmidas	Urbano	Total	Perdida
Água	0,431	0,004	0,003	0,009	0,002	0,002	0,000	0,021	0,000	0,176	0,002	0,650	-0,572
	<i>0,431</i>	<i>0,578</i>	<i>0,010</i>	<i>0,015</i>	<i>0,087</i>	<i>0,033</i>	<i>0,010</i>	<i>0,006</i>	<i>0,002</i>	<i>0,043</i>	<i>0,007</i>	<i>14,658</i>	<i>2,122</i>
		<u>0,730</u>	<u>0,013</u>	<u>0,020</u>	<u>0,110</u>	<u>0,042</u>	<u>0,013</u>	<u>0,008</u>	<u>0,002</u>	0,054	<u>0,009</u>	<u>1,012</u>	0,147
		-0,993	-0,714	-0,390	-0,975	-0,952	-0,963	2,477	-0,902	3,103	-0,752	-0,956	-0,897
Arbustivo	0,004	65,432	0,025	0,014	0,353	0,014	0,002	0,006	0,000	0,191	0,006	66,049	-6,059
	<i>0,293</i>	<i>65,432</i>	<i>0,312</i>	<i>0,462</i>	<i>2,593</i>	<i>0,996</i>	<i>0,302</i>	<i>0,180</i>	<i>0,057</i>	<i>1,279</i>	<i>0,202</i>	<i>51,911</i>	<i>7,516</i>
	<u>0,044</u>	-	<u>0,047</u>	<u>0,069</u>	<u>0,388</u>	<u>0,149</u>	<u>0,045</u>	<u>0,027</u>	<u>0,009</u>	<u>0,192</u>	<u>0,030</u>	<u>3,585</u>	<u>0,519</u>
	-0,986		-0,918	-0,969	-0,864	-0,986	-0,993	-0,966	-0,998	-0,850	-0,969	0,272	-0,918
Arbustivo caducifólio	0,021	2,789	0,149	0,025	0,242	0,008	0,012	0,000	0,004	0,269	0,001	3,521	2,219
	<i>0,014</i>	<i>0,842</i>	<i>0,149</i>	<i>0,023</i>	<i>0,127</i>	<i>0,049</i>	<i>0,015</i>	<i>0,009</i>	<i>0,003</i>	<i>0,062</i>	<i>0,010</i>	<i>14,670</i>	<i>2,124</i>
	<u>0,012</u>	0,731	-	<u>0,020</u>	0,110	<u>0,042</u>	<u>0,013</u>	<u>0,008</u>	<u>0,002</u>	<u>0,054</u>	<u>0,009</u>	<u>1,013</u>	0,147
	0,471	2,311		0,090	0,910	-0,831	-0,163	-0,958	0,510	3,308	-0,868	-0,760	0,587
Carcinicultura	0,003	0,009	0,012	1,665	0,002	0,001	0,081	0,004	0,004	0,328	0,004	2,112	0,183
	<i>0,003</i>	<i>0,194</i>	<i>0,004</i>	<i>1,665</i>	<i>0,029</i>	<i>0,011</i>	<i>0,003</i>	<i>0,002</i>	<i>0,001</i>	<i>0,014</i>	<i>0,002</i>	<i>14,764</i>	<i>2,138</i>
	<u>0,012</u>	<u>0,735</u>	<u>0,013</u>	-	<u>0,110</u>	<u>0,042</u>	<u>0,013</u>	<u>0,008</u>	<u>0,002</u>	<u>0,054</u>	<u>0,009</u>	<u>1,020</u>	<u>0,148</u>
	-0,235	-0,951	2,514		-0,939	-0,908	22,932	0,747	5,551	21,757	0,722	-0,857	-0,791
Cultivos	0,023	3,275	0,389	0,015	9,421	0,018	0,308	0,000	0,126	0,628	0,019	14,222	3,386
	<i>0,019</i>	<i>1,144</i>	<i>0,021</i>	<i>0,031</i>	<i>9,421</i>	<i>0,066</i>	<i>0,020</i>	<i>0,012</i>	<i>0,004</i>	<i>0,085</i>	<i>0,013</i>	<i>16,239</i>	<i>3,351</i>
	<u>0,014</u>	0,809	<u>0,015</u>	<u>0,022</u>	-	<u>0,047</u>	<u>0,014</u>	<u>0,008</u>	<u>0,003</u>	<u>0,060</u>	<u>0,009</u>	<u>1,122</u>	0,162
	0,170	1,862	17,808	-0,497		-0,724	14,388	-0,984	32,291	6,411	0,420	-0,124	1,042
Dunas	0,031	0,030	0,012	0,001	0,007	3,959	0,003	0,001	0,000	0,127	0,042	4,213	0,052
	<i>0,003</i>	<i>0,152</i>	<i>0,003</i>	<i>0,004</i>	<i>0,023</i>	<i>3,959</i>	<i>0,003</i>	<i>0,002</i>	<i>0,001</i>	<i>0,011</i>	<i>0,002</i>	<i>15,108</i>	<i>2,188</i>
	<u>0,013</u>	<u>0,752</u>	<u>0,014</u>	<u>0,020</u>	<u>0,113</u>	-	<u>0,013</u>	<u>0,008</u>	<u>0,002</u>	<u>0,056</u>	<u>0,009</u>	<u>1,043</u>	<u>0,151</u>
	10,966	-0,804	3,209	-0,840	-0,686		0,158	-0,120	-0,814	10,292	22,582	-0,721	-0,884
Gramineas	0,082	0,070	0,250	0,029	0,533	0,041	0,296	0,000	0,024	0,350	0,008	1,682	0,422
	<i>0,012</i>	<i>0,704</i>	<i>0,013</i>	<i>0,019</i>	<i>0,106</i>	<i>0,041</i>	<i>0,296</i>	<i>0,007</i>	<i>0,002</i>	<i>0,052</i>	<i>0,008</i>	<i>14,664</i>	<i>2,123</i>
	<u>0,012</u>	<u>0,730</u>	<u>0,013</u>	<u>0,020</u>	<u>0,110</u>	<u>0,042</u>	-	<u>0,008</u>	<u>0,002</u>	<u>0,054</u>	<u>0,009</u>	<u>1,013</u>	<u>0,147</u>
	5,897	-0,901	18,663	0,552	4,035	0,000		-1,000	9,199	5,710	-0,084	-0,885	-0,347
Manguezal	0,011	0,019	0,002	0,042	0,000	0,010	0,000	0,689	0,001	0,366	0,003	1,143	0,389
	<i>0,001</i>	<i>0,047</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,007</i>	<i>0,003</i>	<i>0,001</i>	<i>0,689</i>	<i>0,000</i>	<i>0,003</i>	<i>0,001</i>	<i>14,589</i>	<i>2,112</i>
	<u>0,012</u>	<u>0,727</u>	<u>0,013</u>	<u>0,019</u>	<u>0,109</u>	<u>0,042</u>	<u>0,013</u>	-	<u>0,002</u>	<u>0,054</u>	0,009	<u>1,008</u>	0,146
	12,196	-0,590	1,193	32,535	-0,974	2,672	-0,660		3,198	103,699	4,574	-0,922	-0,785
Solo exposto	0,008	0,006	0,002	0,002	0,103	0,000	0,015	0,001	0,047	0,024	0,000	0,209	-0,029
	<i>0,002</i>	<i>0,138</i>	<i>0,002</i>	<i>0,004</i>	<i>0,021</i>	<i>0,008</i>	<i>0,002</i>	<i>0,001</i>	<i>0,047</i>	<i>0,010</i>	<i>0,002</i>	<i>14,514</i>	<i>2,101</i>
	<u>0,012</u>	<u>0,723</u>	<u>0,013</u>	<u>0,019</u>	<u>0,109</u>	<u>0,042</u>	<u>0,013</u>	<u>0,008</u>	-	<u>0,054</u>	<u>0,008</u>	<u>1,002</u>	<u>0,145</u>
	2,469	-0,953	-0,176	-0,393	3,954	-1,000	5,345	-0,095		1,318	-1,000	-0,986	-0,923
Áreas Úmidas	0,609	0,403	0,454	0,124	0,154	0,067	0,534	0,031	0,030	2,799	0,127	5,333	-0,010
	<i>0,033</i>	<i>1,939</i>	<i>0,035</i>	<i>0,052</i>	<i>0,291</i>	<i>0,112</i>	<i>0,034</i>	<i>0,020</i>	<i>0,006</i>	<i>2,799</i>	<i>0,023</i>	<i>15,297</i>	<i>2,215</i>
	<u>0,013</u>	<u>0,762</u>	<u>0,014</u>	<u>0,020</u>	<u>0,114</u>	<u>0,044</u>	<u>0,013</u>	0,008	<u>0,003</u>	-	<u>0,009</u>	<u>1,056</u>	0,153
	17,521	-0,792	11,973	1,393	-0,470	-0,403	14,771	0,516	3,741		4,596	-0,651	0,144
Urbano	0,001	0,069	0,004	0,002	0,019	0,042	0,008	0,000	0,002	0,085	0,633	0,865	0,019
	<i>0,003</i>	<i>0,154</i>	<i>0,003</i>	<i>0,004</i>	<i>0,023</i>	<i>0,009</i>	<i>0,003</i>	<i>0,002</i>	<i>0,001</i>	<i>0,011</i>	<i>0,633</i>	<i>14,603</i>	<i>2,114</i>
	<u>0,012</u>	0,727	<u>0,013</u>	<u>0,019</u>	0,109	<u>0,042</u>	<u>0,013</u>	<u>0,008</u>	<u>0,002</u>	<u>0,054</u>	-	<u>1,009</u>	0,146
	-0,750	-0,551	0,373	-0,525	-0,179	3,696	1,804	-0,826	2,481	6,469		-1,000	-0,890
Total	1,223	72,107	1,302	1,929	10,835	4,161	1,260	0,754	0,238	5,344	0,845		
Ganancia	0,792	6,676	1,153	0,264	1,415	0,202	0,964	0,065	0,191	2,545	0,212		

Valores em Negrito: porcentagem com relação a toda a imagem, **Valores em Itálico:** valor esperado se a mudança fosse pelo azar, **Valores Sublinhados:** é a diferença entre o valor observado e estimado. **Valores simples:** Índice: valor observado menos o estimado dividido pelo estimado

Valores destacados na cor amarelo: mudanças significativas

Valores destacados na cor azul: mudanças significativas em magnitude

Outras mudanças aparentemente não significativas, mas que representam tendências e pequenas variações constatadas no campo, correspondem a áreas urbanas substituindo manguezal, mesmo com valores muito baixos (diferença 0,009 e índice 4,574), a magnitude de 4 vezes o esperado pela sorte, indica que a expansão de povoados e áreas dedicadas a carcinicultura, introduzem elementos edificados de caráter urbano que reduzem a superfície do manguezal lentamente. O manguezal substitui áreas úmidas (diferença 0,008 e índice 0,516). As áreas úmidas substituem corpos d'água (diferença 0,054 e índice 3,103). Urbano substitui o manguezal (diferença 0,009 e índice 4,574), indicando a lenta expansão urbana nas áreas de manguezal.

Transições como arbustivo substituindo o urbano e cultivos substituindo o urbano, não são reais, pelo que se interpretaram como erros na classificação.

Considerando a perda total de uma classe em relação as outras destaca-se que: quando as classes diferentes de cultivos ganham superfícies de forma significativa, substituem os cultivos (diferença 0,162 e índice 1,042), se outras classes diferentes dos arbustivos caducifólios ganham de forma significativa, estas a substituem (diferença 0,147 e índice 0,587), quando classes diferentes de áreas úmidas ganham superfícies de forma significativa, substituem as áreas úmidas (diferença 0,153 e índice 0,144).

Os resultados da matriz de transição desde o ponto de vista das perdas, são apresentadas na tabela 17. Quando o Arbustivo perde superfície é substituído de forma significativa pelo arbustivo caducifólio (diferença 0,099 e índice 7,329), gramíneas (diferença 0,041 e índice 0,231) e/ou áreas úmidas (diferença 0,075 e índice 1,132).

Tabela 17 - Matriz de transição desde as perdas entre 2008 – 2012 em Aracati.

	Água	Arbustivo	Arbustivo caducifólio	Carcinicultura	Cultivos	Dunas	Gramineas	Mangue	Solo exposto	Áreas Úmidas	Urbano	Total
Água	0,431 <i>0,431</i> <u>0,004</u> 0,049	0,004 <i>0,004</i> <u>0,006</u> 0,049	0,003 <i>0,114</i> <u>0,034</u> -0,816	0,009 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 0,250	0,002 <i>0,232</i> <u>0,048</u> -0,902	0,002 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 46,492	0,000 <i>0,019</i> <u>0,014</u> 3,258	0,021 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 4,083	0,000 <i>0,000</i> <u>0,002</u> 29,747	0,176 <i>0,065</i> <u>0,026</u> 8,417	0,002 <i>0,001</i> <u>0,002</u> 0,210	0,650
Arbustivo	0,004 <i>0,001</i> <u>0,006</u> 1,902	65,432 <i>65,432</i> -	0,025 <i>0,335</i> 0,099 7,329	0,014 <i>0,006</i> <u>0,013</u> 0,598	0,353 <i>0,679</i> <u>0,141</u> 3,824	0,014 <i>0,002</i> <u>0,007</u> 14,641	0,002 <i>0,057</i> 0,041 0,231	0,006 <i>0,006</i> <u>0,013</u> 2,182	0,000 <i>0,001</i> <u>0,005</u> 7,333	0,191 <i>0,189</i> 0,075 1,132	0,006 <i>0,002</i> <u>0,007</u> 42,825	66,049
Arbustivo caducifólio	0,021 <i>0,000</i> <u>0,002</u> 4,997	2,789 <i>0,004</i> <u>0,006</u> 5,469	0,149 <i>0,149</i> -	0,025 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 4,936	0,242 <i>0,239</i> <u>0,050</u> 0,627	0,008 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 16,277	0,012 <i>0,020</i> <u>0,014</u> 11,556	0,000 <i>0,002</i> <u>0,005</u> -0,126	0,004 <i>0,000</i> <u>0,002</u> 6,550	0,269 <i>0,067</i> <u>0,026</u> 5,822	0,001 <i>0,001</i> <u>0,002</u> 5,881	3,521
Carcinicultura	0,003 <i>0,000</i> <u>0,002</u> 18,203	0,009 <i>0,004</i> <u>0,006</u> 2,678	0,012 <i>0,116</i> <u>0,034</u> -0,789	1,665 <i>1,665</i> -	0,002 <i>0,235</i> <u>0,049</u> -0,935	0,001 <i>0,001</i> <u>0,003</u> -0,010	0,081 <i>0,020</i> <u>0,014</u> 0,489	0,004 <i>0,002</i> 0,005 19,079	0,004 <i>0,000</i> <u>0,002</u> 7,357	0,328 <i>0,066</i> <u>0,026</u> 0,891	0,004 <i>0,001</i> <u>0,002</u> 2,576	2,112
Cultivos	0,023 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 2,832	3,275 <i>0,004</i> <u>0,007</u> 78,551	0,389 <i>0,133</i> 0,039 0,824	0,015 <i>0,002</i> <u>0,005</u> -0,240	9,421 <i>9,421</i> -	0,018 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 8,539	0,308 <i>0,022</i> <u>0,016</u> 22,782	0,000 <i>0,002</i> <u>0,005</u> -0,922	0,126 <i>0,000</i> <u>0,002</u> 334,957	0,628 <i>0,075</i> <u>0,030</u> 1,063	0,019 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 29,442	14,222
Dunas	0,031 <i>0,001</i> <u>0,002</u> 2,163	0,030 <i>0,004</i> <u>0,006</u> 2,576	0,012 <i>0,119</i> <u>0,035</u> -0,931	0,001 <i>0,002</i> 0,005 -0,509	0,007 <i>0,241</i> <u>0,050</u> -0,924	3,959 <i>3,959</i> -	0,003 <i>0,020</i> <u>0,014</u> 1,025	0,001 <i>0,002</i> 0,005 3,641	0,000 <i>0,000</i> <u>0,002</u> -1,000	0,127 <i>0,067</i> <u>0,026</u> -0,004	0,042 <i>0,001</i> <u>0,002</u> 73,653	4,213
Gramineas	0,082 <i>0,000</i> <u>0,002</u> -0,236	0,070 <i>0,004</i> <u>0,006</u> -0,469	0,250 <i>0,116</i> <u>0,034</u> -0,893	0,029 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 38,871	0,533 <i>0,234</i> 0,049 0,312	0,041 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 3,686	0,296 <i>0,296</i> -	0,000 <i>0,002</i> <u>0,005</u> -0,866	0,024 <i>0,000</i> <u>0,002</u> 56,358	0,350 <i>0,065</i> <u>0,026</u> 7,179	0,008 <i>0,001</i> <u>0,002</u> 12,854	1,682
Manguezal	0,011 <i>0,000</i> <u>0,002</u> 42,203	0,019 <i>0,004</i> <u>0,006</u> 0,578	0,002 <i>0,115</i> <u>0,034</u> -0,997	0,042 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 0,751	0,000 <i>0,233</i> <u>0,049</u> -0,999	0,010 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 1,142	0,000 <i>0,019</i> <u>0,014</u> -1,000	0,689 <i>0,689</i> -	0,001 <i>0,000</i> <u>0,002</u> 3,923	0,366 <i>0,065</i> <u>0,026</u> -0,527	0,003 <i>0,001</i> <u>0,002</u> -0,484	1,143
Solo exposto	0,008 <i>0,000</i> <u>0,002</u> -0,612	0,006 <i>0,004</i> <u>0,006</u> -0,975	0,002 <i>0,114</i> <u>0,034</u> -0,963	0,002 <i>0,002</i> <u>0,004</u> 1,093	0,103 <i>0,231</i> <u>0,048</u> -0,455	0,000 <i>0,001</i> <u>0,003</u> -0,856	0,015 <i>0,019</i> <u>0,014</u> 0,232	0,001 <i>0,002</i> <u>0,005</u> -0,684	0,047 <i>0,047</i> -	0,024 <i>0,064</i> <u>0,025</u> -0,529	0,000 <i>0,001</i> <u>0,002</u> 2,298	0,209
Áreas Úmidas	0,609 <i>0,001</i> <u>0,002</u> 320,680	0,403 <i>0,004</i> <u>0,007</u> 43,307	0,454 <i>0,129</i> <u>0,038</u> 1,082	0,124 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 142,895	0,154 <i>0,262</i> 0,055 1,399	0,067 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 172,476	0,534 <i>0,022</i> <u>0,016</u> 15,037	0,031 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 155,119	0,030 <i>0,000</i> <u>0,002</u> 78,513	2,799 <i>2,799</i> -	0,127 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 139,078	5,333
Urbano	0,001 <i>0,000</i> <u>0,002</u> 2,466	0,069 <i>0,004</i> <u>0,006</u> 0,656	0,004 <i>0,115</i> <u>0,034</u> -0,989	0,002 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 0,941	0,019 <i>0,233</i> <u>0,048</u> -0,918	0,042 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 63,570	0,008 <i>0,019</i> <u>0,014</u> -0,610	0,000 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 0,481	0,002 <i>0,000</i> <u>0,002</u> -1,000	0,085 <i>0,065</i> <u>0,026</u> 0,963	0,633 <i>0,633</i> -	0,865
Total	1,223 <i>14,574</i> <u>1,007</u> -0,916	72,107 <i>42,647</i> <u>2,945</u> 0,691	1,302 <i>15,008</i> <u>1,036</u> -0,913	1,929 <i>14,792</i> <u>1,022</u> -0,870	10,835 <i>16,880</i> <u>1,166</u> -0,358	4,161 <i>15,116</i> <u>1,044</u> -0,725	1,260 <i>14,727</i> <u>1,017</u> -0,914	0,754 <i>14,647</i> <u>1,012</u> -0,949	0,238 <i>14,510</i> <u>1,002</u> -0,984	5,344 <i>16,454</i> <u>1,136</u> -0,675	0,845 <i>14,606</i> <u>1,009</u> -0,942	
ganho	0,792 <i>2,110</i> <u>0,146</u> -0,625	6,676 <i>6,175</i> <u>0,426</u> 0,081	1,153 <i>2,173</i> 0,150 -0,469	0,264 <i>2,142</i> 0,148 -0,877	1,415 <i>2,444</i> 0,169 -0,421	0,202 <i>2,189</i> <u>0,151</u> -0,907	0,964 <i>2,132</i> 0,147 -0,548	0,065 <i>2,121</i> 0,146 -0,969	0,191 <i>2,101</i> <u>0,145</u> -0,909	2,545 <i>2,382</i> 0,165 0,068	0,212 <i>2,115</i> <u>0,146</u> -0,900	

Valores em Negrito: porcentagem com relação a toda a imagem, **Valores em Itálico:** valor esperado se a mudança fosse pelo azar, **Valores Sublinhados:** é a diferença entre o valor observado e estimado. **Valores simples:** Índice: valor observado menos o estimado dividido pelo estimado

Valores destacados na cor amarelo: mudanças significativas

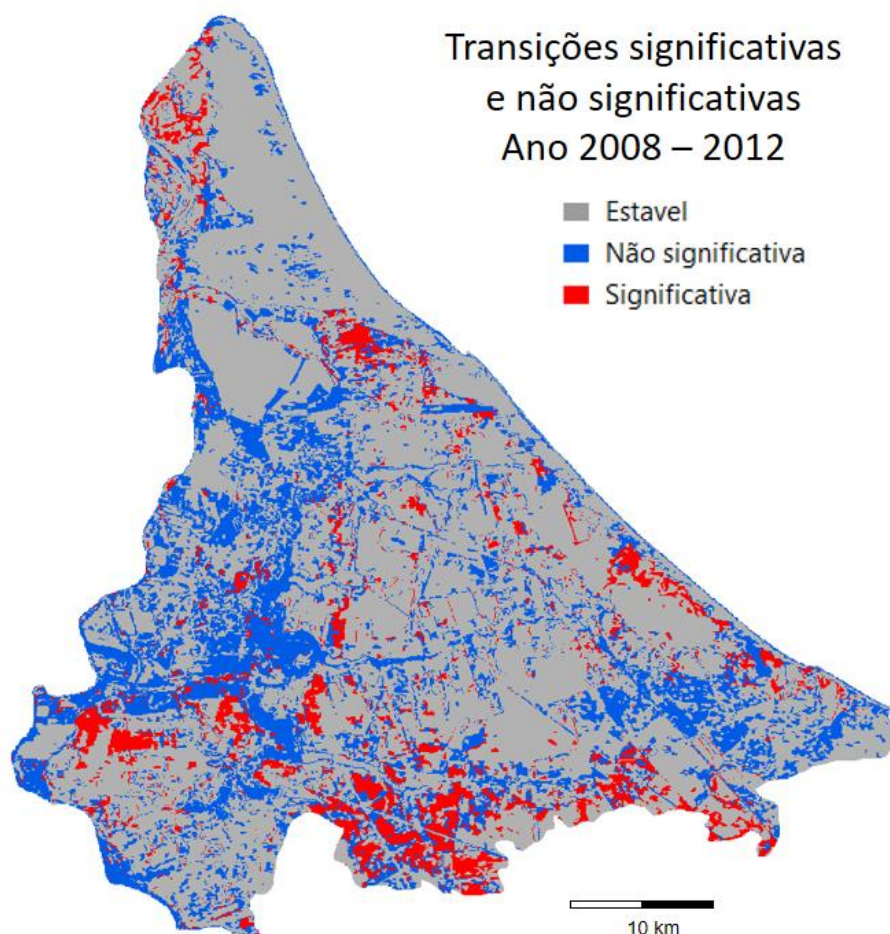
Valores destacados na cor azul: mudanças significativas em magnitude

Quando os cultivos perdem superfície, são substituídos pelo arbustivo caducifólio (diferença 0,039 e índice 0,824). As gramíneas podem perder para áreas de cultivos (diferença 0,049 e índice 0,312). Eventualmente as áreas úmidas perdem superfícies para cultivos de subsistência principalmente. Foi observada uma mudança aparentemente não significativa, mesmo com valores muito baixos, indicando que as dunas não são substituídas pela carcinicultura (diferença 0,005 e índice -0,509), mas este caso pode estar relacionado a expansão de pequenas áreas, próximas às piscinas de criação de camarão e ao limite das dunas móveis. Com a finalidade de evitar o avanço das dunas sobre as piscinas tenta-se fixar as dunas com barreiras, causando uma mudança bem lenta para outro tipo de cobertura, de áreas com dunas móveis a áreas com dunas fixas que possuem geralmente cobertura vegetal. A substituição de áreas úmidas por cultivos, não é real e pode estar associada a erros na classificação.

Considerando o ganho total para classe com relação as outras mencionase que: quando classes diferentes de áreas úmidas perdem superfícies, são substituídas por áreas úmidas (diferença 0,165 e índice 0,068). Quando o arbustivo seco, carcinicultura, cultivos, gramíneas, manguezal perdem superfície, não existe substituição, por causa do índice negativo.

A Figura 45 mostra a distribuição das transições em Aracati no período 2008 – 2012, dando como resultado: 28.279,13 ha estáveis, 3.653,85 ha de transições significativas e 10.128,68 ha de transições não significativas, representando 67,23 %, 8,69 % e 24,08 % da superfície total, respectivamente.

Figura 45 - Transições significativas e não significativas no período 2008 – 2012 em Aracati.



Fonte: Elaboração própria

O período 2017 – 2018 foi interessante, porque além de ser um intervalo de tempo de apenas um ano, obteve-se dados de campo em ambos anos, que permitem confirmar relações que podem ser observadas na matriz de transição em forma de mudanças significativas e outras aparentemente não significativas. Entre as transições significativas, do ponto de vista dos ganhos, encontra-se o Arbustivo substituindo a arbustivo caducifólio (diferença 0,716 e índice -0.406), mas não substituindo aos cultivos (diferença 0,803 e índice -0.093) e gramíneas (diferença 0,715 e índice -0.957) como indica o valor negativo do índice. Os cultivos aumentam quando substituíram as superfícies arbustivas (diferença 0,406 e índice 0.017) e arbustivo caducifólio (diferença 0,120 e índice 0.782) (tabela 18).

Tabela 18 - Matriz de transição desde os ganhos entre 2017 – 2018 em Aracati.

	Água	Arbustivo	Arbustivo caducifólio	Carcinicultura	Cultivos	Dunas	Gramineas	Mangue	Solo exposto	Áreas Úmidas	Urbano	Total	Perdida
Água	0,387	0,009	0,009	0,017	0,049	0,131	0,008	0,030	0,003	0,346	0,003	0,992	0,481
	<i>0,387</i>	<i>0,088</i>	<i>0,001</i>	<i>0,003</i>	<i>0,015</i>	<i>0,005</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,007</i>	<i>0,002</i>	<i>9,517</i>	<i>0,901</i>
		<u>0,711</u>	<u>0,012</u>	0,027	<u>0,119</u>	<u>0,040</u>	<u>0,010</u>	<u>0,008</u>	0,004	<u>0,055</u>	<u>0,013</u>	<u>1,005</u>	0,095
		-0,898	5,556	4,019	2,298	25,797	5,149	28,883	5,107	49,582	0,851	-0,896	-0,329
Arbustivo	0,005	68,437	0,165	0,029	0,951	0,005	0,023	0,005	0,001	0,308	0,047	69,976	-0,766
	<i>0,040</i>	<i>68,437</i>	<i>0,090</i>	<i>0,213</i>	<i>0,935</i>	<i>0,311</i>	<i>0,082</i>	<i>0,064</i>	<i>0,032</i>	<i>0,435</i>	<i>0,103</i>	<i>32,362</i>	<i>3,064</i>
	<u>0,017</u>	-	<u>0,039</u>	<u>0,092</u>	0,406	<u>0,135</u>	<u>0,036</u>	<u>0,028</u>	<u>0,014</u>	<u>0,189</u>	<u>0,044</u>	<u>3,418</u>	0,324
	-0,879		0,821	-0,864	0,017	-0,983	-0,724	-0,928	-0,962	-0,293	-0,539	1,162	-0,498
Arbustivo caducifólio	0,003	0,393	0,223	0,003	0,198	0,013	0,008	0,001	0,000	0,184	0,001	1,028	-0,121
	<i>0,005</i>	<i>0,662</i>	<i>0,223</i>	<i>0,025</i>	<i>0,111</i>	<i>0,037</i>	<i>0,010</i>	<i>0,008</i>	<i>0,004</i>	<i>0,052</i>	<i>0,012</i>	<i>9,579</i>	<i>0,907</i>
	<u>0,005</u>	0,716	-	<u>0,027</u>	<u>0,120</u>	<u>0,040</u>	<u>0,011</u>	<u>0,008</u>	<u>0,004</u>	<u>0,056</u>	0,013	<u>1,012</u>	<u>0,096</u>
	-0,336	-0,406		-0,863	0,782	-0,641	-0,186	-0,901	-1,000	2,558	-0,946	-0,893	-0,113
Carcinicultura	0,010	0,006	0,007	2,362	0,003	0,000	0,029	0,039	0,001	0,230	0,005	2,691	-0,010
	<i>0,002</i>	<i>0,247</i>	<i>0,004</i>	<i>2,362</i>	<i>0,041</i>	<i>0,014</i>	<i>0,004</i>	<i>0,003</i>	<i>0,001</i>	<i>0,019</i>	<i>0,005</i>	<i>9,731</i>	<i>0,921</i>
	<u>0,005</u>	<u>0,727</u>	<u>0,012</u>	-	<u>0,122</u>	<u>0,041</u>	<u>0,011</u>	<u>0,008</u>	<u>0,004</u>	<u>0,057</u>	<u>0,013</u>	<u>1,028</u>	0,097
	4,351	-0,974	0,771		-0,935	-0,986	6,921	12,801	-0,211	10,933	0,152	-0,723	-0,642
Cultivos	0,001	1,497	0,275	0,008	9,821	0,005	0,200	0,000	0,024	0,174	0,047	12,052	0,176
	<i>0,012</i>	<i>1,650</i>	<i>0,027</i>	<i>0,063</i>	<i>9,821</i>	<i>0,092</i>	<i>0,024</i>	<i>0,019</i>	<i>0,009</i>	<i>0,129</i>	<i>0,030</i>	<i>10,745</i>	<i>1,017</i>
	<u>0,006</u>	0,803	<u>0,013</u>	<u>0,031</u>	-	<u>0,045</u>	<u>0,012</u>	<u>0,009</u>	<u>0,005</u>	<u>0,063</u>	<u>0,015</u>	<u>1,135</u>	0,107
	-0,906	-0,093	9,264	-0,874		-0,941	7,234	-0,995	1,509	0,351	0,547	0,122	1,193
Dunas	0,000	0,023	0,006	0,002	0,007	3,582	0,003	0,008	0,006	0,193	0,033	3,865	-0,079
	<i>0,002</i>	<i>0,266</i>	<i>0,004</i>	<i>0,010</i>	<i>0,045</i>	<i>3,582</i>	<i>0,004</i>	<i>0,003</i>	<i>0,002</i>	<i>0,021</i>	<i>0,005</i>	<i>9,857</i>	<i>0,933</i>
	<u>0,005</u>	<u>0,736</u>	<u>0,012</u>	<u>0,028</u>	<u>0,124</u>	-	<u>0,011</u>	<u>0,008</u>	<u>0,004</u>	0,057	<u>0,014</u>	<u>1,041</u>	0,099
	-0,951	-0,912	0,450	-0,834	-0,845		-0,164	1,797	3,094	8,317	5,704	-0,608	-0,698
Gramineas	0,000	0,022	0,018	0,007	0,152	0,002	0,330	0,000	0,016	0,134	0,005	0,686	-0,355
	<i>0,004</i>	<i>0,508</i>	<i>0,008</i>	<i>0,019</i>	<i>0,085</i>	<i>0,028</i>	<i>0,330</i>	<i>0,006</i>	<i>0,003</i>	<i>0,040</i>	<i>0,009</i>	<i>9,568</i>	<i>0,906</i>
	<u>0,005</u>	0,715	<u>0,012</u>	<u>0,027</u>	<u>0,120</u>	<u>0,040</u>	-	<u>0,008</u>	<u>0,004</u>	<u>0,056</u>	<u>0,013</u>	<u>1,011</u>	<u>0,096</u>
	-1,000	-0,957	1,194	-0,649	0,784	-0,934		-0,968	4,460	2,367	-0,461	-0,928	-0,607
Manguezal	0,007	0,011	0,001	0,003	0,002	0,003	0,000	0,438	0,000	0,078	0,000	0,543	-0,266
	<i>0,002</i>	<i>0,265</i>	<i>0,004</i>	<i>0,010</i>	<i>0,044</i>	<i>0,015</i>	<i>0,004</i>	<i>0,438</i>	<i>0,002</i>	<i>0,021</i>	<i>0,005</i>	<i>9,546</i>	<i>0,904</i>
	<u>0,005</u>	<u>0,713</u>	<u>0,012</u>	<u>0,027</u>	<u>0,120</u>	<u>0,040</u>	<u>0,010</u>	-	<u>0,004</u>	0,056	<u>0,013</u>	<u>1,008</u>	0,095
	2,567	-0,958	-0,805	-0,732	-0,958	-0,772	-0,952		-1,000	2,768	-0,923	-0,943	-0,884
Solo exposto	0,000	0,012	0,001	0,002	0,186	0,019	0,050	0,000	0,250	0,065	0,008	0,593	0,186
	<i>0,001</i>	<i>0,112</i>	<i>0,002</i>	<i>0,004</i>	<i>0,019</i>	<i>0,006</i>	<i>0,002</i>	<i>0,001</i>	<i>0,250</i>	<i>0,009</i>	<i>0,002</i>	<i>9,507</i>	<i>0,900</i>
	<u>0,005</u>	<u>0,710</u>	<u>0,012</u>	0,027	<u>0,119</u>	0,040	<u>0,010</u>	<u>0,008</u>	-	0,055	<u>0,013</u>	<u>1,004</u>	0,095
	-1,000	-0,889	-0,278	-0,605	8,956	2,003	29,542	-0,927		6,413	2,911	-0,938	-0,619
Áreas Úmidas	0,095	0,295	0,407	0,253	0,402	0,109	0,383	0,285	0,099	3,685	0,136	6,150	0,631
	<i>0,010</i>	<i>1,373</i>	<i>0,022</i>	<i>0,052</i>	<i>0,231</i>	<i>0,077</i>	<i>0,020</i>	<i>0,016</i>	<i>0,008</i>	<i>3,685</i>	<i>0,025</i>	<i>10,022</i>	<i>0,949</i>
	<u>0,005</u>	<u>0,749</u>	<u>0,012</u>	<u>0,029</u>	<u>0,126</u>	<u>0,042</u>	<u>0,011</u>	<u>0,009</u>	<u>0,004</u>	-	<u>0,014</u>	<u>1,058</u>	0,100
	8,548	-0,786	17,255	3,826	0,746	0,427	17,967	17,158	11,540		4,391	-0,386	1,598
Urbano	0,003	0,035	0,036	0,016	0,104	0,072	0,007	0,003	0,007	0,124	1,016	1,425	0,123
	<i>0,001</i>	<i>0,205</i>	<i>0,003</i>	<i>0,008</i>	<i>0,034</i>	<i>0,011</i>	<i>0,003</i>	<i>0,002</i>	<i>0,001</i>	<i>0,016</i>	<i>1,016</i>	<i>9,593</i>	<i>0,908</i>
	<u>0,005</u>	0,717	<u>0,012</u>	<u>0,027</u>	<u>0,120</u>	<u>0,040</u>	<u>0,011</u>	<u>0,008</u>	<u>0,004</u>	<u>0,056</u>	-	<u>1,013</u>	0,096
	1,150	-0,827	9,732	1,091	2,041	5,352	1,325	0,356	4,551	6,766		-1,000	-0,550
Total	0,510	70,742	1,149	2,701	11,876	3,943	1,041	0,809	0,407	5,519	1,302		
Ganancia	0,000												
	0,000												
	0,000												
	0,123	2,305	0,926	0,339	2,055	0,361	0,711	0,371	0,157	1,834	0,286		

Valores em Negrito: porcentagem com relação a toda a imagem, **Valores em Itálico:** valor esperado se a mudança fosse pelo azar, **Valores Sublinhados:** é a diferença entre o valor observado e estimado. **Valores simples:** Índice: valor observado menos o estimado dividido pelo estimado

Valores destacados na cor amarelo: mudanças significativas

Valores destacados na cor azul: mudanças aparentemente não significativas

O solo exposto ganhou superfície dos corpos d'água em uma magnitude 5 vezes maior (diferença 0,004 e índice 5.107), neste caso, mesmo que os valores sejam muito baixos, o valor do índice mostra a magnitude da mudança que foi observada no último período de seca que afetou o Estado do Ceará; em algumas áreas quando se reduz a lâmina de água o solo fica exposto. Também foi observado como as áreas úmidas ganham superfície das dunas oito vezes o esperado (diferença 0,057 e índice 8.317), esta magnitude está associada às áreas de várzea nas lagoas interdunares, que ficam com maior umidade na época em que chove a média esperada.

Outras mudanças aparentemente não significativas, mas que representam tendências e pequenas variações constatadas no campo, correspondem a mudanças menores em termos de superfícies e maiores em magnitude. Áreas dedicadas a atividade da carcinicultura ganham áreas de lâminas de água (diferença 0,027 e índice 4.019) e áreas de solo exposto (diferença 0,027 e índice -0.605); o primeiro foi observado na construção dos tanques sobre áreas de corpos de água próximas a riachos ou rios. O segundo caso como parte da construção de novos tanques em áreas de solo expostos localizadas ao redor dos empreendimentos já existentes.

Áreas urbanas ganham superfícies menores do que o esperado de arbustivo caducifólio, sem substituição (diferença 0,013 e índice -0.946); isto pode ser observado nas áreas de expansão dos centros urbanos.

O caso do manguezal é importante mencioná-lo, já que de acordo com os moradores da localidade de Cumbe, desde aproximadamente o ano 2010, o mangue está morrendo como consequência da atividade intensiva de carcinicultura. Tanto no trabalho de campo como no processo de classificação da imagem Landsat, foi observado como os corpos de água e áreas úmidas foram substituindo áreas que anteriormente eram manguezal (Figura 46). Embora as magnitudes sejam pouco mais do dobro das superfícies esperadas pela sorte (transição água - manguezal com diferença 0,005 e índice 2.567 e transição área úmida - manguezal com diferença 0,056 e índice 2.768), a matriz trouxe dados que confirmam a relação observada em campo e relatada pelos moradores. Dunas ganhando superfícies de solo exposto e arbustivos caducifólios ganhando áreas urbanas, não são reais e correspondem a erros na classificação das imagens.

Figura 46 - Transições do Manguezal para áreas úmidas e corpos de água. A. Poucos manguezais na beira do rio e no fundo área úmida com carnaúbas. B. Manguezal morto próximo ao rio Jaguaribe onde é visível a lâmina de água dentro dos restos do mangue. C. Manguezal morto que continua ao longo de um dos braços do Jaguaribe, no fundo a ponte da estrada da Canavieira.



Fonte: Durán (Agosto 2018).

Considerando as perdas totais para cada classe em relação às outras, destaca-se que: quando classes diferentes de cultivos perdem superfícies, esta classe as substitui (diferença 0,107 e índice 1,193). Quando são diferentes do arbustivo caducifólio são substituídos por esta classe (diferença 0,102 e índice 0,147). Para as outras classes diferentes a áreas úmidas são substituídas por esta (diferença 0,100 e índice 1,598). Quando classes diferentes de corpos d'água, arbustivo, carcinicultura, dunas, manguezal e urbano perdem, estas não são substituídas por estas classes, pelo índice negativo. Os resultados da matriz de transição, do ponto de vista das perdas, são apresentadas na tabela 19. Quando o Arbustivo perde superfície é substituído de forma significativa pelo arbustivo caducifólio (diferença 0,027 e índice 17,242) e em menor proporção por dunas (diferença 0,009 e índice 7,772). O arbustivo caducifólio é substituído por carcinicultura (diferença 0,003 e índice 5,462) e gramíneas (diferença 0,004 e índice 13,164). Quando as áreas de carcinicultura e cultivos perdem superfície, são substituídas por áreas úmidas numa magnitude entre 3 e 4 vezes o esperado. As dunas são substituídas por carcinicultura em uma perda menor a esperada (diferença 0,003 e índice -0.835) e por gramíneas (diferença 0,004 e índice 0.418) que aparecem principalmente nas planícies de deflação e nas áreas de várzea próximas às lagoas interdunares.

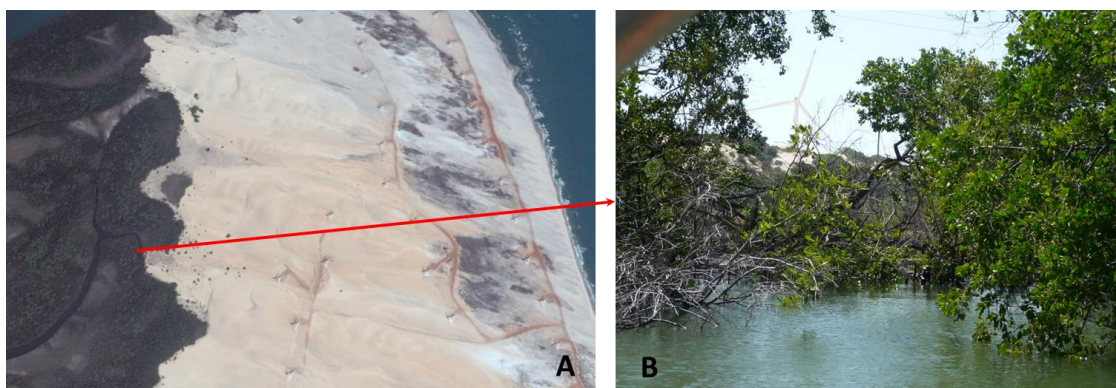
Tabela 19 - Matriz de transição desde as perdas entre 2017 – 2018 em Aracati.

	Água	Arbustivo	Arbustivo caducifólio	Carcinicultura	Cultivos	Dunas	Gramineas	Mangue	Solo exposto	Áreas Úmidas	Urbano	Total	
Água	0,387 <i>0,387</i> <u>0,016</u> -0,797	0,009 <i>0,024</i> <u>0,008</u> -0,514	0,009 <i>0,007</i> <u>0,003</u> 7,678	0,017 <i>0,001</i> <u>0,003</u> -0,978	0,049 <i>0,050</i> <u>0,023</u> -0,884	0,131 <i>0,001</i> <u>0,003</u> -1,000	0,008 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 60,152	0,030 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,003 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 0,541	0,346 <i>0,061</i> <u>0,025</u> 0,885	0,003 <i>0,002</i> <u>0,004</u> 0,885		0,992
Arbustivo	0,005 <i>0,012</i> <u>0,020</u> -0,264	68,437 <i>68,437</i> -	0,165 <i>0,022</i> <u>0,027</u> 17,242	0,029 <i>0,004</i> <u>0,011</u> 0,754	0,951 <i>0,166</i> <u>0,074</u> 8,028	0,005 <i>0,003</i> <u>0,009</u> 7,772	0,023 <i>0,004</i> <u>0,012</u> 4,227	0,005 <i>0,000</i> <u>0,003</u> 28,976	0,001 <i>0,004</i> <u>0,011</u> 2,163	0,308 <i>0,202</i> <u>0,082</u> 0,455	0,047 <i>0,006</i> <u>0,014</u> 5,389		69,976
Arbustivo caducifólio	0,003 <i>0,004</i> <u>0,006</u> 1,526	0,393 <i>0,024</i> <u>0,016</u> 5,893	0,223 <i>0,223</i> -	0,003 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 5,464	0,198 <i>0,050</i> <u>0,023</u> 4,466	0,013 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 6,780	0,008 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 13,164	0,001 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 6,536	0,000 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 0,097	0,184 <i>0,061</i> <u>0,025</u> 5,632	0,001 <i>0,002</i> <u>0,004</u> 20,171		1,028
Carcinicultura	0,010 <i>0,004</i> <u>0,006</u> 3,471	0,006 <i>0,024</i> <u>0,016</u> 0,187	0,007 <i>0,007</i> <u>0,008</u> -0,481	2,362 <i>2,362</i> -	0,003 <i>0,051</i> <u>0,023</u> -0,845	0,000 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 1,055	0,029 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 4,240	0,039 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 22,876	0,001 <i>0,000</i> <u>0,004</u> 0,387	0,230 <i>0,062</i> <u>0,025</u> 3,053	0,005 <i>0,002</i> <u>0,004</u> 8,536		2,691
Cultivos	0,001 <i>0,004</i> <u>0,007</u> 10,673	1,497 <i>0,027</i> <u>0,017</u> 34,358	0,275 <i>0,007</i> <u>0,009</u> 25,926	0,008 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 1,192	9,821 <i>9,821</i> -	0,005 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 6,636	0,200 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 104,750	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 13,882	0,024 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 138,102	0,174 <i>0,069</i> <u>0,028</u> 4,826	0,047 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 54,108		12,052
Dunas	0,000 <i>0,004</i> <u>0,006</u> 33,428	0,023 <i>0,025</i> <u>0,016</u> -0,788	0,006 <i>0,007</i> <u>0,008</u> 0,970	0,002 <i>0,001</i> <u>0,003</u> -0,835	0,007 <i>0,052</i> <u>0,023</u> -0,895	3,582 <i>3,582</i> -	0,003 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 0,418	0,008 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 28,282	0,006 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 14,228	0,193 <i>0,063</i> <u>0,026</u> 0,729	0,033 <i>0,002</i> <u>0,004</u> 40,774		3,865
Gramineas	0,000 <i>0,004</i> <u>0,006</u> 1,155	0,022 <i>0,024</i> <u>0,015</u> -0,052	0,018 <i>0,007</i> <u>0,008</u> 0,218	0,007 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 25,286	0,152 <i>0,050</i> <u>0,022</u> 2,988	0,002 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 3,078	0,330 <i>0,330</i> -	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 0,681	0,016 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 41,239	0,134 <i>0,061</i> <u>0,025</u> 5,266	0,005 <i>0,002</i> <u>0,004</u> 3,171		0,686
Manguezal	0,007 <i>0,004</i> <u>0,006</u> 7,149	0,011 <i>0,024</i> <u>0,015</u> -0,808	0,001 <i>0,007</i> <u>0,008</u> -0,885	0,003 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 34,640	0,002 <i>0,050</i> <u>0,022</u> -0,998	0,003 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 9,619	0,000 <i>0,001</i> <u>0,004</u> -0,853	0,438 <i>0,438</i> -	0,000 <i>0,001</i> <u>0,003</u> -0,921	0,078 <i>0,061</i> <u>0,025</u> 3,668	0,000 <i>0,002</i> <u>0,004</u> 0,894		0,543
Solo exposto	0,000 <i>0,004</i> <u>0,006</u> -0,163	0,012 <i>0,024</i> <u>0,015</u> -0,949	0,001 <i>0,007</i> <u>0,008</u> -1,000	0,002 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 0,025	0,186 <i>0,050</i> <u>0,022</u> -0,525	0,019 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 6,815	0,050 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 11,540	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,250 <i>0,250</i> -	0,065 <i>0,061</i> <u>0,025</u> 0,621	0,008 <i>0,002</i> <u>0,004</u> 2,896		0,593
Áreas Úmidas	0,095 <i>0,004</i> <u>0,007</u> 82,268	0,295 <i>0,027</i> <u>0,017</u> 10,435	0,407 <i>0,007</i> <u>0,009</u> 24,000	0,253 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 185,032	0,402 <i>0,057</i> <u>0,025</u> 2,073	0,109 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 212,526	0,383 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 91,830	0,285 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 619,958	0,099 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 47,161	3,685 <i>3,685</i> -	0,136 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 64,440		6,150
Urbano	0,003 <i>0,004</i> <u>0,006</u> -0,195	0,035 <i>0,024</i> <u>0,016</u> 0,968	0,036 <i>0,007</i> <u>0,008</u> -0,900	0,016 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 3,744	0,104 <i>0,051</i> <u>0,023</u> -0,070	0,072 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 39,597	0,007 <i>0,001</i> <u>0,004</u> 2,927	0,003 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 2,336	0,007 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 5,714	0,124 <i>0,062</i> <u>0,025</u> 1,210	1,016 <i>1,016</i> -		1,425
Total	0,510 <i>9,563</i> <u>1,010</u> -0,947	70,742 <i>31,536</i> <u>3,331</u> 1,243	1,149 <i>9,567</i> <u>1,010</u> -0,880	2,701 <i>9,730</i> <u>1,028</u> -0,722	11,876 <i>10,766</i> <u>1,137</u> 0,103	3,943 <i>9,849</i> <u>1,040</u> -0,600	1,041 <i>9,534</i> <u>1,007</u> -0,891	0,809 <i>9,520</i> <u>1,005</u> -0,915	0,407 <i>9,525</i> <u>1,006</u> -0,957	5,519 <i>10,760</i> <u>1,136</u> -0,487	1,302 <i>9,605</i> <u>1,014</u> -0,864		
ganho	0,123 <i>0,906</i> <u>0,096</u> -0,864	2,305 <i>2,986</i> <u>0,315</u> -0,228	0,926 <i>0,906</i> <u>0,096</u> 0,022	0,339 <i>0,921</i> <u>0,097</u> -0,632	2,055 <i>1,019</i> <u>0,108</u> 1,016	0,361 <i>0,933</i> <u>0,098</u> -0,613	0,711 <i>0,903</i> <u>0,095</u> -0,212	0,371 <i>0,901</i> <u>0,095</u> -0,588	0,157 <i>0,902</i> <u>0,095</u> -0,826	1,834 <i>1,019</i> <u>0,108</u> 0,800	0,286 <i>0,909</i> <u>0,096</u> -0,686		

Valores em Negrito: porcentagem com relação a toda a imagem, **Valores em Itálico:** valor esperado se a mudança fosse pelo azar, **Valores Sublinhados:** é a diferença entre o valor observado e estimado. **Valores simples:** Índice: valor observado menos o estimado dividido pelo estimado
Valores destacados na cor amarelo: mudanças significativas
Valores destacados na cor azul: mudanças aparentemente não significativas

O manguezal perde superfície, sendo substituído por corpos de água (diferença 0,006 e índice -7.149) e dunas (diferença 0,003 e índice 9.619). O avanço das dunas sobre o manguezal foi relatado pelos pescadores de Cumbe no trabalho de campo e observado no limite entre o campo de dunas móveis e o manguezal, localizado em uma das gamboas na foz do rio Jaguaribe, local que permite o acesso durante a maré alta. De acordo com os relatos dos moradores, a retirada de areia pelo maquinário para evitar o soterramento das torres e a estrada de acesso ao parque eólico, acelera o transporte das areias, causando assoreamento na foz do rio Jaguaribe, visível durante a maré baixa (Figura 47). O solo exposto perde superfície sendo substituído pela carcinicultura (diferença 0,003 e índice -1).

Figura 47 - Transição de perda do manguezal pelo avanço das dunas. **A.** Imagem do catálogo de Google Earth mostrando o local do canal sinuoso ou gamboa onde foi tomada a foto B. **B.** Limite do campo de dunas e o manguezal onde foi relatado o avanço da duna, a uns 700m aproximadamente de um aerogerador



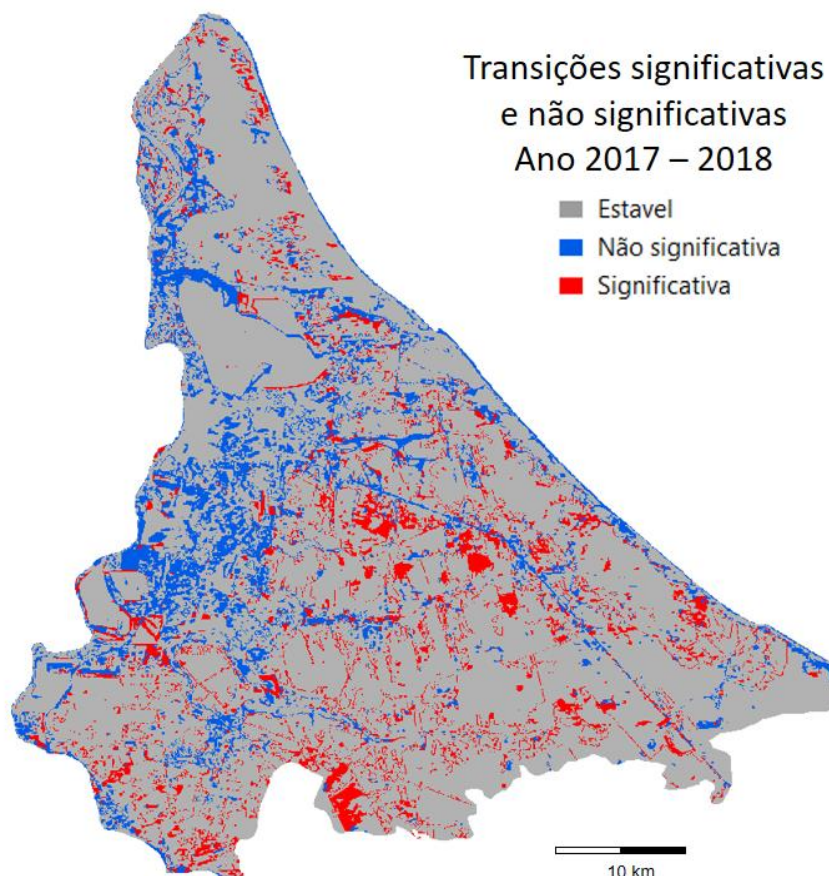
Fonte: Durán (Agosto, 2018).

Considerando o ganho total para cada classe com relação as outras menciona-se que: quando classes diferentes de áreas úmidas ganham superfícies de forma significativa, substitui as áreas úmidas (diferença 0,109 e índice 2,582), se outras classes diferentes dos arbustivos caducifólios ganham de forma significativa, estas a substituem (diferença 0,096 e índice 0,022). As classes que aumentaram sua superfície de forma significativa, corpos d'água, carcinicultura, dunas, gramíneas e solo exposto, não substituem as outras classes por terem índices negativos.

A Figura 48 apresenta a distribuição das transições em Aracati no período 2017 – 2018, dando como resultado: 33.171,72 ha estáveis, 3.800,93 ha de

transições significativas e 5.089,01 ha de transições não significativas, representando 78,86 %, 9,07 % e 12,09 % da superfície total, respectivamente.

Figura 48 - Transições significativas e não significativas no período 2017 – 2018 em Aracati.



Fonte: Elaboração própria.

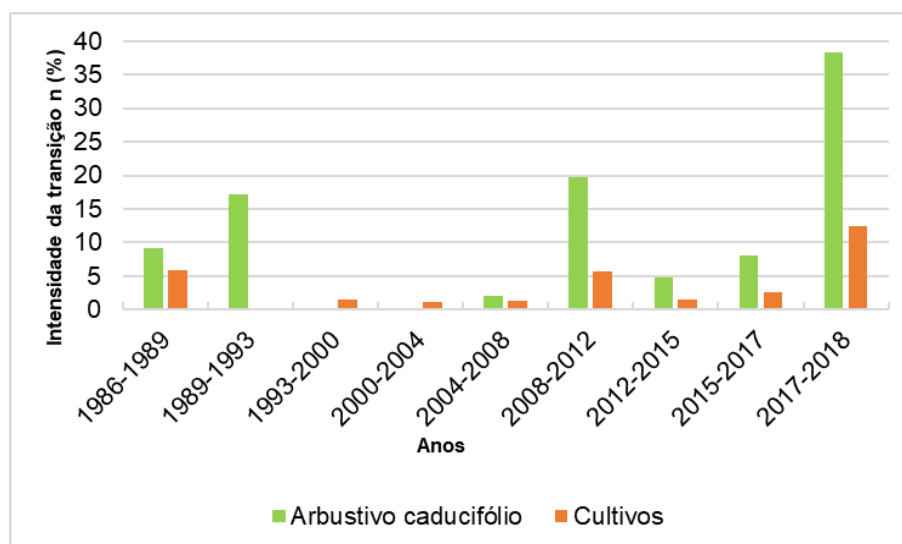
O método de Aldwaik e Pontius (2012) permite determinar quais classes avançam para as transições de forma preferencial e quais classes evitam a transição durante cada um dos intervalos de tempo estudados. Os resultados mostraram que além das transições de classes por intervalo de tempo, há uma tendência de algumas classes a avançar de forma preferencial em todos os intervalos de tempo, enquanto em outras evitavam a transição em alguns anos, mas avançam em outros.

Como a análise da intensidade de transição observada, refere-se à comparação com o valor de intensidade uniforme, ao invés de mostrar as transições para cada intervalo de tempo pré-estabelecido, foram escolhidas as classes cujos valores de intensidade de transição observadas superavam o valor da intensidade

uniforme e mantiveram esta condição durante o mínimo de sete intervalos de tempo. Esta opção mostrou as classes que vão para a transição de forma preferencial em Aracati através dos diversos intervalos entre 1986 e 2018. Na sequência são apresentadas as transições que foram consideradas as mais interessantes.

As fontes de transição para áreas arbustivas (Figura 49) para os ganhos, foram cultivos como principal fonte, seguido do arbustivo caducifólio, em ambas classes não ocorrem transições entre os anos 1989 – 1993 e 1993 – 2004, respectivamente. As maiores intensidades de transição se concentram entre os anos 2017 – 2018 com 38.26% para arbustivo caducifólio e 12.42% para cultivos.

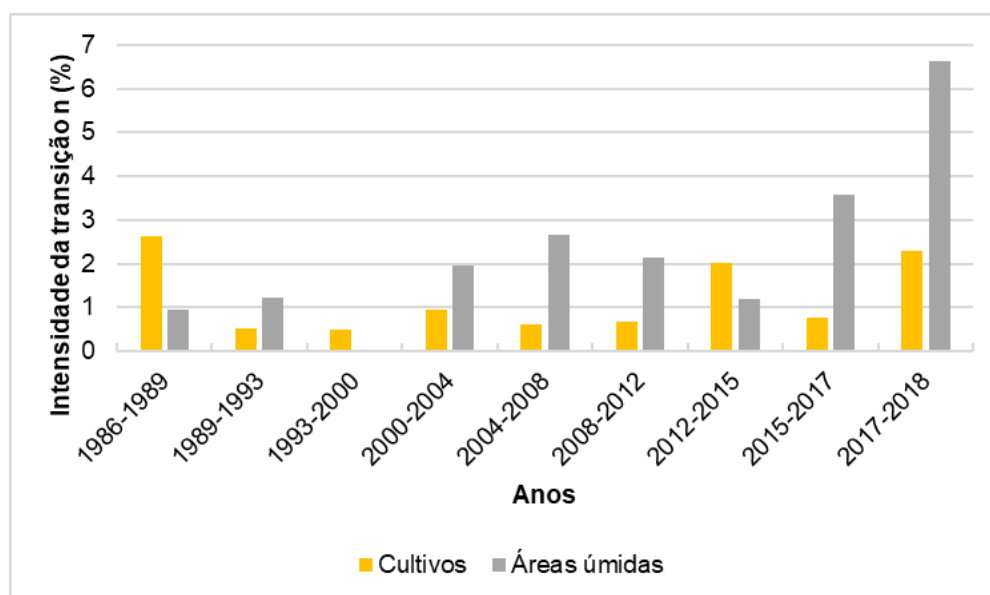
Figura 49 - Intensidade de mudança dos arbustos baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.



Fonte: Elaboração própria.

A principal fonte de transição para áreas arbustivas caducifólio (Figura 50) de ganhos, foram os cultivos, que mostraram uma transição preferencial entre 1986 e 2018, tendo um comportamento estacionário, já que avança para todos os intervalos de estudo, mesmo com algumas variações de intensidade, sendo a menor e maior intensidades com 0,49 % e 2.62 % correspondentes aos intervalos de tempo 1993 – 2000 e 1986 – 1989, respectivamente. Outra fonte de transição preferencial que avançou em quase todos os intervalos de tempo foram as áreas úmidas, que evitou a transição entre 1993 e 2000.

Figura 50 - Intensidade de mudança dos arbustos caducifólios baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.

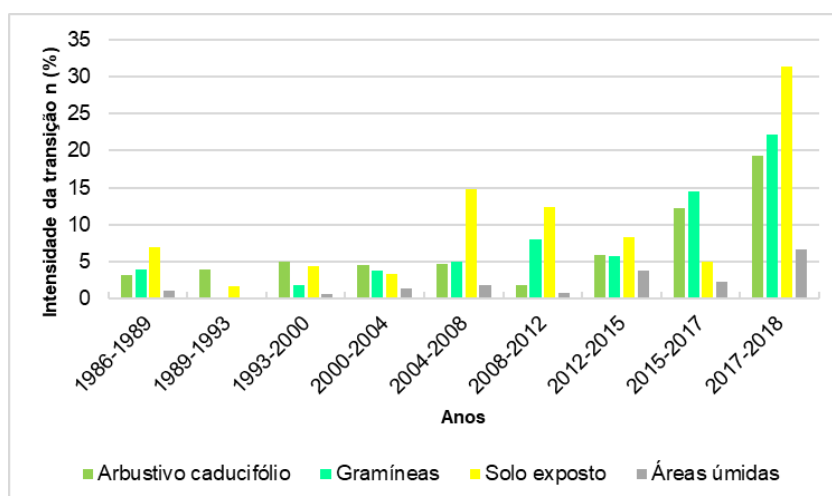


Fonte: Elaboração própria.

As áreas de cultivos tiveram como fontes de transição preferencial, em todos os intervalos de tempo, os solos expostos e arbustivo caducifólio (Figura 51), que apresentaram um comportamento estacionário. Os valores de maior intensidade correspondem a 19,28% para o arbustivo caducifólio e 31,43% para solo exposto entre 2017 e 2018; enquanto os valores de menor intensidade correspondem a 1,72% para o arbustivo caducifólio entre 2008 e 2012 e 1,67% para solo exposto entre 1989 e 1993.

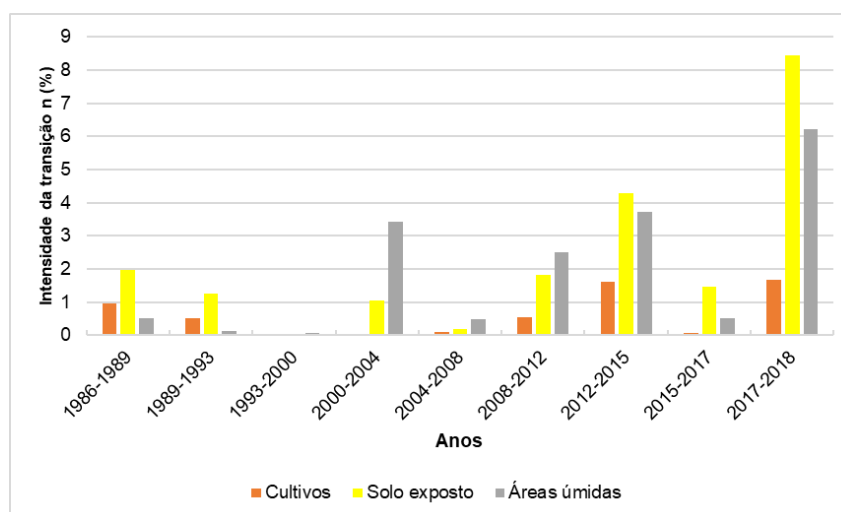
Outras fontes de transição preferencial onde houve avanço em quase todos os intervalos de tempo foram as gramíneas e as áreas úmidas, que evitam a transição entre os anos 1989 e 1993. Destaca-se o avanço da extensão das gramíneas, com valores de intensidade intermediários entre arbustivo caducifólio e solo exposto.

Figura 51 - Intensidade de mudança dos cultivos baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.



As áreas de gramíneas tiveram como fonte de transição preferencial, em todos os intervalos, as áreas úmidas (Figura 52), que apresentaram um comportamento estacionário, mesmo com algumas variações da intensidade, sendo os valores de menor e maior intensidade de 0,06% e 8,45%, entre 1993 – 2000 e 2017 – 2018, respectivamente. Outras fontes de transição preferencial que avançaram em quase todos os intervalos de tempo foram: os cultivos, que evitaram a transição entre 1993 e 2004 e o solo exposto que evitou a transição nos anos 1993 – 2000.

Figura 52 - Intensidade de mudança das gramíneas baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.



Fonte: Elaboração própria.

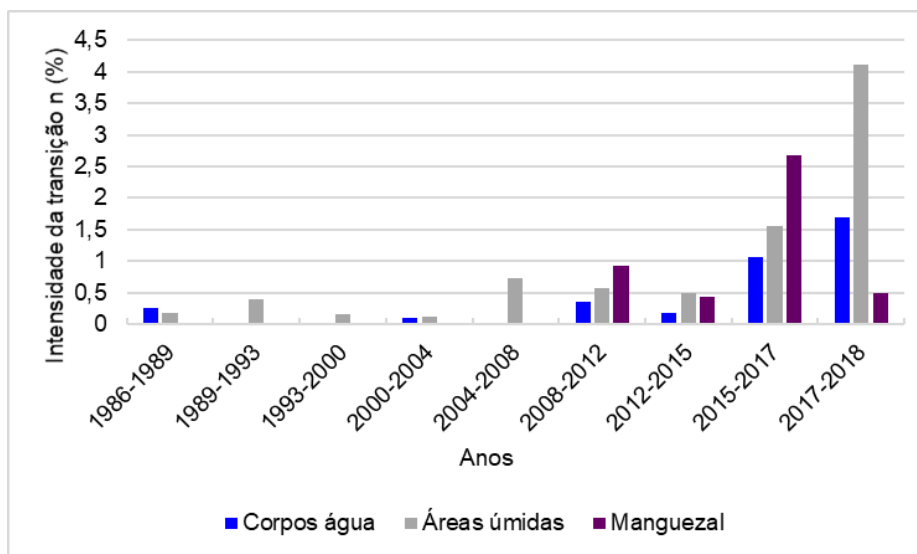
Sobre as fontes de transição das classes arbustivo, arbustivo caducifólio e cultivos, observou-se que existe uma dinâmica de ganhos e perdas entre as mudanças entre estas classes, onde dependendo do intervalo do tempo e da ação de fenômenos como a seca por exemplo, outras classes como gramíneas, solo exposto e áreas úmidas avançam ou evitam a expansão sobre as três primeiras classes.

Entre a classe arbustivo e cultivos existe uma relação inversamente proporcional: quando a área arbustiva aumenta, as áreas de cultivo se reduzem e vice-versa, sendo visível na maioria dos intervalos de tempos, com exceção dos anos 1994 - 2000 onde ambas classes parecem ganhar e perder de uma forma mais equilibrada.

A expansão da carcinicultura na planície fluvio-marinha do baixo Jaguaribe, teve como fonte de transição preferencial em todos os intervalos as áreas úmidas (Figura 53), que apresentaram um comportamento estacionário, mesmo com algumas variações da intensidade, sendo a menor e maior intensidade de 0,12 % e 4,11 % correspondentes aos intervalos de tempo 2000 – 2004 e 2017 – 2018, respectivamente.

Outras fontes de transição preferencial onde houve avanço em alguns intervalos de tempo e ausência de transição em poucos intervalos de tempo, foram os corpos d'água e manguezal. Neste ponto destaca a maior intensidade de transição de áreas de manguezal para a prática da carcinicultura entre os anos 2008 – 2012 e 2015 - 2017, que coincide com os períodos de maior crescimento desta atividade na área de estudo. Os tanques de criação de camarão não apresentaram uma expansão expressiva entre 1986 e 1993 e estavam concentradas em uma área úmida localizada detrás do campo de dunas e naquela época não tinham proximidade com o manguezal da foz do rio Jaguaribe.

Figura 53 - Intensidade de mudança da carcinicultura baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.



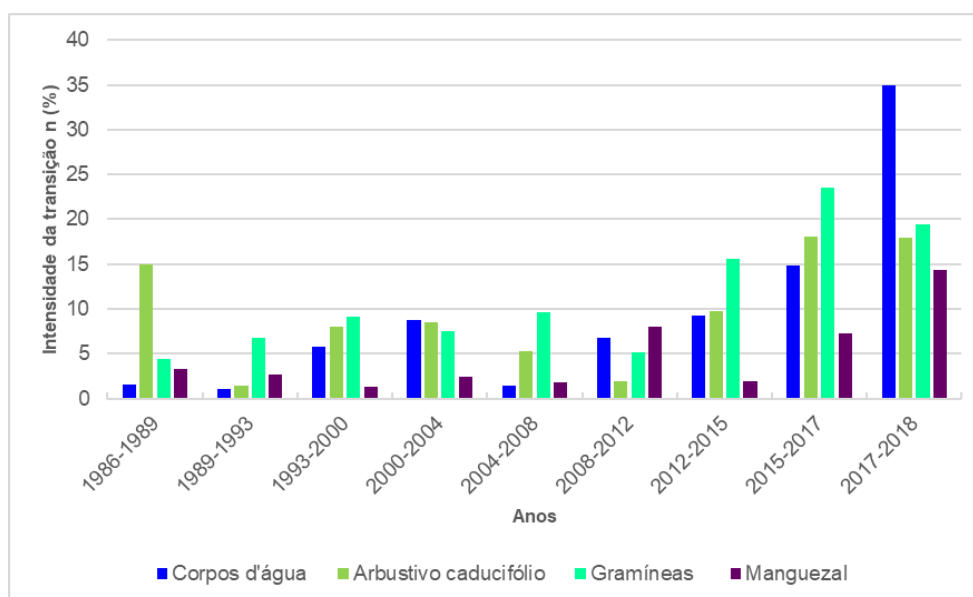
Fonte: Elaboração própria

As áreas úmidas tiveram como fonte de transição preferencial em todos os intervalos as gramíneas, seguido do arbustivo caducifólio, corpos d'água e manguezal (Figura 54), já que apresentaram um comportamento estacionário, mesmo com algumas variações de intensidade. Os valores de maior intensidade para arbustivo caducifólio e gramíneas se apresentaram entre 2015 e 2017, enquanto a maior intensidade dos corpos d'água e manguezal se encontrou entre 2017 e 2018.

Os corpos d'água, gramíneas e arbustivo caducifólio apresentam uma dinâmica de extensão associada com a precipitação, com maior presença de água, aumenta a superfície dos corpos d'água e se reduz a superfície de gramíneas e arbustivos, como aconteceu nos anos 2000 – 2004 e 2017 – 2018, enquanto com a precipitação abaixo da média, aumentam as superfícies de gramíneas principalmente, e depois as arbustivas caducifólias.

O manguezal como fonte de transição está relacionado às áreas de manguezal, que pela proximidade das áreas de criação de camarão, está morto e sua proximidade com outros tipos de cobertura acaba criando áreas úmidas. A proporção de manguezal que transicionou para áreas úmidas alcançou a maior intensidade de 14,35% entre 2017 e 2018.

Figura 54 - Intensidade de mudança das áreas úmidas baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018.

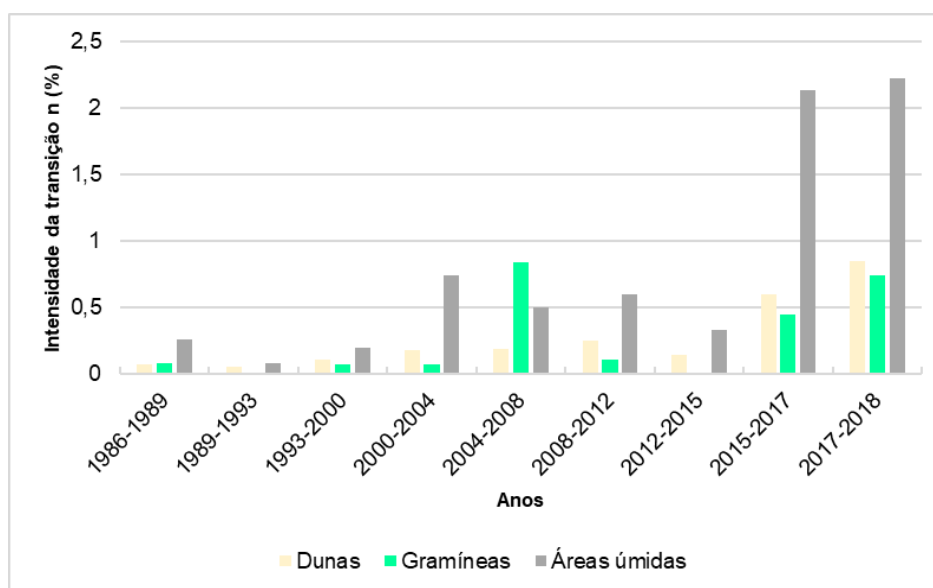


Fonte: Elaboração própria

Das fontes de transição para terras urbanas, as áreas úmidas foram a principal fonte, seguida pelas dunas. De acordo com a Figura 55, a intensidade de transição das classes mencionadas apresentou um comportamento estacionário, mesmo com algumas variações da intensidade. Outra fonte de transição preferencial que avançou em quase todos os intervalos de tempo foram as gramíneas, que evitaram a transição entre 1989 – 1993 e 2012 - 2015.

Houve um aumento gradativo das áreas úmidas sendo ocupadas na expansão urbana, tendo uma maior intensidade de transição de 2.22% entre 2015 e 2018. A expansão das terras urbanas sobre as dunas aumentou gradativamente, passando de 0.07% a 0.87% entre 1986 e 2018, o que corresponde a expansão dos povoados: Canoa Quebrada, Majorlândia, Quixabá e Lagoa do Mato, localizados sobre o campo de dunas móveis.

Figura 55 - Intensidade de mudança das terras urbanas baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1986 e 2018



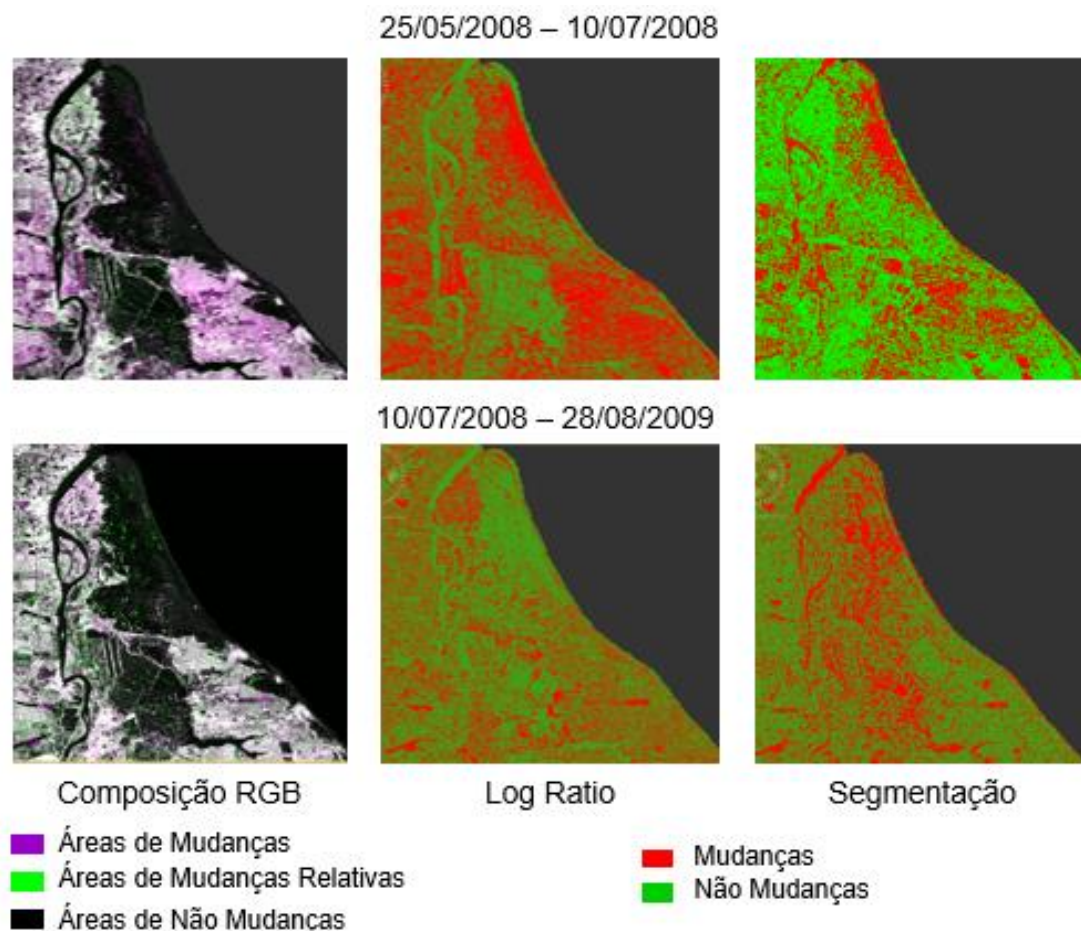
Fonte: Elaboração própria

4.2.1.2 Detecção de mudanças pelo método incoerente

Este resultado preliminar mostrou que é possível utilizar a técnica para complementar informações de imagens de satélites ópticos. Neste caso foram processadas 8 imagens entre os anos 2007 e 2011, com variações entre os intervalos de datas (1, 2, 4, 8, 12 meses) com a intenção de observar a capacidade dos métodos de discriminar mudanças de forma qualitativa e quantitativa nas imagens ALOS PALSAR, na área de estudo em Aracati, assim como avaliar se estas imagens podem auxiliar e proporcionar dados sobre o movimento das dunas móveis.

Na Figura 56, apresenta-se imagens em dois períodos cujas datas correspondem a antes e depois da instalação do parque eólico. Entre os meses de maio e junho do ano de 2008 ressaltam, nos três métodos (composição RGB, Log Ratio, Segmentação), mudanças no tabuleiro pré-litorâneo, áreas de cultivo e no campo de dunas móveis. No caso desta última unidade, a mudança pode estar relacionada aos movimentos de terra para construção das estadas de acesso aos parques eólicos.

Figura 56 - Comparação dos resultados com os métodos Composição RGB, Log Ratio e Segmentação em Aracati.



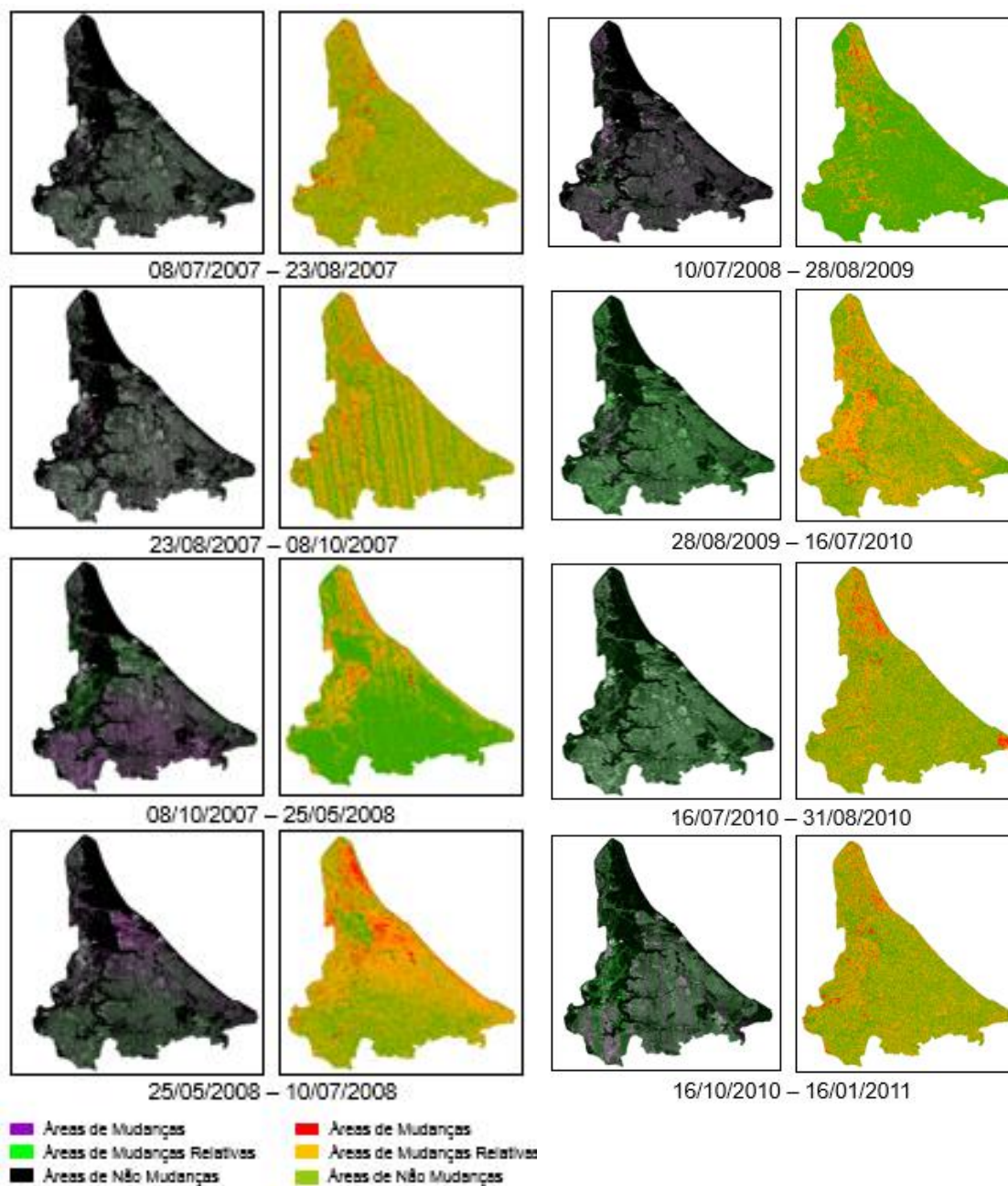
Fonte: Durán (2017).

Aquelas áreas com redução do retroespalhamento se referem a uma variação do elemento que causa o retroespalhamento, ressaltam no canal verde, indicando uma mudança relativa, que pode ser associada a mudanças fenológicas da cobertura vegetal, modificações na posição ou tamanho. As áreas em cores negras mostram o contrário, nenhuma mudança nos elementos das cenas.

A aplicação do *Log Ratio* e Segmentação permitiram identificar as áreas de mudança, considerando limiares produto de análise dos dados com estatística, proporcionando uma quantificação das mudanças. A Figura 57, mostra os resultados de aplicação dos métodos em duas classes, para dois períodos: a) no método de Log Ratio: áreas de mudança que correspondem com os valores positivos da zona da hipótese alternativa, indicando a mudança e áreas de não mudança que correspondem aos valores negativos da zona da hipótese nula, indicando não mudança. b) no método de segmentação: áreas de mudança são aquelas que

correspondem ao valor igual a 1, enquanto as áreas com valores inferiores a 1 correspondem a áreas de não mudança.

Figura 57 - Identificação das mudanças nos métodos: combinação RGB (esquerda) e Log Ratio (direita) entre 2007 e 2011 em Aracati.



Fonte: Durán (2017).

Os resultados podem coincidir entre os métodos, mas em alguns casos um método pode identificar melhor uma feição do que o outro, porém não necessariamente correspondem entre si; por exemplo, alguns dos tanques de cultivo

de camarão são delimitados com a segmentação, mas no Log Ratio não (Figura 57). Desta forma, considera-se que a detecção de mudanças com o método incoerente mostra resultados que são complementários e dependendo da mudança que se deseja identificar, um método pode ser mais eficiente do que outro.

No caso do método Log Ratio, obtém-se valores positivos e negativos que podem ser interpretados como limiares de aceitação e rejeição de hipótese, sendo possível delimitar com maior precisão as áreas de mudanças. A Figura 57 mostra a comparação entre a combinação RGB e Log Ratio reclassificado em 8 imagens, destacando uma maior precisão nas áreas de mudanças representadas na cor vermelho, localizadas no campo de dunas móveis, nas áreas de cultivo de camarão, nas áreas úmidas e áreas de cultivo. Também destacam-se as áreas de mudanças relativas, na cor amarela, próximas às áreas de mudanças.

Um exemplo de identificação e delimitação de mudança pode ser observado na Figura 57, as imagens identificadas com o período 23/08/2007 – 08/10/2007, são um exemplo de como falhas de aquisição da imagem, que não podem ser corrigidas com técnicas de processamento digital de imagens, podem gerar resultados errados quanto à discriminação de áreas de mudança e não mudança, assim como causar uma superestimação no cálculo destas áreas, sendo que o valor de superfície correspondente a este período na tabela 20 pode não ser preciso.

A tabela 20, sintetiza os valores da superfície das áreas de mudança e não mudança entre os anos 2007 e 2011. Como este método foi aplicado com imagens que não correspondem a um mesmo período sazonal, apresenta a dificuldade de comparar sazonalmente as mudanças.

Tabela 20 - Superfícies de mudança com o método incoerente entre os anos 2007 e 2011 em Aracati.

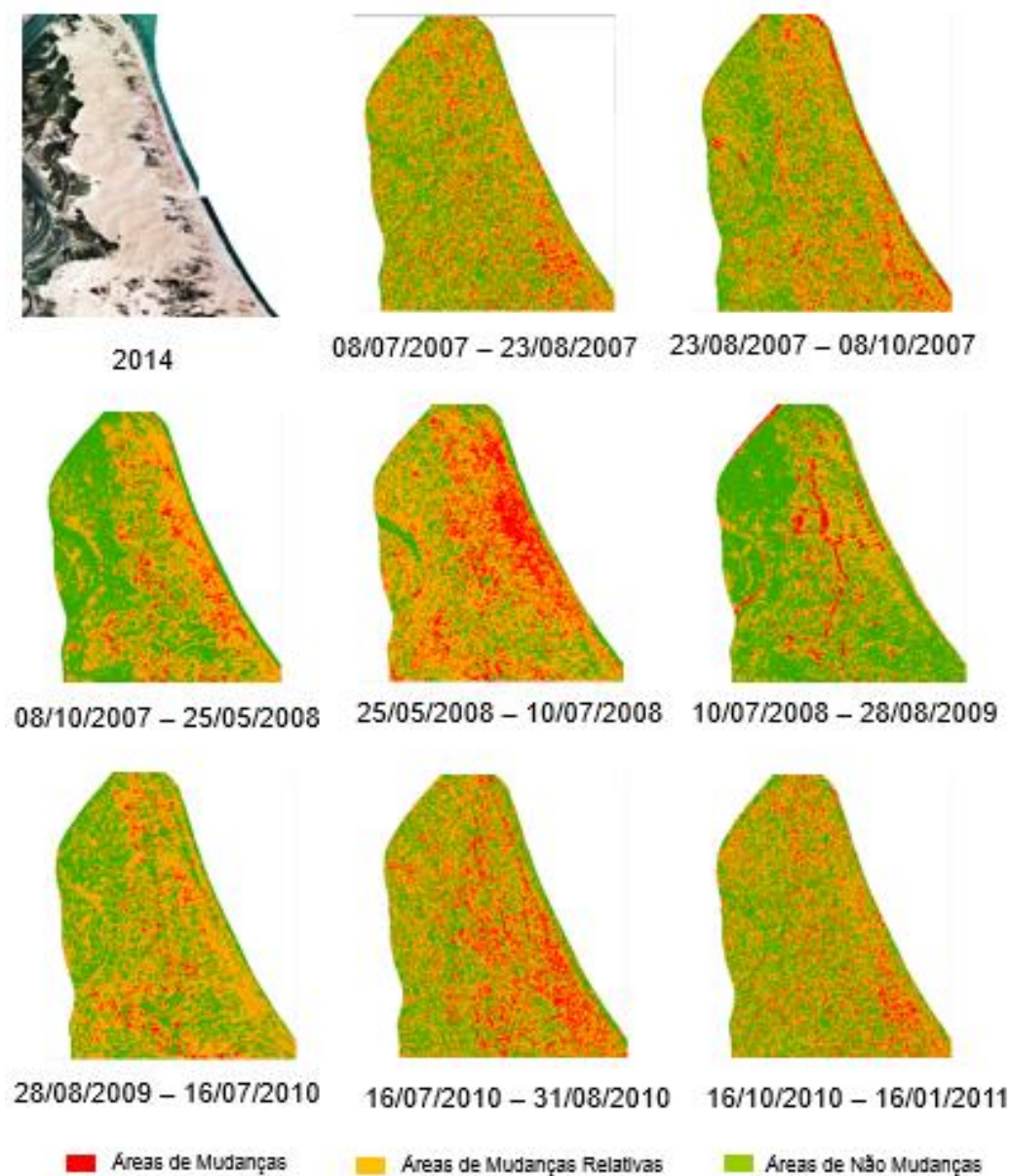
Datas	Área Mudança (km²)	Área não mudança (km²)
08/07/07 a 23/08/07	17,92	194,54
23/08/07 a 08/10/07	18,30	193,20
08/10/07 a 25/05/08	24,46	319,02
25/05/08 a 10/07/08	28,20	138,26
10/07/08 a 28/08/09	13,45	299,97
28/08/09 a 16/07/10	11,28	174,34
16/07/10 a 31/08/10	18,33	203,32
16/10/10 a 16/01/11	18,61	194,54

Fonte: Durán (2017).

Com base nos cálculos de superfícies de mudança em Aracati, foram identificados três cenários: a) o período 23/08/07 a 08/10/07 com 18,30 km² é semelhante ao período 16/07/10 a 31/08/10 com 18,33 km², que indica como a proporção de mudanças pode ser muito semelhante, num período de 46 dias, correspondendo a meses diferentes na estação seca; b) os períodos 10/07/08 até 16/07/10, com intervalos de 1 ano, apresentam uma redução das áreas de mudanças, por possuir os menores valores de superfície em km², que pode vincular-se com a estabilização das classes de uso e cobertura; c) entre 08/10/07 até 10/07/08 se apresentam os maiores valores de mudança, coincidindo com o período de construção do parque eólico.

A identificação de mudanças com o método Log Ratio (Figura 58), permitiu observar o processo de implantação do parque eólico: 1) no período 25/05/08 a 10/07/08 destaca uma área de mudança no campo de dunas móveis, possivelmente associada aos movimentos de terra; 2) no período 10/07/08 a 28/08/09 destaca uma feição linear que corresponde a estrada de acesso aos aerogeradores; 3) no período 28/08/09 a 16/07/10 destaca-se a localização dos aerogeradores como áreas estáveis ou de não mudança.

Figura 58 - Identificação de mudanças causadas pela construção do parque eólico em Aracati entre 2007 e 2011 pelo método Log Ratio.



Fonte: Durán (2017).

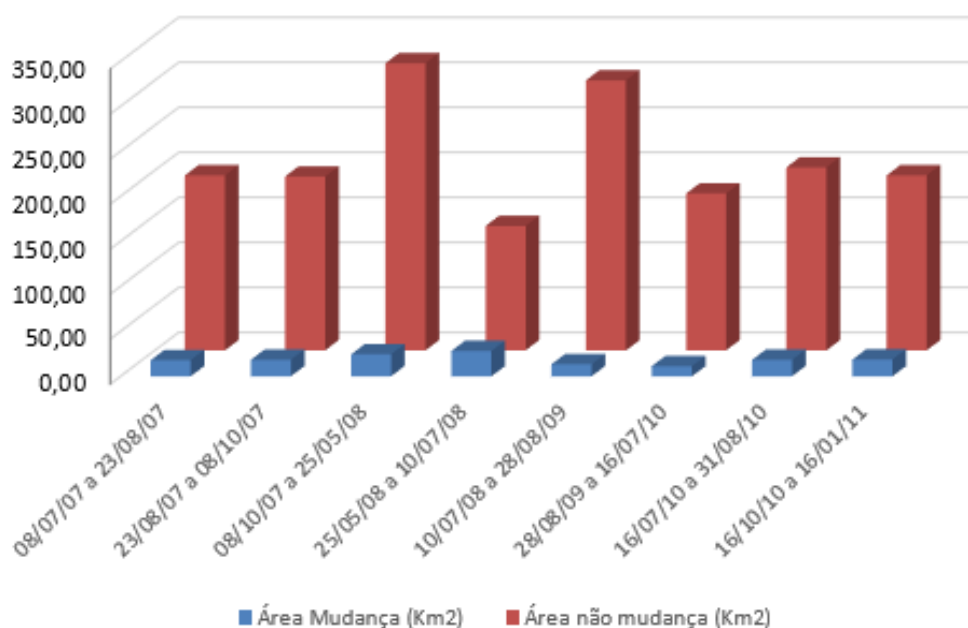
A implantação do parque eólico é um processo de mudança no campo de dunas móveis que serviu como elemento-controle da imagem, já que é um alvo conhecido do qual é conhecida a data de construção, e que foi um alvo útil na comprovação da capacidade de identificação de mudanças dos métodos nas imagens ALOS PALSAR. Neste sentido, a aplicação do método Log Ratio mostrou adequadamente as feições de mudança associadas a implantação do parque eólico, na Figura 58.

As áreas de não mudança abarcam uma superfície em km² notavelmente

superior as áreas de mudança, o que sugere que as mudanças são particulares e que podem ser associadas a determinadas classes de uso e cobertura de acordo a sua localização espacial. Este fato permitirá ajustar os limiares de classificação de áreas de mudança e não mudança.

A Figura 59, mostra a proporção entre áreas de mudança com não mudança, destacando poucas mudanças, assim como uma maior expressão espacial e variação nas superfícies identificadas como não mudanças. Ao longo da pesquisa espera-se explicar e relacionar este cenário com as mudanças temporais de uso e cobertura. Neste período de análise já existia o parque eólico e a mudança introduzida pela construção do mesmo encontra-se contabilizada nas áreas de mudança no período 05/05/08 a 10/07/08.

Figura 59 – Proporções de mudanças e não mudanças pela construção do parque eólico em Aracati entre 2007 e 2011 pelo método Log Ratio.



Fonte: Durán (2017).

4.2.1.3 Análise de mistura espectral

No campo de dunas de Aracati, com dunas de tipo longitudinal no centro e norte, em muitos casos não existe diferença espectral entre a duna e a cobertura ao redor dela, neste sentido a resolução radiométrica não é o suficientemente sensível

para ajudar a discriminar visualmente feições e estabelecer o perímetro de algumas dunas e lagoas interdunares, principalmente ao norte e centro do campo de dunas.

Já ao sul do campo de dunas foi possível identificar algumas dunas barcanóides, pela presença de lagoas interdunares e a vegetação, principalmente herbácea, presente no brejo interdunal, próximo às localidades Beirada e Canavieira. As feições observadas neste setor do campo de dunas móveis, destacadas nas Figuras 60 a 61, possuem uma extensão e uma configuração espacial que permitem sua discriminação na série temporal, apesar das diferenças em termos de resolução espacial, espectral e radiométrica.

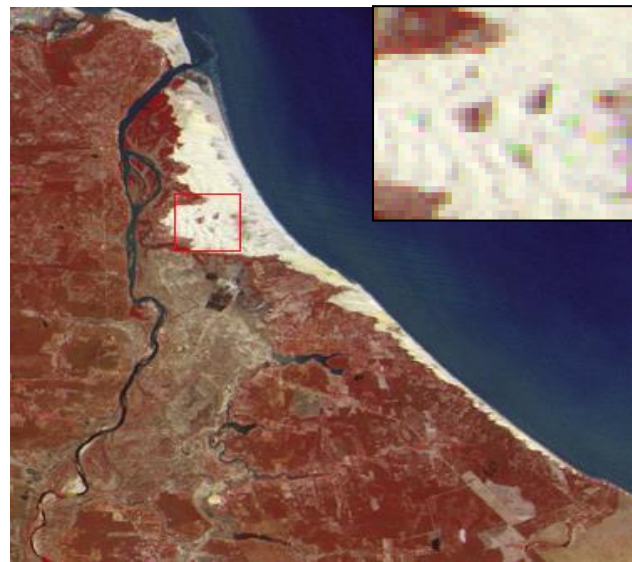
Para determinar se as imagens Landsat permitiam a identificação de feições no campo de dunas móveis, foi aplicada uma regra heurística onde a partir da observação das imagens objeto deste estudo, foi identificada que a duna de menor tamanho tem uma superfície de 100 m². Um alvo destas dimensões, seria parte da mistura espectral de um pixel de 30 m. Considerando a resolução espacial de 30 m do sensor TM, ETM+ e OLI, este exemplo descarta o uso de imagens Landsat para análise temporal de dunas, com cuja superfície seja inferior a 3.600m², que equivalem a 4 píxeis.

A variabilidade espacial e temporal pode ser observada entre as Figuras 60 a 61, de imagens Landsat, na composição RBG 4-3-2 no sensor TM e ETM+ e na composição RBG 5-4-3 no sensor OLI, para ressaltar o limite entre a cobertura vegetal e corpos d'água. Observa-se que apenas as imagens correspondentes aos anos de 1986 e 2009 em Aracati, mostram as lagoas interdunares com maior extensão do que no resto dos anos. No resto dos anos esta caracterização é variável.

Nas localidades de Beirada e Canavieira, em Aracati (Figura 60 a 61), observa-se que o campo de dunas móveis é um ambiente dinâmico, onde com o passar dos anos variam as formas das dunas, a extensão das lagoas e a presença de vegetação.



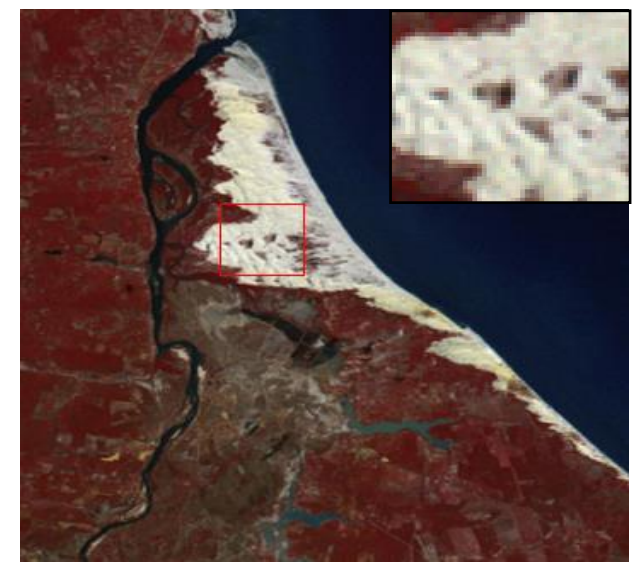
31-08-1975. LM2. Sensor MSS



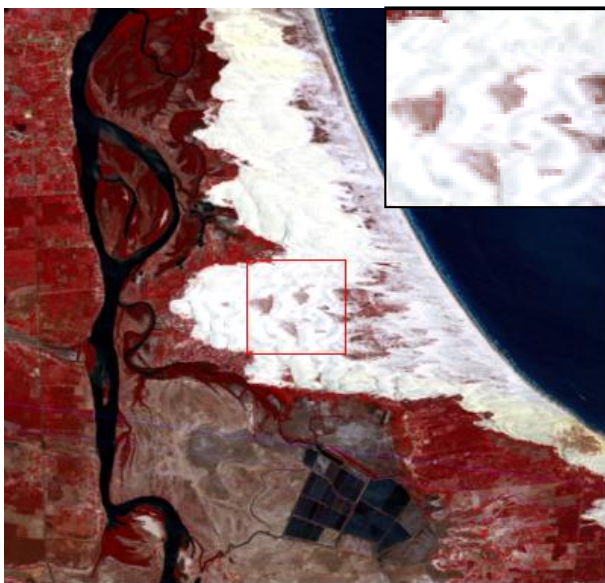
22-08-1980. LM2. Sensor MSS



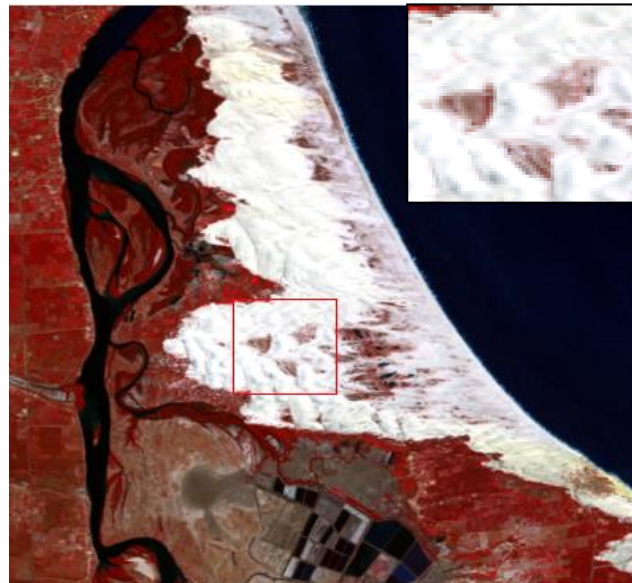
01-08-1986. LM5. Sensor MSS



24-07-1992. LT4. Sensor MSS



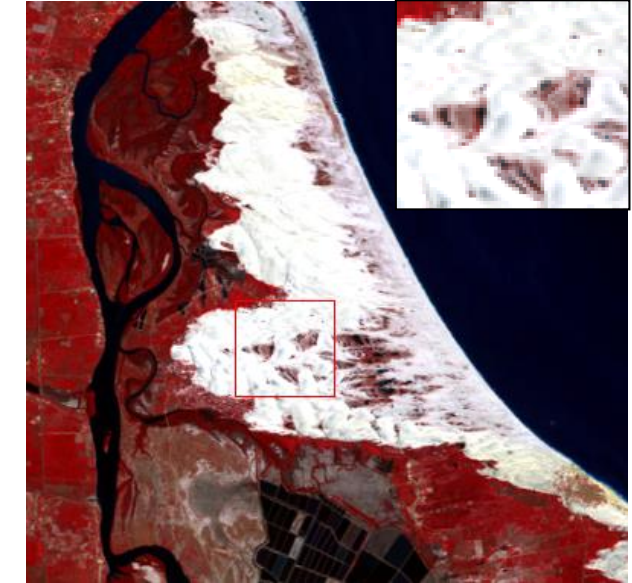
19-09-1998. LT5. Sensor TM



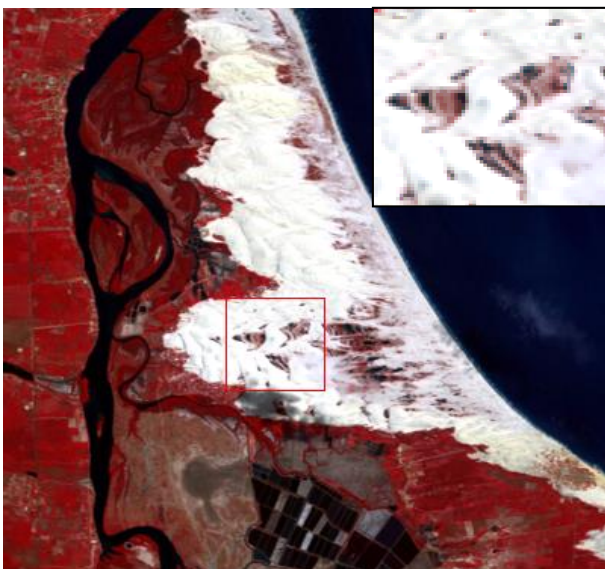
05-08-1999. LT5. Sensor TM



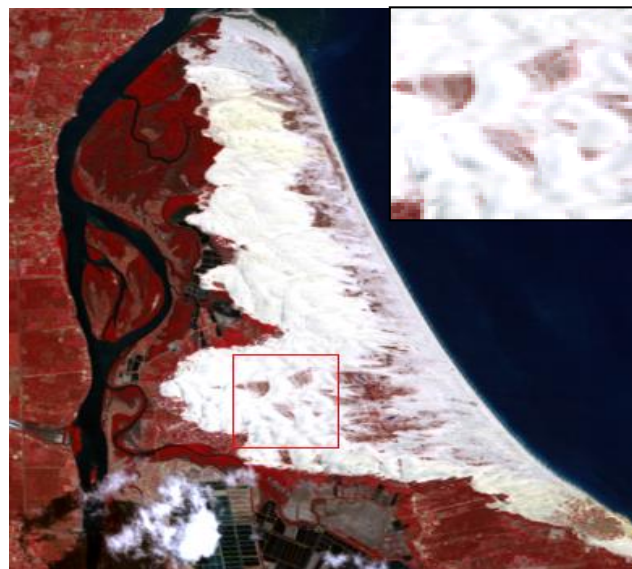
23-08-2000. LT5. Sensor TM



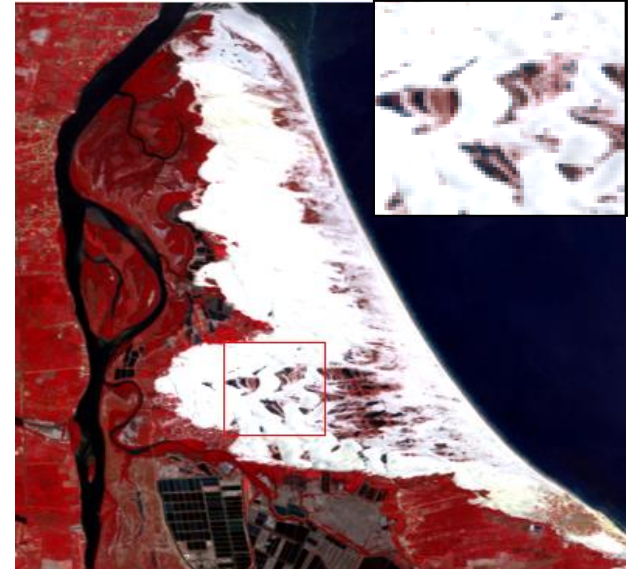
25-07-2001. LT5. Sensor TM



31-07-2003. LT5. Sensor TM



21-08-2005. LT5. Sensor TM



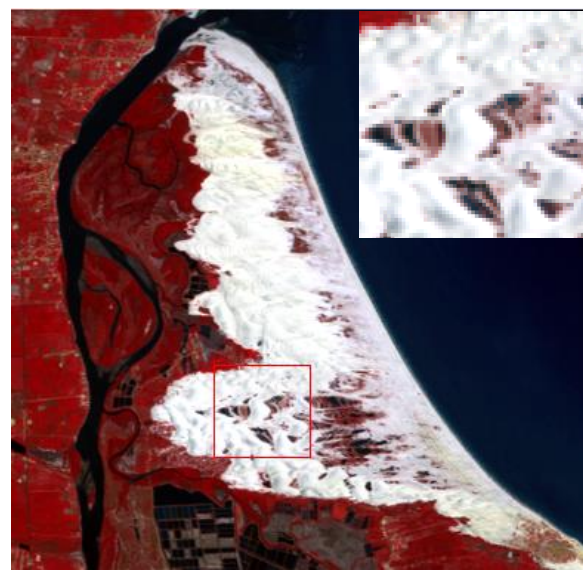
08-08-2006. LT5. Sensor TM

Figura 60 - Serie Temporal de Imagens Landsat em Aracati, com ênfase no campo de dunas móveis e lagoas interduais entre 1975 – 2006.

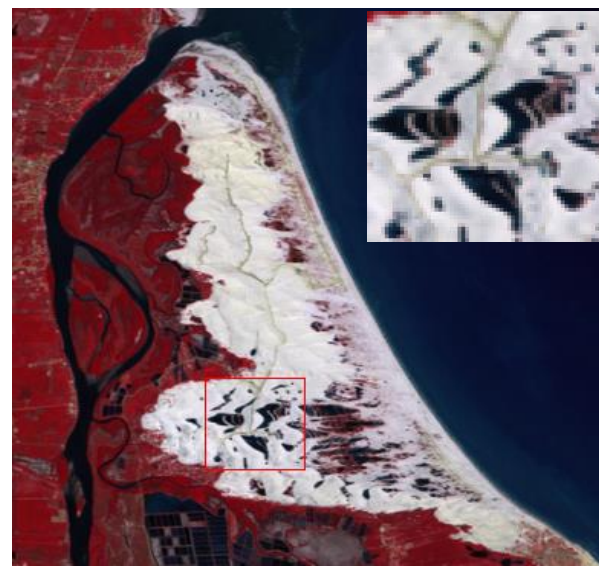
Fonte: USGS (2018), INPE (2017)



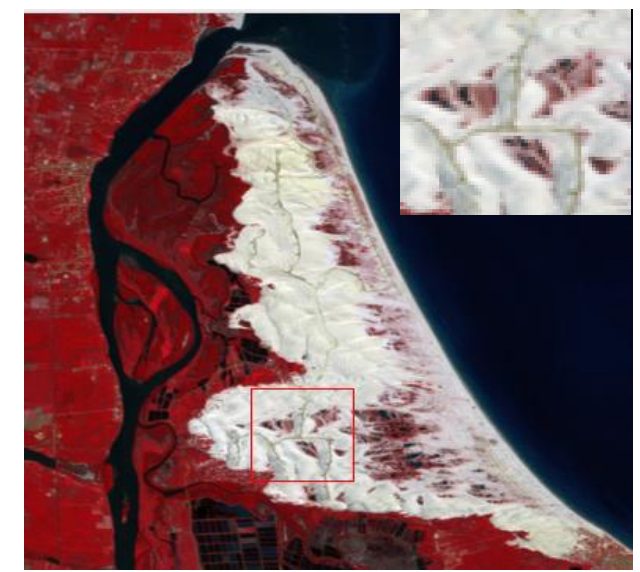
27-08-2007. LT5. Sensor TM



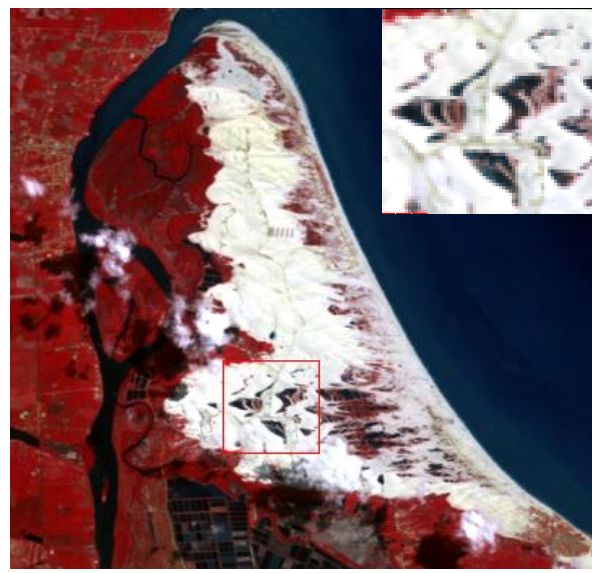
13-08-2008. LT5. Sensor TM



01-09-2009. LT5. Sensor TM



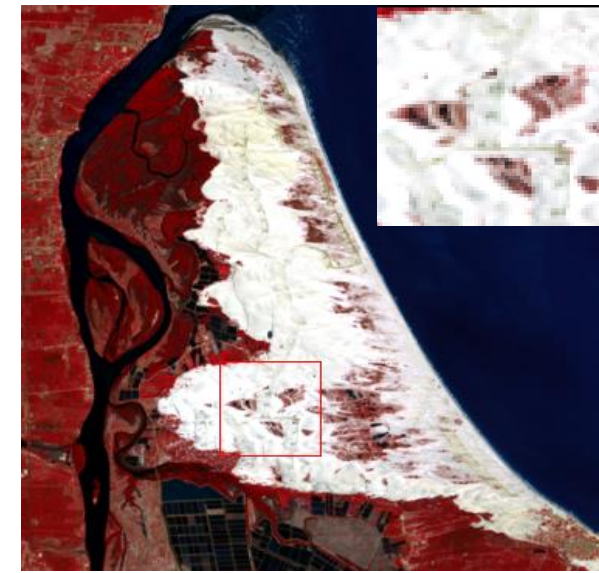
15-05-2010. LT5. Sensor TM



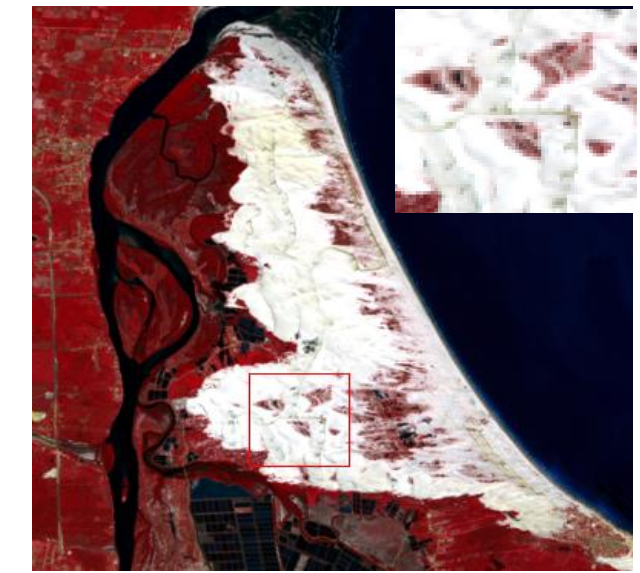
06-08-2011. LT5. Sensor TM



01-09-2012. LT7. Sensor ETM+



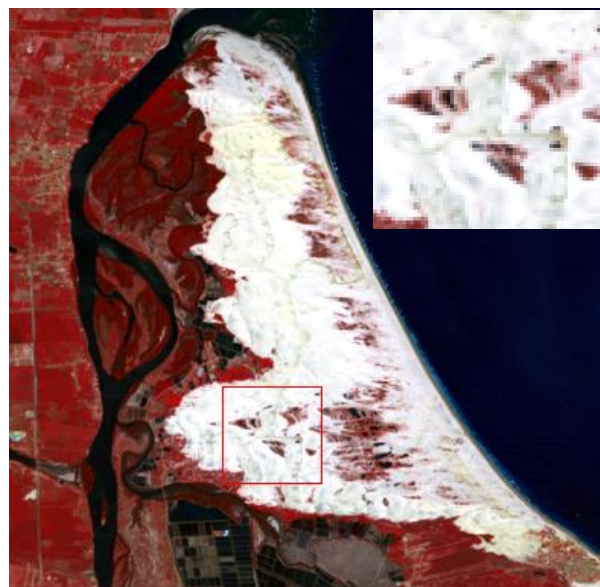
14-08-2014. LC8. Sensor OLI



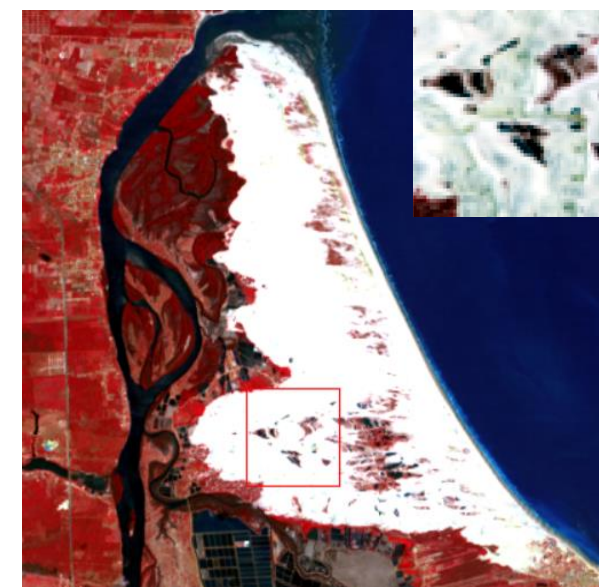
01-08-2015. LC8. Sensor OLI



03-08-2016. LC8. Sensor OLI



22-08-2017. LC8. Sensor OLI



01-09-2018. LT8. Sensor OLI

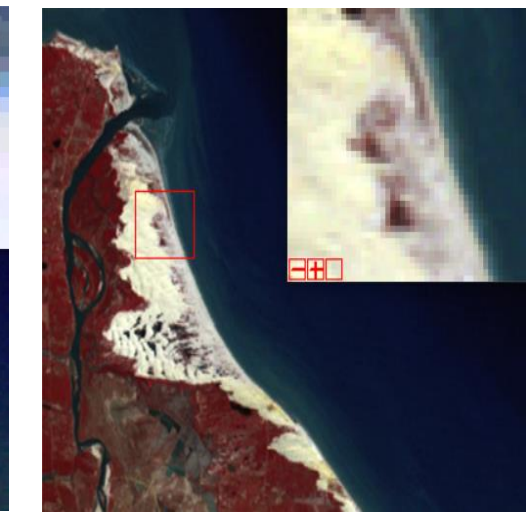
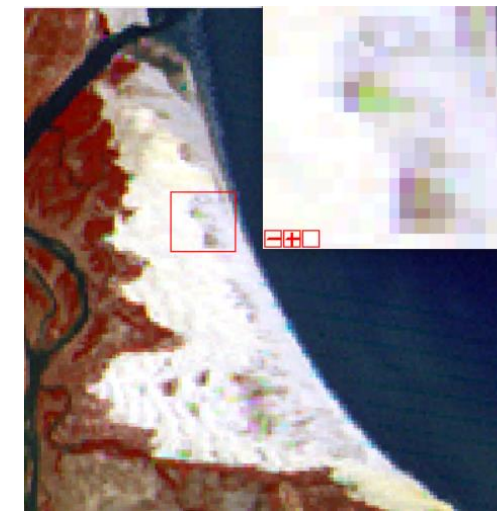
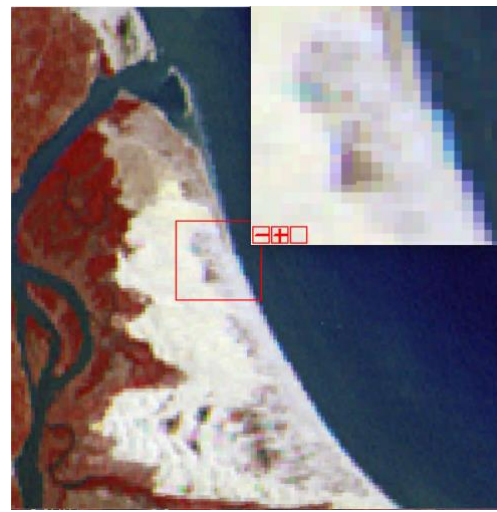
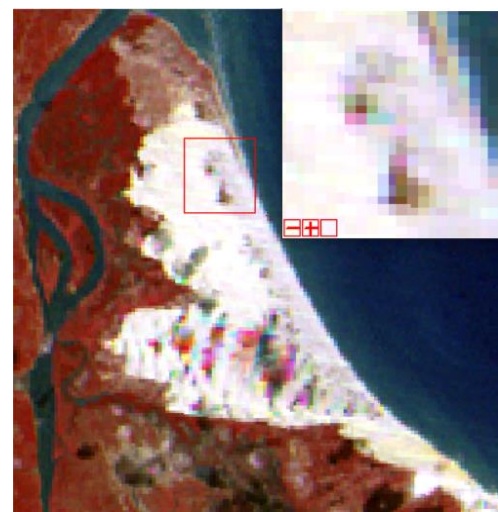
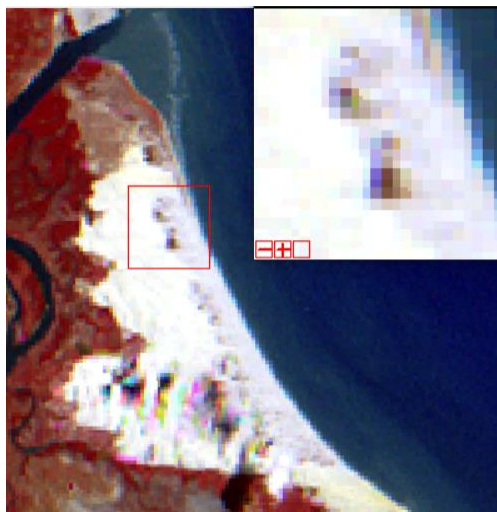
Figura 61 - Serie Temporal de Imagens Landsat em Aracati, com ênfase no campo de dunas móveis e lagoas interduais entre 2007 – 2018. Fonte: USGS (2018), INPE (2017)

As imagens dos anos 1975 e 1980, do satélite Landsat 2, apresentam algumas limitações na identificação das feições, mas as imagens dos anos 1986 e 2009 do satélite Landsat 5 mostram claramente a diferença espectral entre o corpo de água e a duna, sendo nesta série temporal, as datas onde foram identificadas as maiores extensões de lagoas interdunares. As imagens dos anos 2001, 2003, 2006, 2007, 2008, 2011 mostram algumas das marcas espaço temporais que indicam o movimento das dunas.

Nas Figuras 60 e 61, que mostram a série temporal das lagoas interdunares próximas às localidades Beirada e Canavieira em Aracati, apresentam-se um exemplo de como em períodos catalogados como seca, as lagoas conservam uma lâmina de água em alguns anos. Destacam-se os anos 1998, 1999, 2005 e 2016, onde praticamente não é possível discriminar alguma lâmina de água nas áreas onde frequentemente se formam as lagoas interdunares.

No ano 2008 foi construído o parque eólico, sendo que as imagens desde o ano 2009 até 2018 mostram a intervenção antrópica, pela estrada de acesso ao parque eólico. No ano 2010 observou-se uma diminuição substancial (com respeito a 2009) da lâmina de água das lagoas em Aracati, tendo uma recuperação em 2011, que diminuiu em 2012 e manteve essa tendência de perda (mesmo que as chuvas do ano 2014 tenham sido consideradas em torno da média) até o ano 2016 onde praticamente desaparecem. Em 2017 se aprecia uma leve recuperação e em 2018 encontraram-se cheias.

A construção do parque eólico sobre o campo de dunas móveis, trouxe grandes variações na morfologia das dunas e nas lagoas interdunares. De acordo com os moradores na localidade do Cumbe, uma lagoa localizada próxima ao setor central do campo de dunas, onde predominam dunas longitudinais, secou depois da construção da estrada de acesso aos aerogeradores. A série temporal mostrada nas Figuras 62 e 63, mostram que antes da construção do parque, a lagoa tinha flutuações no nível de água, mas a partir do ano 2010, não se observa mais uma lâmina de água.



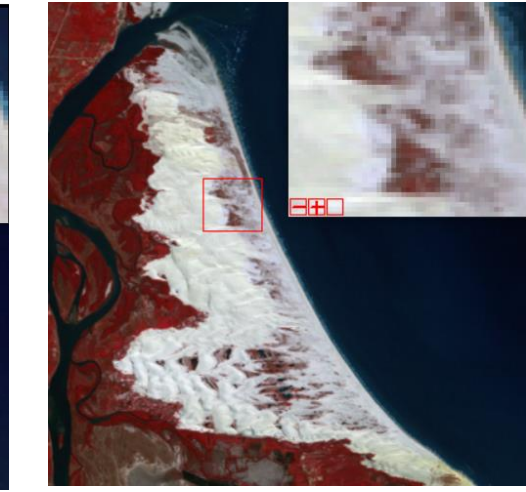
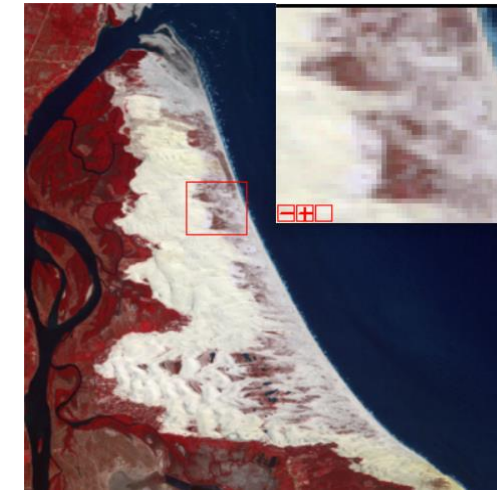
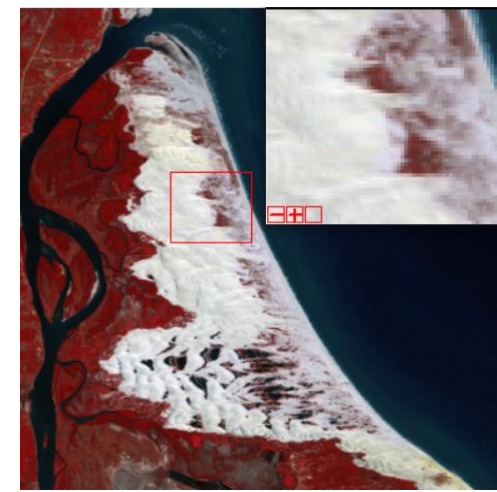
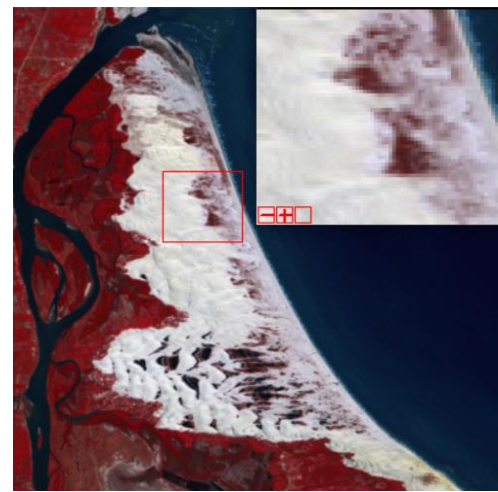
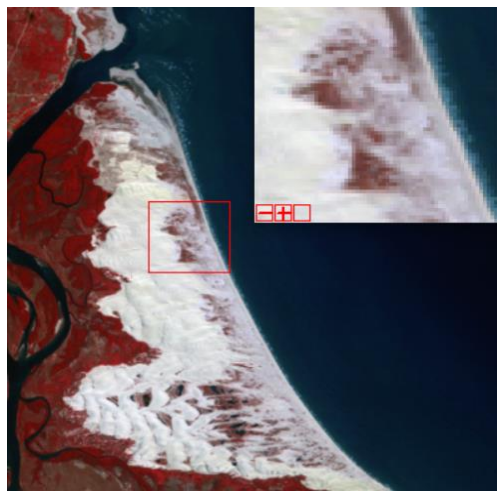
31-08-1975. LM2. Sensor MSS

02-08-1977. LM2. Sensor MSS

24-08-1978. LM3. Sensor MSS

22-08-1980. LM2. Sensor MSS

01-08-1986. LM4. Sensor MSS



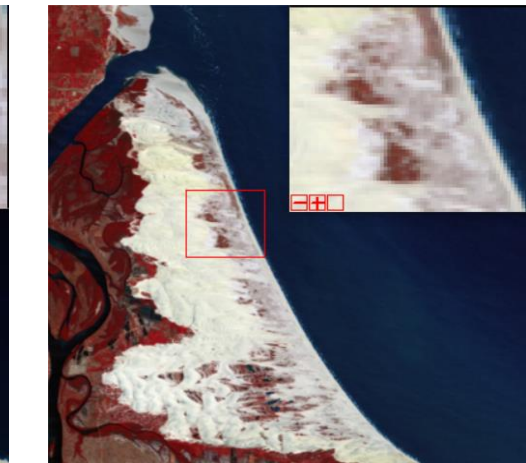
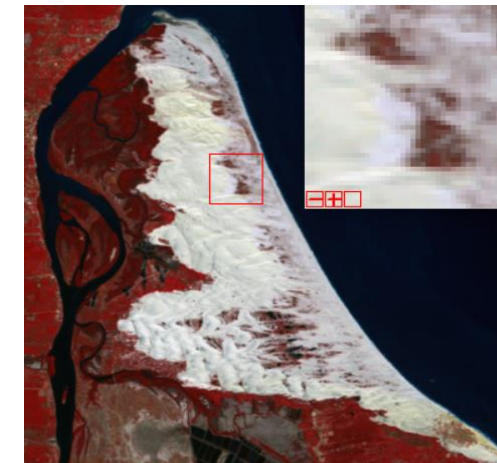
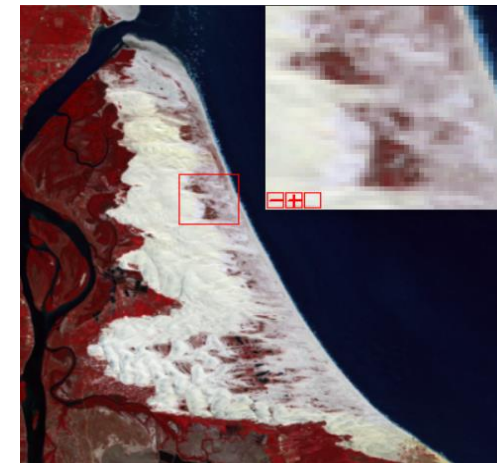
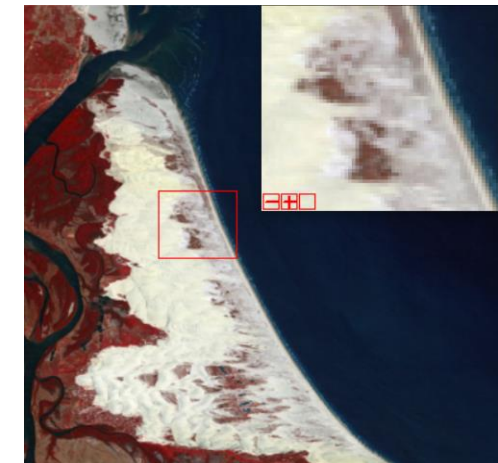
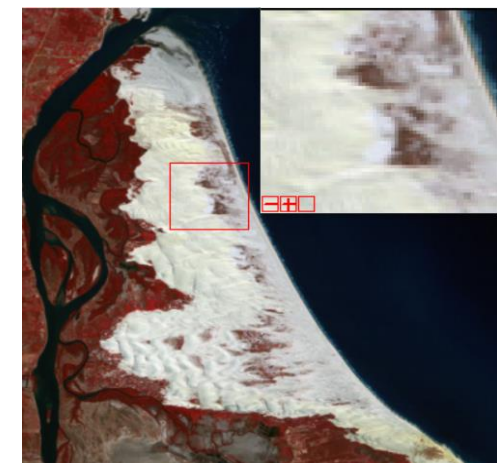
04-08-1987. LM5. Sensor TM

06-08-1988. LM5. Sensor TM

09-08-1989. LM5. Sensor TM

31-08-1991. LM5. Sensor TM

16-07-1992. LM5. Sensor TM



04-08-1993. LM5. Sensor TM

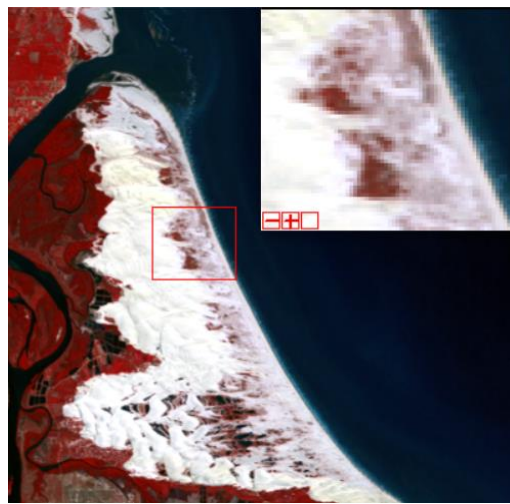
04-08-1997. LM5. Sensor TM

23-08-2000. LM5. Sensor TM

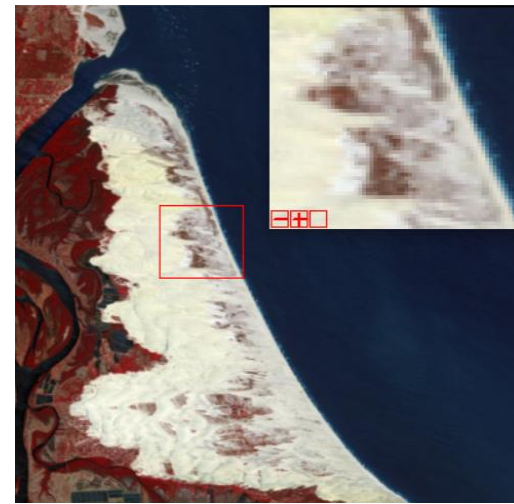
25-07-2001. LM5. Sensor TM

17-09-2003. LT5. Sensor TM

Figura 62 - Serie Temporal de Imagens Landsat em Aracati entre 1975 – 2003, com ênfase na lagoa interdunal afetada pela construção do parque eólico.
Fonte: USGS (2018), INPE (2017)



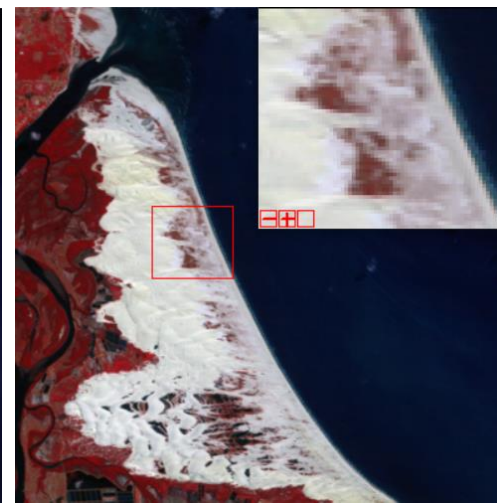
02-08-2004. LT5. Sensor TM



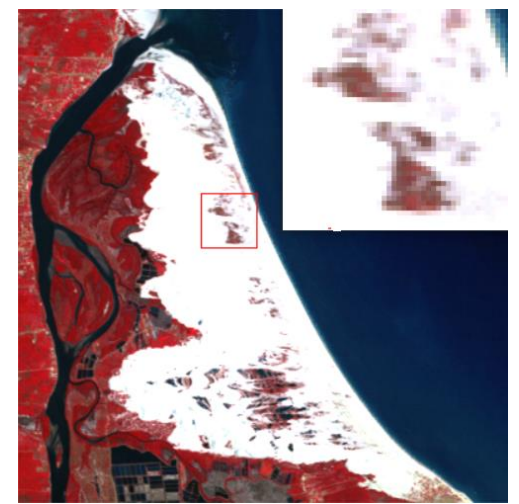
24-10-2005. LT5. Sensor TM



08-08-2006. LT5. Sensor TM



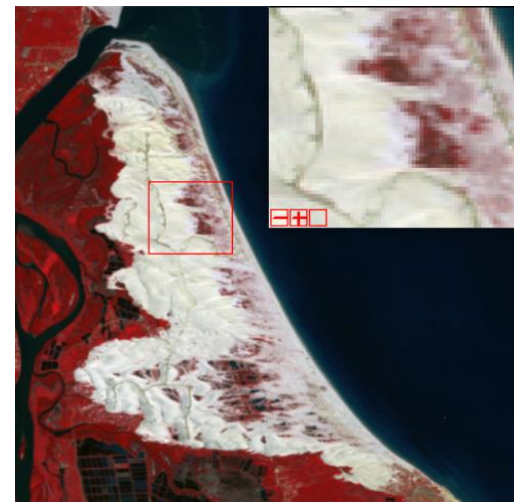
26-07-2007. LT5. Sensor TM



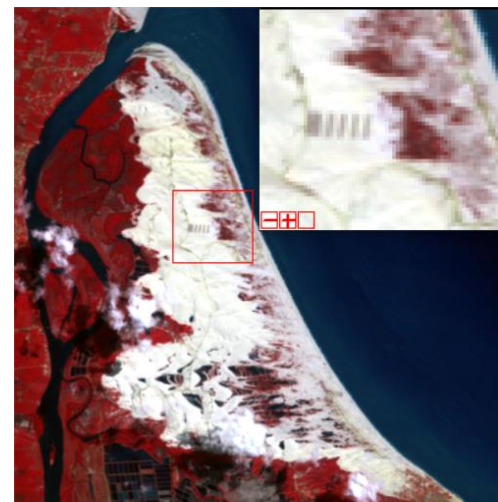
13-08-2008. LT5. Sensor TM



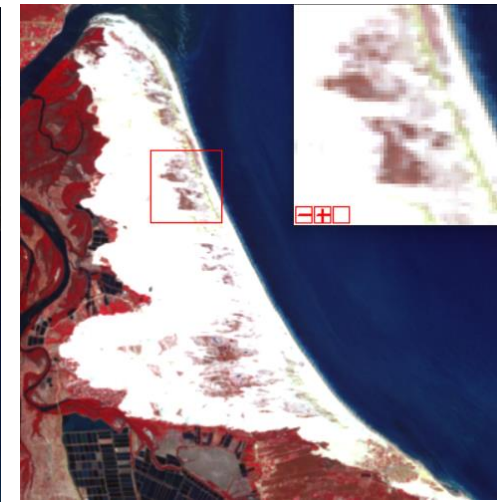
01-09-2009. LT5. Sensor TM



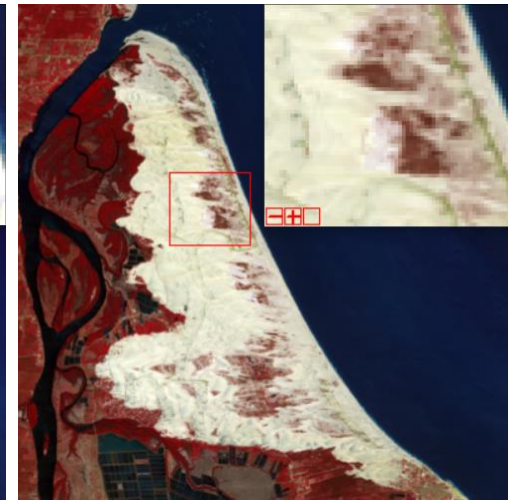
15-05-2010. LT5. Sensor TM



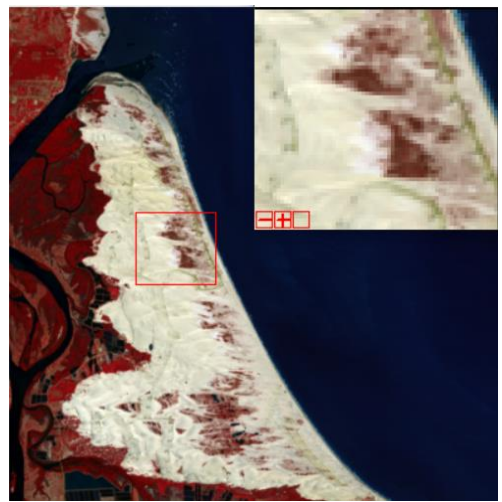
06-08-2011. LM5. Sensor TM



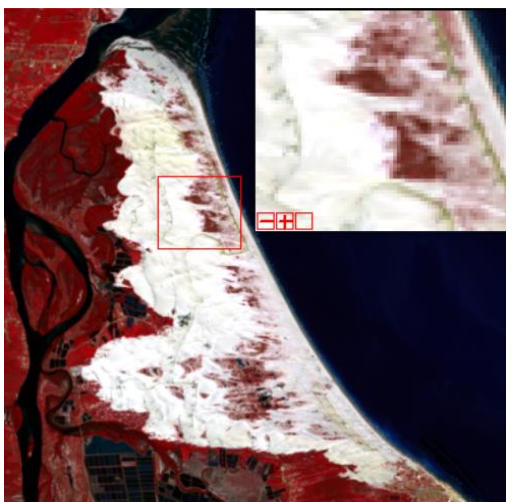
01-09-2012. LT7. Sensor ETM+



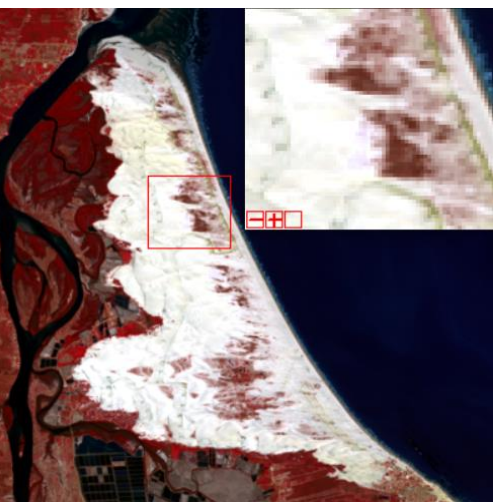
12-09-2013. LT8. Sensor OLI



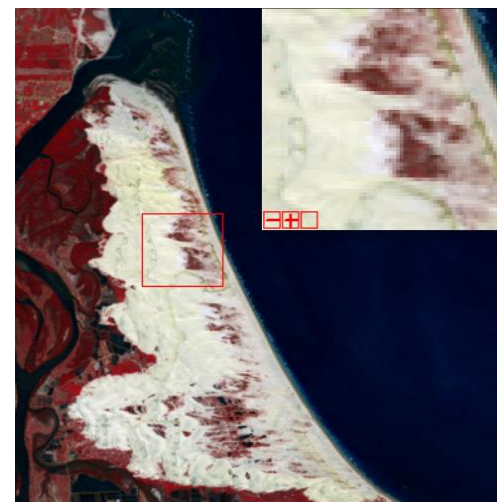
14-08-2014. LT8. Sensor OLI



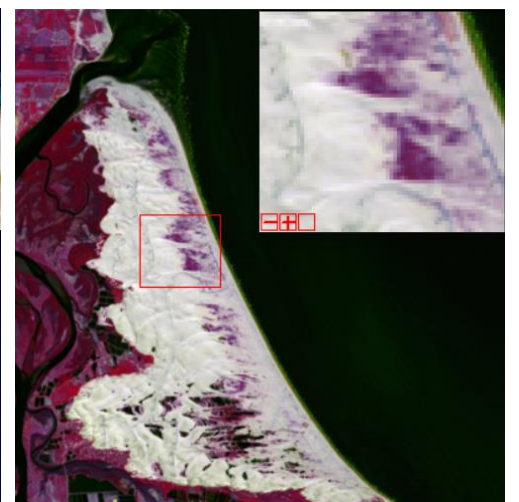
01-08-2015. LT8. Sensor OLI



03-08-2016. LT8. Sensor OLI



22-08-2017. LT8. Sensor OLI



24-07-2018. LT8. Sensor OLI

Figura 63 - Serie Temporal de Imagens Landsat em Aracati entre 2004 – 2018, com ênfase na lagoa interdunal afetada pela construção do parque eólico. Fonte: USGS (2017), INPE (2017)

Merece destaque o fato de que a não existência de lâmina de água em alguns anos, não significa a falta de água nos brejos interdunares. A tonalidade vermelha na combinação RGB das áreas de brejo interdunar nas imagens das Figuras 60 a 63, é devido a existência de áreas úmidas com cobertura de herbáceas e/ou presença de macrófitas, que junto com a pouca profundidade dos corpos de água e presença de partículas em suspensão, podem ocultar uma lâmina de água, predominando a resposta espectral da vegetação.

A variação da lâmina de água nas lagoas interdunares tem relação direta com a própria dinâmica natural das dunas, cujo tamanho e movimento podem modificar o tamanho do brejo interdunar e a extensão da lagoa interdunar ao longo dos anos. Geralmente, as dunas e brejos interdunares menores podem desaparecer naturalmente e não ser adequadamente identificados em imagens Landsat; enquanto os de maior tamanho como os retratados nas Figuras 62 e 63, são identificáveis nas imagens Landsat e apresentam melhor as mudanças que refletem o conjunto de fatores climáticos, hidrológicos e antrópicos que interagem no campo de dunas móveis.

Do ponto de vista climático, tal como afirmam Nobre (2012) e Cortez et al. (2017), a variabilidade espacial e temporal das precipitações no Ceará e na Região Nordeste é a união de um conjunto de fenômenos de escala planetária a local⁶, o que se reflete em uma distribuição muito variável dos totais pluviométricos ano a ano, causando diferenças em como se apresentam as reservas hídricas superficial e subterrânea nas áreas de estudo e dos quais resulta a alternância de anos de seca e de cheias.

Por uma parte, a explicação de Cortez et al. (2017), pode ajudar a explicar, do ponto de vista hidrológico, o porquê as lagoas interdunares de maior tamanho nos campos de dunas móveis em Aracati e Camocim, podem conservar alguma lâmina da água embora exista um período classificado afetado pelo fenômeno da seca. Devido à alta variabilidade nos aportes entre bacias hidrográficas, esta situação faz com que muitas vezes os maiores volumes de precipitação se concentrem em bacias localizadas mais próximas do litoral, onde a seca é mais amena em comparação com o resto da Região Nordeste, em razão das

⁶ Tais fenômenos referem-se a Temperaturas da Superfície do Mar (TSM), Oscilação do Atlântico Norte (OAN), El Niño-Oscilação Sul (ENOS) em suas fases frias e quentes, Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

chuvas tenderem a ser mais abundantes.

Na determinação de mudanças sobre o campo de dunas móveis utilizando imagens ópticas, foram importantes as considerações do ponto de vista espectral. Os aerogeradores são de um tamanho consideravelmente menor que a resolução espacial da imagem Landsat e com a cor branca ficam camuflados no contexto das dunas. As estradas de acesso e base de cada aerogerador, são feições lineais e geométricas respectivamente, que sobressaem em alguns locais devido ao contraste espectral entre as dunas e o material utilizado como camada de rolamento, mas o movimento constante das dunas acaba cobrindo secções das estradas, diminuindo o contraste espacial causando dificuldades na identificação.

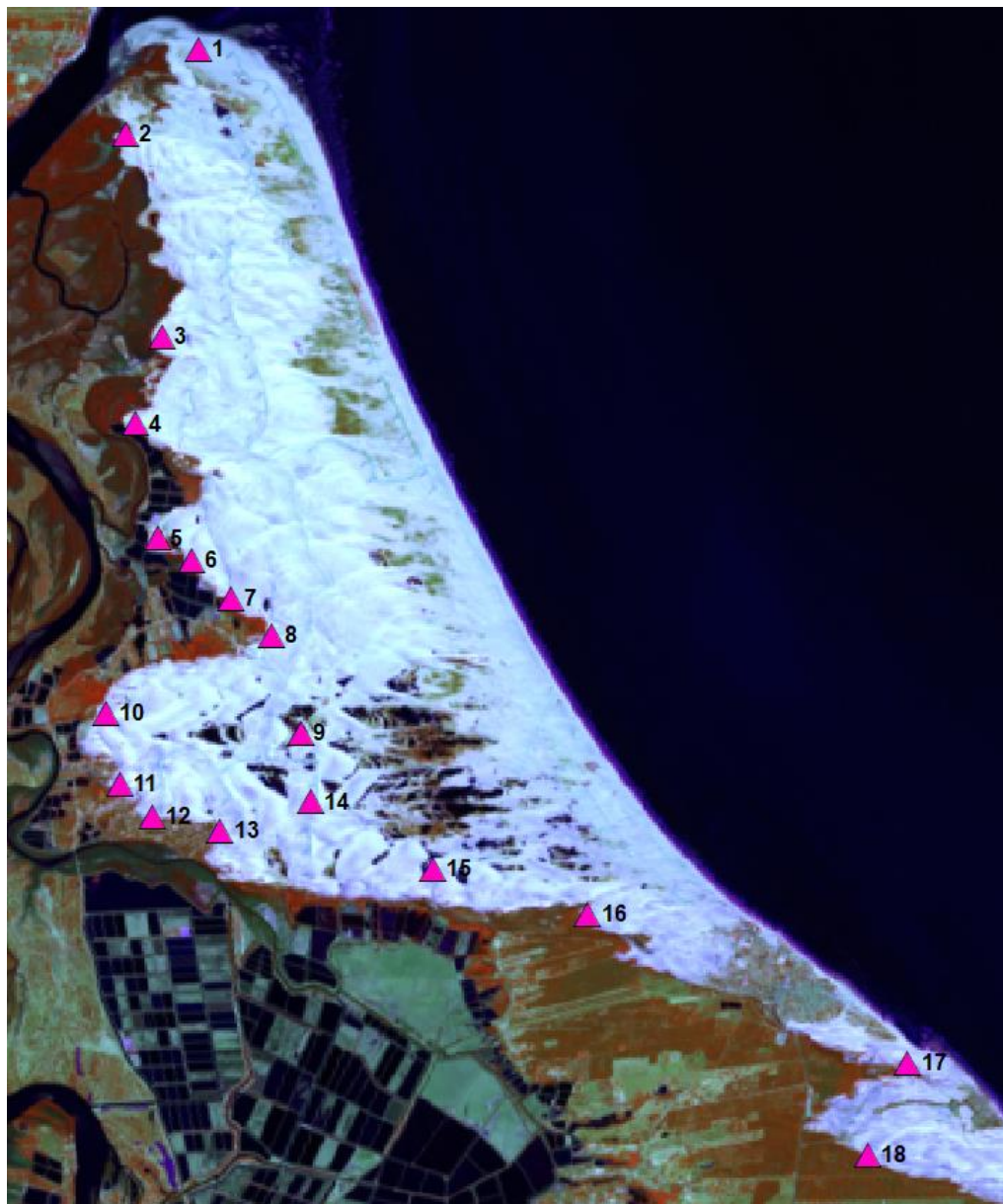
Depois de descrever as mudanças observadas na análise visual das imagens, e considerando as dificuldades comentadas no parágrafo prévio, foi realizada a quantificação das mudanças no campo de dunas de Aracati. A análise de mistura espectral (AME), proporcionou um produto que permite estabelecer do ponto de vista espectral, quanto mudaram as dunas e ofereceu uma análise de tendência, mostrando a direção de avanço das dunas.

Para observar mudanças no deslocamento no campo de dunas foram gerados os componentes: água, vegetação, dunas e umidade, cujas proporções permitiram uma melhor discriminação dos limites dos alvos, especialmente a separação das dunas com relação aos outros tipos de cobertura.

Foi realizada a comparação temporal entre os componentes AME correspondentes aos campos de dunas para um intervalo de 32 anos. Um total de 18 locais foram escolhidos para obter valores de deslocamento total, com base nas diferenças observadas e identificadas na interpretação visual das imagens no intervalo de tempo escolhido (Figura 64).

Nos 18 locais escolhidos para obter o valor líquido, em metros, do deslocamento local, também foram criadas as imagens diferença a cada dois anos (com exceção dos intervalos: 1991 – 1997 e 2009 – 2012, devido à falta de imagens), para observar se existiam mudanças no deslocamento das dunas antes e depois do intervalo 2007 – 2009, período de tempo no qual foram instalados os aerogeradores sobre o campo de dunas móveis em Aracati.

Figura 64 - Localização dos pontos de observação escolhidos para obter valores do deslocamento das dunas em Aracati. Imagem Landsat 8 OLI RGB 453, 24-07-2018.



Fonte: Elaboracao própria

Na Figura 65, são visualizadas em cor Ciano, as localidades onde o deslocamento é visível. Esta composição RGB foi útil para criar uma imagem diferença colorida, em alguns pontos onde ocorreram algumas das maiores mudanças em termos de extensão do deslocamento das dunas entre 1986 e 2018. Os valores encontrados nos exemplos da Figura 65 foram entre 420 e 570 m.

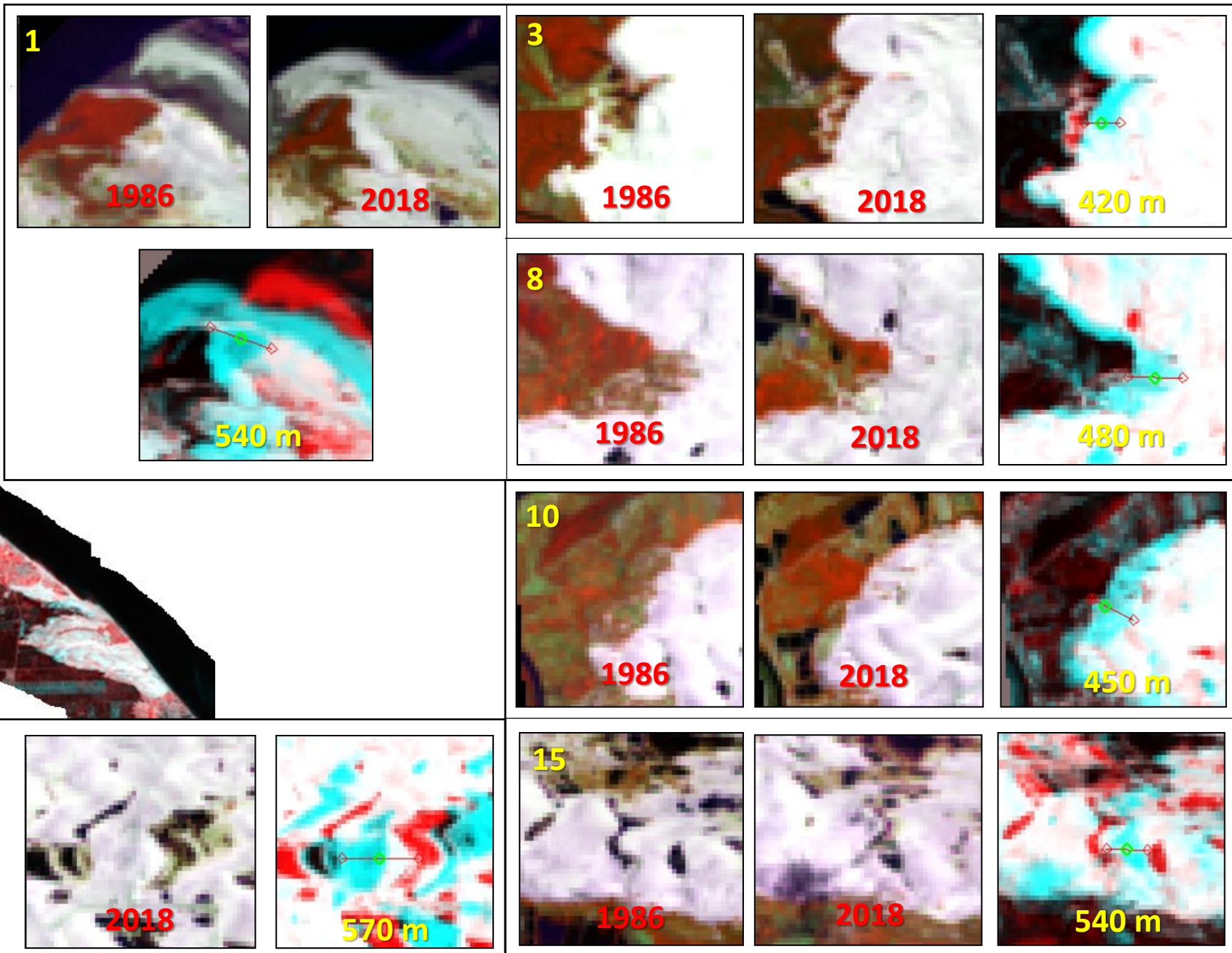
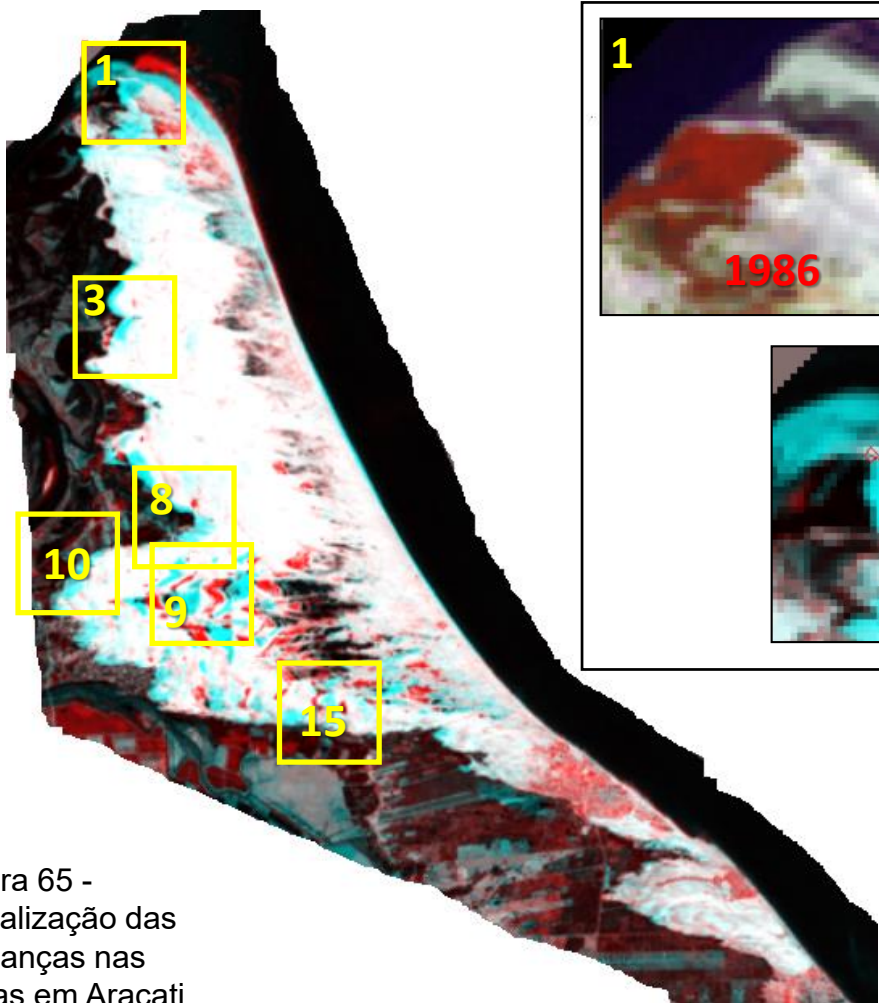


Figura 65 -
 Visualização das
 mudanças nas
 dunas em Aracati.
 Alguns exemplos
 dos maiores
 deslocamentos
 entre 1986 e 2018

A tabela 21, mostra os valores de deslocamento das dunas por cada ponto estabelecido. Sobre estes dados é importante esclarecer que como as imagens Landsat têm uma resolução espacial de 30 m, os píxeis que fazem parte do componente “dunas” vão refletir essa distância mínima, sendo que a distância linear medida nas imagens diferença, corresponde aos píxeis que refletem essa condição. Desta forma o valor de 30 metros corresponde ao deslocamento mínimo observado. Aqueles deslocamentos com valores inferiores, não são considerados nas proporções do pixel quando se faz a separação dos componentes AME, assim não podem ser computados. Para se obter valores de deslocamento mais detalhados seria preciso aplicar a AME em imagens com altíssima resolução espacial e trabalhos de campo adicionais.

A Figura 66, mostra a tendência do deslocamento das dunas para cada ponto de observação entre 1986 e 2018. As linhas de tendência permitem observar o comportamento das dunas nos pontos de observação, alguns com um comportamento dinâmico sem interrupções (pontos 1,8,9,10), 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 11, 12, 13), bem como pontos com deslocamento mínimo e em alguns períodos sem deslocamento aparente (pontos 2, 17, 18).

Pontos	1986_1988	1988_1991	1991_1993	1993_1997	1997_1999	1999_2001	2001_2003	2003_2005	2005_2007	2007_2009	2009_2012	2012_2014	2014_2016	2016_2018	Deslocamento (m)
1	30	30	30	60	30	30	30	60	30	30	30	60	30	60	540
2	0	30	30	0	0	0	30	30	30	30	0	30	0	0	210
3	30	60	30	60	30	0	30	60	60	0	0	30	0	30	420
4	30	30	30	30	30	0	30	30	30	0	0	30	0	0	270
5	60	90	90	0	30	30	30	120	0	0	0	30	0	0	480
6	150	0	30	30	0	0	30	30	30	30	0	30	30	0	390
7	30	30	30	30	0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	360
8	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	60	60	30	30	480
9	60	30	30	30	30	30	30	60	30	30	60	90	30	30	570
10	30	30	30	30	30	30	30	60	30	30	30	30	30	30	450
11	30	30	30	60	30	0	60	120	30	30	0	60	30	30	540
12	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	0	60	30	30	390
13	30	0	30	90	30	30	30	90	30	30	0	30	30	60	510
14	30	60	30	30	30	30	30	60	30	30	60	30	30	60	540
15	90	30	60	30	30	30	30	30	30	30	60	30	30	30	540
16	30	30	30	30	0	0	30	30	0	0	30	30	30	30	300
17	0	30	30	30	30	0	0	0	30	0	30	30	0	0	210
18	0	30	30	30	0	0	30	30	0	0	0	30	0	0	180

Tabela 21 - Valores de deslocamento das dunas por ponto distribuído no campo de dunas de Aracati entre 1986 e 2018.

Nota: a coluna ressaltada em vermelho corresponde ao período de instalação dos aerogeradores e as filas ressaltadas em azul correspondem aos pontos localizados no este do parque eólico.

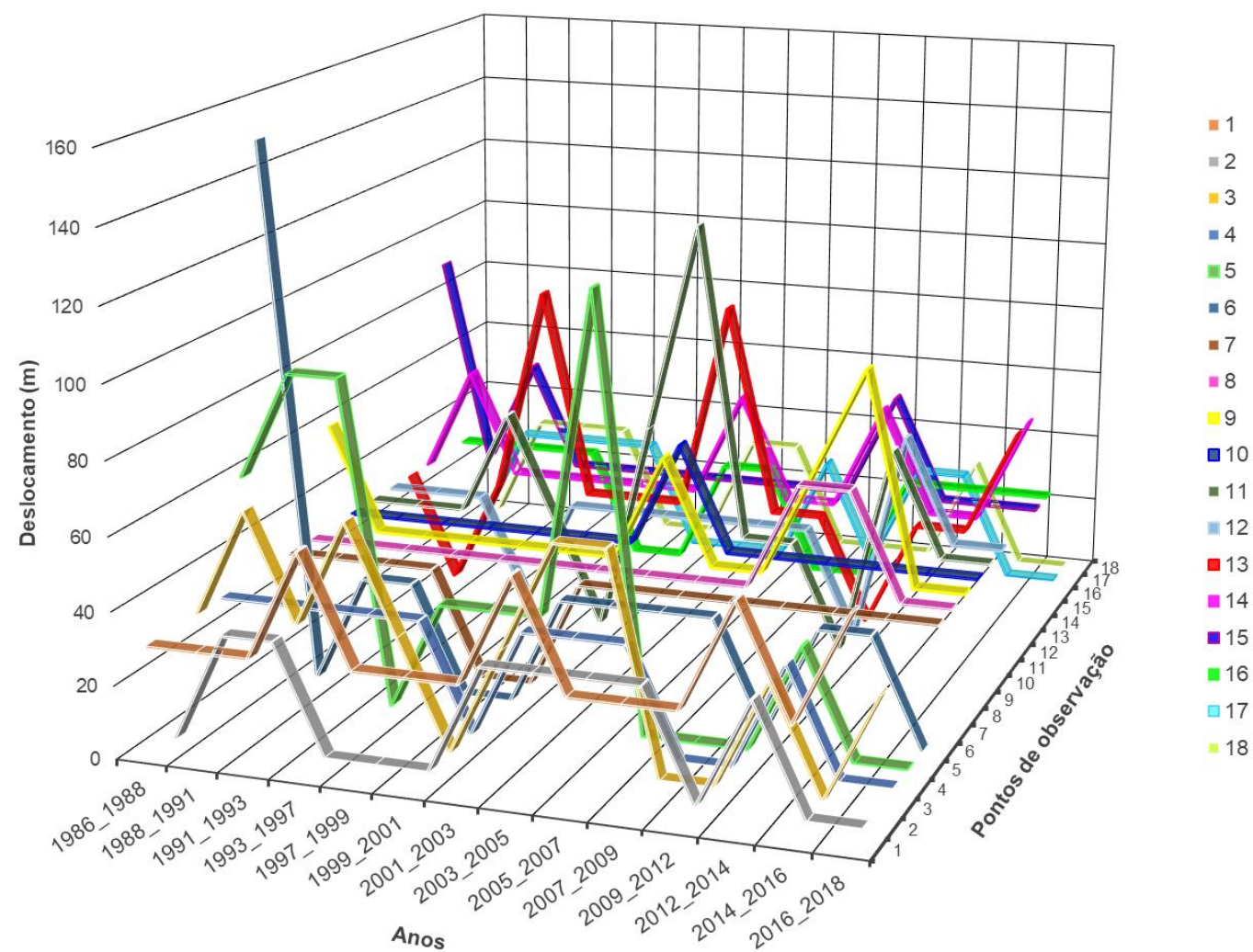


Figura 66 - Tendência do deslocamento das dunas por ponto de observação no campo de dunas de Aracati entre 1986 e 2018.

A localização dos pontos 9, 14 e 15 que se encontram na direita 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 das dunas ao continente. Pedrosa (2016) mencionou que em Aracati a construção do parque eólico teve influência significativa na redução da migração de dunas, mas desde o ponto de vista espectral, isso não foi identificado.

De acordo com a tabela 4.8, nenhum destes pontos mostrou sequer um deslocamento inferior a 30 m. Este resultado pode sugerir que a construção do parque eólico não tem influência no deslocamento das dunas, mas isso seria uma conclusão não adequada nem correta, considerando que durante o desenvolvimento deste trabalho houve um conhecimento da realidade do meio físico e social vinculado com este parque eólico, que indica que a instalação do parque eólico em um ambiente dinâmico como são as dunas móveis tem dado lugar sim a transformações morfológicas no campo de dunas, desconfigurando as complexas formas do campo de Dunas, interferindo na dinâmica do aquífero, que talvez merecem um estudo específico, a uma escala de maior detalhe.

Nas imagens utilizadas, foram identificados alguns intervalos, onde se repetem padrões em que deslocamento das dunas está abaixo do mínimo estabelecido neste trabalho de 30 m; primeiro um período onde alguns dos cinco ou seis pontos de registro não mostram deslocamentos, seguido de um período onde se incrementa a nove pontos onde não ocorrem deslocamentos. Isto aconteceu entre 1997 - 2001, 2007 – 2012 e 2014 - 2016. Contrastando esse padrão com os dados de Null (2008), Banco Mundial (2015) e Cortez et al. (2017), pode-se afirmar que os períodos coincidem com os anos de seca no Ceará.

Mas o fenômeno da seca, sendo entendida como deficiência na quantidade de precipitação por um extenso período de tempo, resultando em escassez hídrica, ajuda conseqüentemente as dunas a movimentar-se com maior velocidade. Então, a redução do deslocamento das dunas em épocas de seca tem outros motivos, provavelmente a intervenção antrópica que favorece a fixação das dunas.

Merece destaque o período entre 2007 e 2012, já que entre 2007 e 2009, foi construído o parque eólico sobre o campo de dunas em Aracati, onde o processo de construção removeu e alterou consideravelmente a dinâmica morfológica das

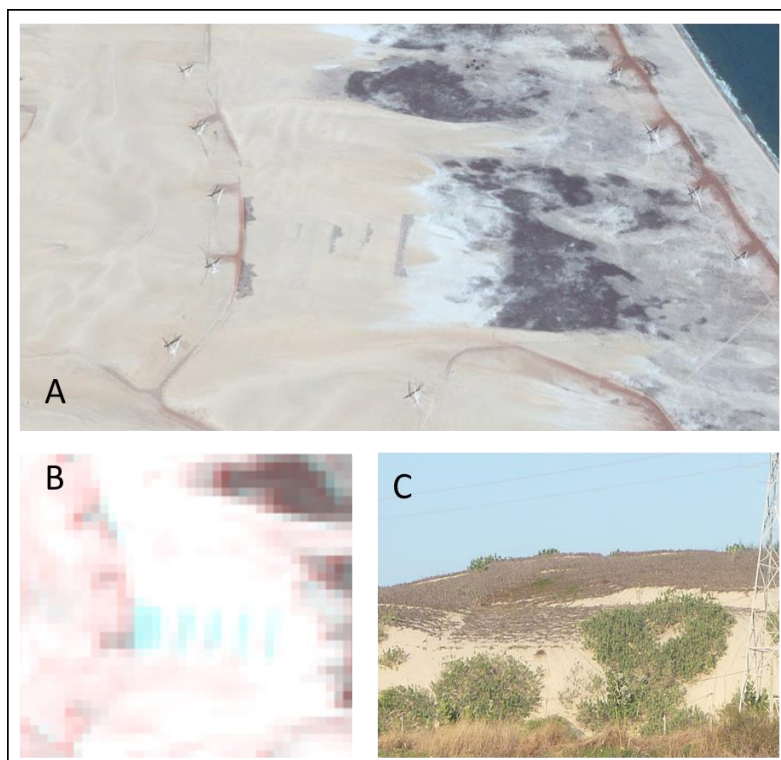
dunas. Essas mudanças aparecem refletidas como quedas no deslocamento em três pontos de observação (3, 4, 17) a partir de 2007, enquanto outros 3 pontos (5, 16, 18) apresentavam queda desde o período anterior (2003 – 2005). No período seguinte, entre 2009 – 2012, 9 pontos de observação não mostraram deslocamento, sendo que 4 pontos (3, 4, 5, 18) apresentavam queda desde o período anterior (2007 – 2009) e outros 5 pontos (2, 6, 11, 12, 13) apresentaram o deslocamento mínimo.

Os pontos 2 até 7 e 16 até 18 se mantêm como os pontos que sempre apresentaram uma redução padrão no deslocamento em todos os intervalos afetados pela seca, enquanto os pontos 11, 12, 13, não apresentaram um deslocamento importante, apenas no período 2009 – 2012. Esta situação pode ser explicada pela cercania ao povoado de Cumbe, cujo assentamento já consolidado junto com as atividades derivadas dos produtores de camarão vêm acelerando o processo de fixação das dunas, além da construção de uma das estradas de acesso ao parque eólico que teve um grande impacto na fixação de dunas nesse lugar. Esta situação se estende também para os pontos 2,3,4,5 e 6.

O AME permitiu identificar como mudança no campo de dunas, uma tentativa de fixação de dunas, na estrada principal que atravessa o campo de dunas de norte a sul (Figura 67). Foi observada no intervalo de 2012 – 2014, como características de 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.

O método de AME permitiu discriminar com detalhe as áreas de dunas móveis e mostrou a evolução do deslocamento, destacando-se a tendência de avance do campo de dunas em sentido sudoeste, o que apresenta uma relação direta com o padrão de vento dominante na região, com direção predominante variando de E a SE.

Figura 67 - Processo de fixação artificial de dunas. 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 Ciano. 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.



Fonte: Google Earth de data 27/08/2013. Durán (2019).

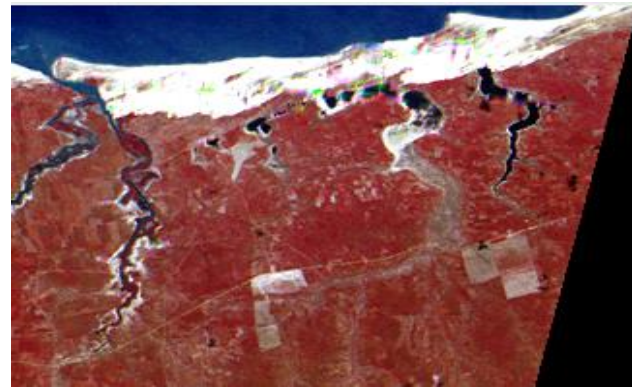
4.2.2 *Camocim*

As mudanças ocorridas na planície costeira de Camocim, entre os rios Coreaú e Tapuio, no litoral oeste do Ceará desde a década de 1970, estão registradas nas imagens da Série de satélites Landsat.

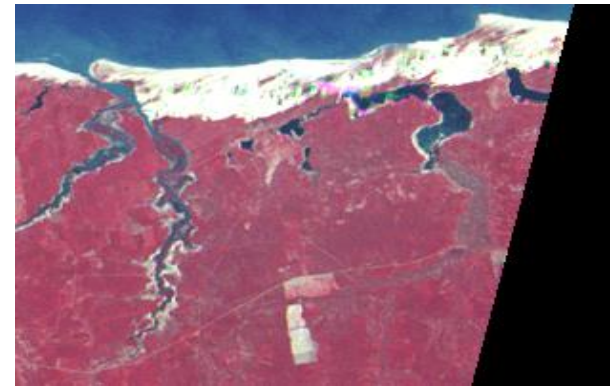
As Figuras 68 e 69, mostram as mudanças nas áreas de estudo em Camocim desde a década de 1973 até o ano 2018, permitindo discriminar qualitativamente de forma geral, as áreas com água, o manguezal, o campo de dunas e as áreas com diferentes tipos de cobertura vegetal.



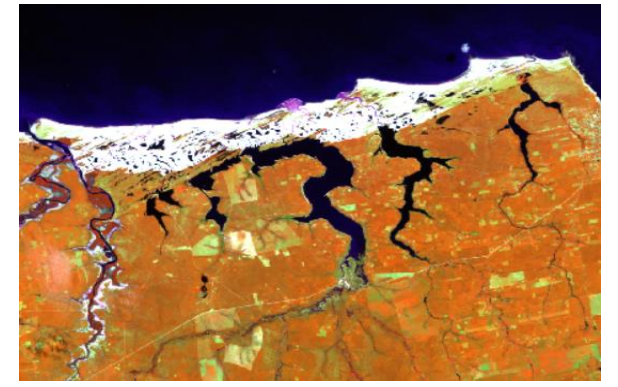
10-09-1973. LM1. Sensor MSS



02-08-1981. LM2. Sensor MSS



26-05-1982. LM3. Sensor MSS



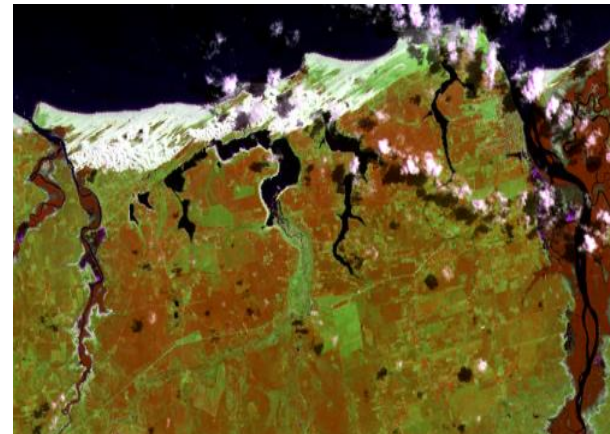
27-07-1985. LM5. Sensor TM



01-07-1987. LM5. Sensor TM



23-08-1989. LM5. Sensor TM



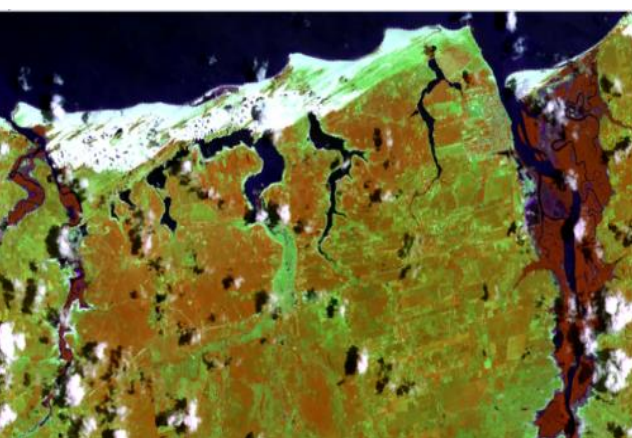
23-08-1992. LM5. Sensor TM



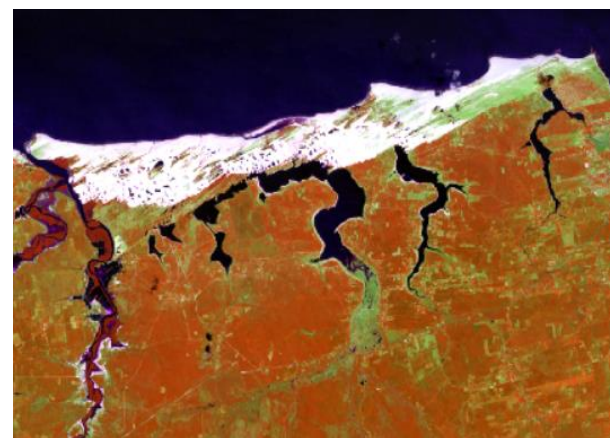
02-08-1993. LM5. Sensor TM



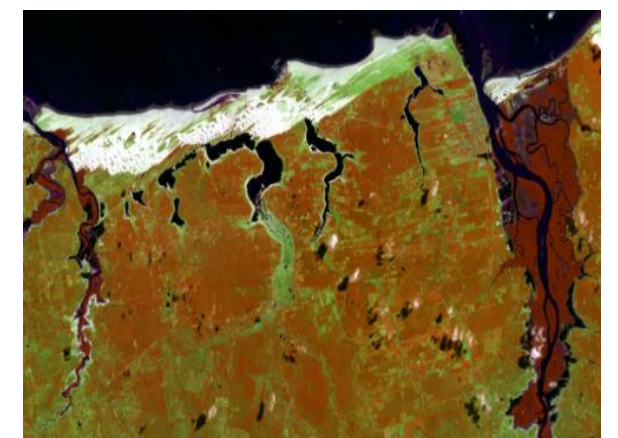
04-07-1994. LM5. Sensor TM



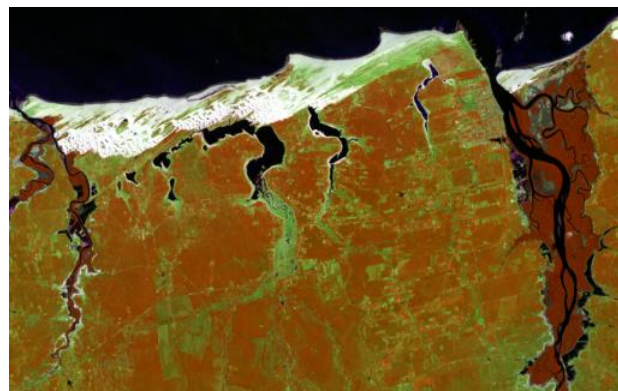
30-09-2000. LT7. Sensor ETM+



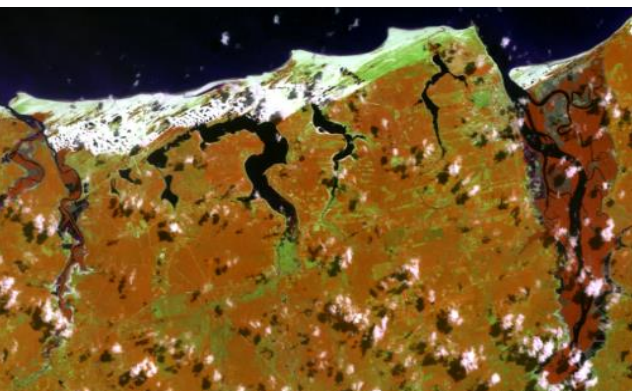
01-09-2004. LT5. Sensor TM



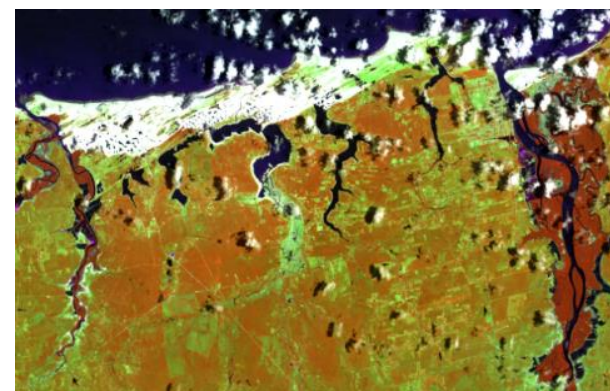
19-08-2005. LT5. Sensor TM



09-08-2007. LT5. Sensor TM



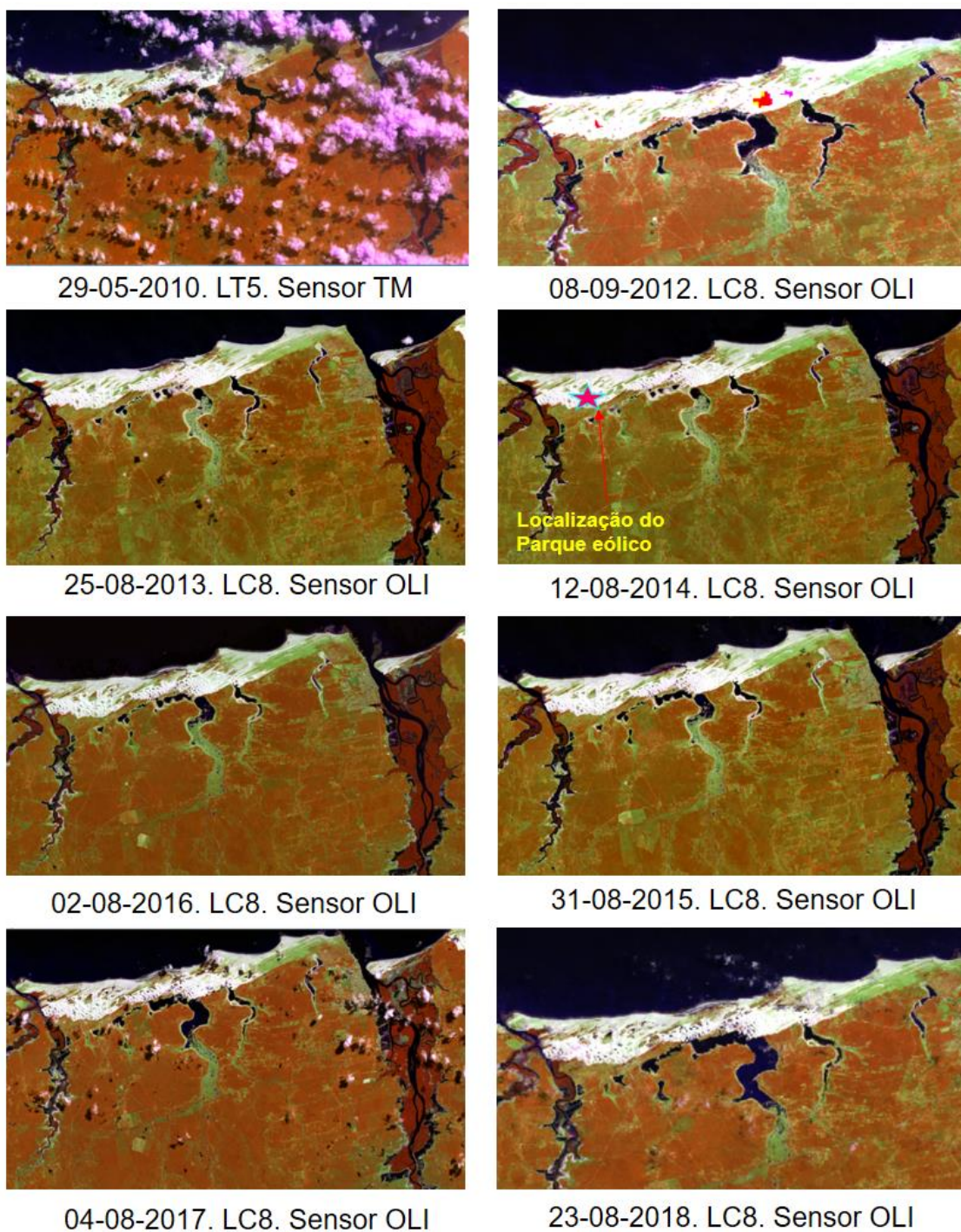
11-08-2008. LT5. Sensor TM



01-02-2009. LT5. Sensor TM

Figura 68 - Serie Temporal de Imagens Landsat em Camocim entre 1973 – 2009.
Fonte: USGS (2018), INPE (2017)

Figura 69 - Série Temporal de Imagens Landsat em Camocim entre 2010 – 2018.



Fonte: USGS (2017), INPE (2017)

As mesmas considerações em termos de identificação das dunas e interpretação visual aplicadas na área de estudo em Aracati, foram aplicadas na área de estudo em Camocim

As imagens correspondentes ao sensor MSS em combinações de bandas a falsa cor RGB 4-3-2; nas imagens dos sensores TM e ETM+ com a combinação RGB 4-5-3 e no sensor OLI, com a combinação RGB 5-6-4, foram úteis para observar mudanças, como os exemplos que seguem:

- A evolução no tempo das áreas dedicadas a Carcinicultura, cuja expansão foi sobre a planície fluvio-marinha do Rio Coreaú ao leste e do Rio Tapuio ao oeste da área de estudo. O crescimento da carcinicultura foi mais lento se for comparado com o crescimento desta atividade em Aracati. As fazendas se dispõem ao longo do manguezal que adentra ao continente aproximadamente uns 22km no Rio Coreaú e 17 km no Rio Tapuio.
- O aumento e redução da superfície de dos corpos d'água, assim como o tom da cobertura vegetal, deram uma ideia sobre anos mais secos e anos mais chuvosos. A partir de 1981 se aprecia a expansão das áreas de cultivos sobre o tabuleiro pré-litorâneo, em termos de forma, tamanho, distribuição, assim como as variações da cobertura vegetal por mudança em tipo de cultivo ou estado fenológico, em áreas que para 1973 eram ocupadas pela vegetação natural.
- Expansão e redução de corpos de água associados ao campo de dunas móveis, planície fluvio-marinha, áreas úmidas na área de estudo, vegetação principalmente herbácea presente no brejo interdunal, assim como nas lagoas costeiras em Camocim tais como: Lagoa Amarelas, Lagoa da Cangalha, Lagoa do Boqueirão e Lago Seco; aspecto relacionado diretamente com o aumento e diminuição da quantidade de precipitação no mesmo período de tempo. As lagoas interdunares e lagoas costeiras mostraram suas maiores cheias da Série nos anos 1973 e 2008.
- A movimentação do campo de dunas, segue em direção paralela ao continente e a Foz do Rio Tapuio – Barra dos Remédios.

As imagens das áreas de estudo em Camocim, apresentaram a maior cobertura de nuvens que em Aracati, sendo o maior número de imagens disponíveis, sem cobertura de nuvens, corresponde ao mês de agosto. Nesta área de estudo, foi necessário aplicar o algoritmo: *ee.Algorithms.Landsat.simpleComposite()*, para gerar uma imagem sem nuvens, utilizando como regra a as datas mais próximas, para

reduzir as mudanças fenológicas que possam afetar o processo de classificação.

Embora a maioria das imagens corresponda a uma mesma época do ano, é possível observar diferenças nas cores dos alvos, relacionadas com as chamadas mudanças radiométricas e mudanças semânticas. Para reduzir estes problemas foram escolhidas imagens no produto reflectância de superfície, disponibilizado pela USGS no site: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

4.2.2.1 *Detecção de mudanças com o método de comparação pós classificação*

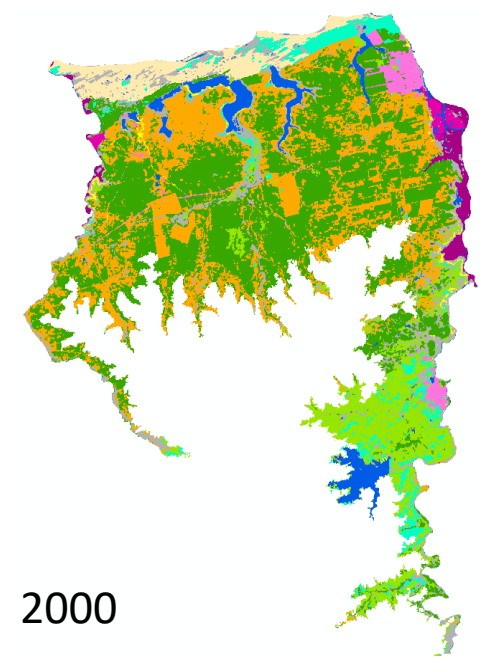
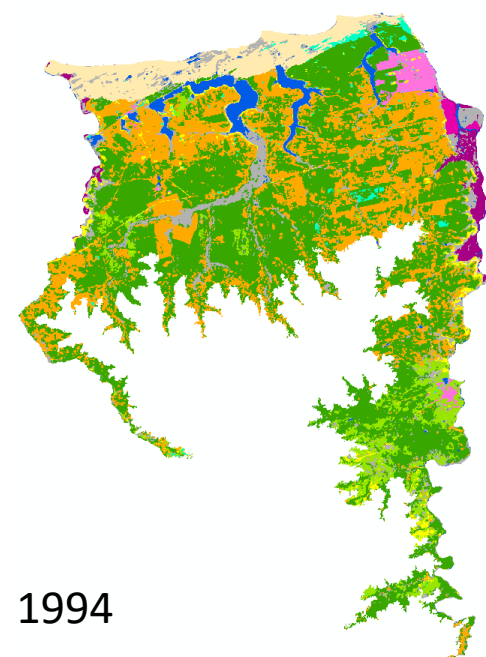
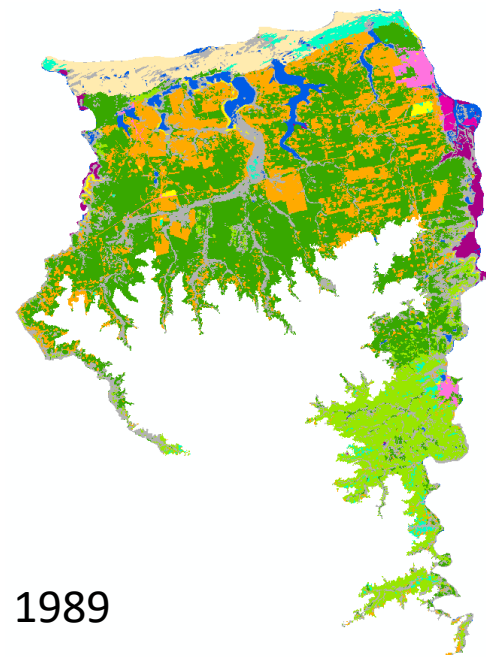
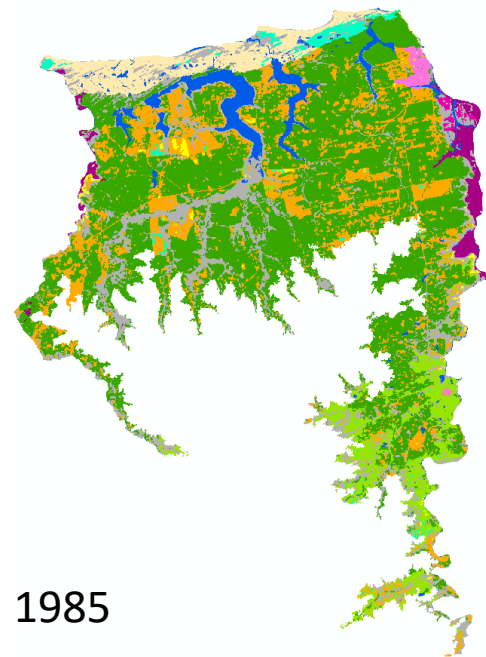
Os produtos da classificação das imagens Landsat TM, ETM+ e OLI utilizadas para a classificação de uso e cobertura da terra na área de estudo em Camocim, baseado nas áreas de treinamento e áreas de validação, obtiveram os valores de exatidão global e índice Kappa, superando em todos os casos a exatidão de 85% mínima recomendada por Foody (2002) na classificação de imagens (Tabela 22).

Tabela 22 - Valores de exatidão global e índice Kappa associadas às classificações de imagens na área de Camocim.

Ano	Exatidão Global	Índice Kappa
1985	86,71	0,832
1989	86,68	0,836
1994	87,78	0,846
2000	87,15	0,845
2004	85,47	0,824
2008	86,92	0,843
2012	85,31	0,829
2015	86,48	0,842
2017	87,12	0,847
2018	87,28	0,843

Fonte: Cálculos próprios.

A Figura 70, mostra os resultados da classificação do uso e cobertura da terra na área de estudo em Camocim entre os anos 1985 e 2018, de acordo com as 11 classes estabelecidas.



8 km

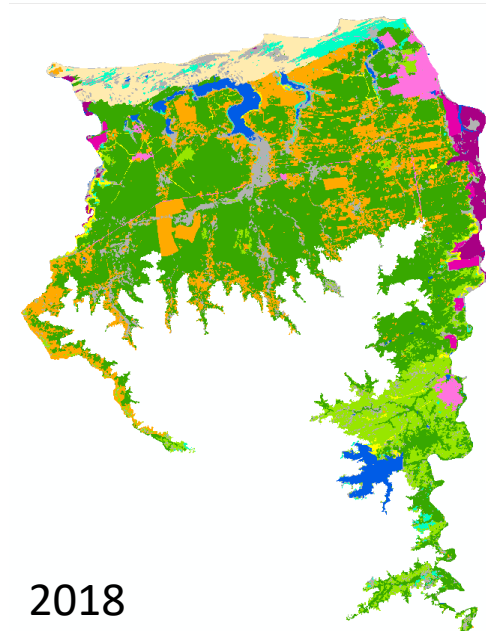
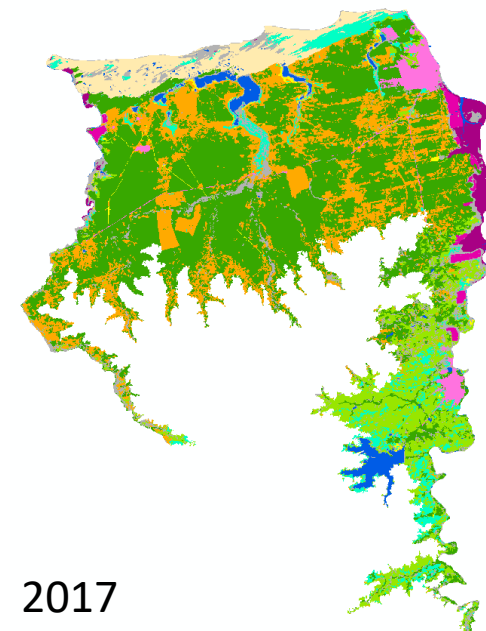
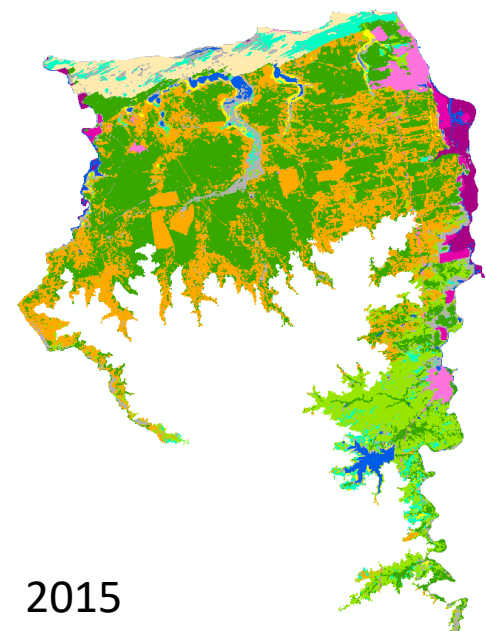
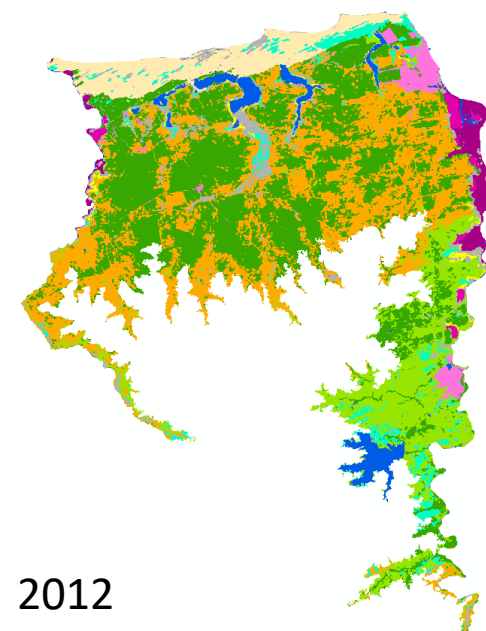
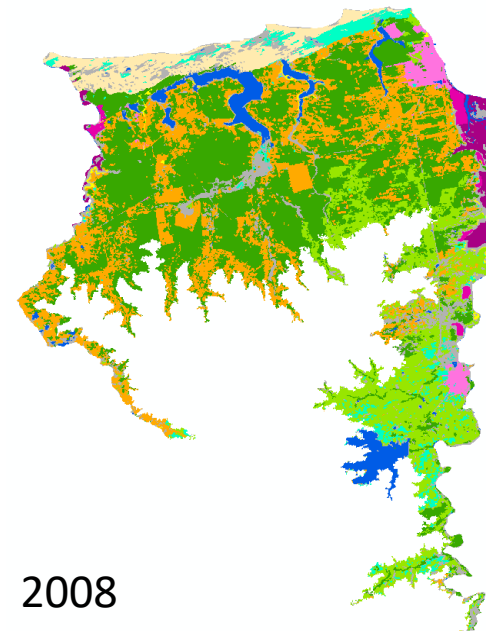
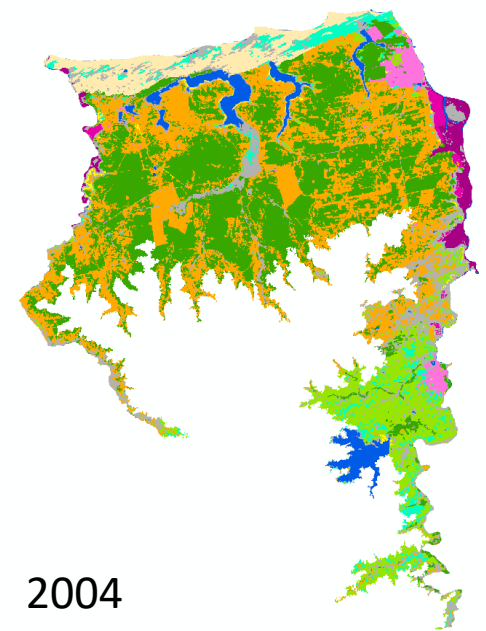


Figura 70 - Uso e Cobertura da terra na área de estudo em Camocim, entre os anos 1985 e 2018

Tipos de Uso e Cobertura

- Corpos d'água
- Arbustivo
- Arbustivo caducifolio
- Carcinicultura
- Cultivos
- Dunas
- Gramineas
- Mangue
- Solo exposto
- Áreas umidas
- Urbano

A tabela 23 e Figura 71, mostram para cada ano de análise a superfície total por classe e a mudança em termos de ganho ou perda de superfície em um intervalo de anos, que proporciona uma ideia da evolução do uso e cobertura entre 1985 e 2018, sendo notável a perda da classe arbórea nos intervalos de 1985 – 1989, 1994 – 2000, a perda da classe cultivos entre 2004 - 2008, 2012 – 2018 e a redução das áreas úmidas entre 1989 – 1994, 2008 – 2012.

A classe arbustiva caducifolia apresenta um comportamento inverso com relação a classe arbustivo, quando tem perda de superfície arbustivo, aumenta a arbustivo caducifólio e vice-versa; somente entre 2004 – 2008 que ambas classes ganharam.

Mas apenas a comparação das superfícies líquidas de ganhos e perdas, não mostra as relações de mudança de proporção, intensidade, transição e hierarquia.

Na análise de mudanças em Camocim, aplicando as metodologias de Pontius et al. (2004), Aldwaik e Pontius (2012), Pontius e Santacruz (2014), foram derivados resultados gerais na comparação entre intervalos de tempo e resultados específicos a cada ano de estudo. Em termos gerais, a Figura 72 Apresenta que entre 1985 e 1994 houve principalmente mudanças em termos de quantidade (aumento ou redução da superfície de algumas classes) em até 25%, com uma reduzida porcentagem de intercâmbios entre classes. Entre 1994 até 2018 o intercambio (troca de um tipo de classe em outro) foi a mudança apresentada em maior proporção, entre 6 e 10% por ano. O deslocamento neste caso chegou a até 4% entre 1985 e 1994, enquanto entre 1994 e 2018 não superou 2,5 %. Não foi observado um predomínio geral da quantidade ou intercambio, apenas predomínios de uma ou outra condição de mudança de acordo com o intervalo de tempo.

Classe	Area 1985 Ha	Mudanca da superficie	Area 1989 Ha	Mudanca da superficie	Area 1994 Ha	Mudanca da superficie	Area 2000 Ha	Mudanca da superficie	Area 2004 Ha	Mudanca da superficie	Area 2008 Ha	Mudanca da superficie	Area 2012 Ha	Mudanca da superficie	Area 2015 Ha	Mudanca da superficie	Area 2017 Ha	Mudanca da superficie	Area 2018 Ha
Corpos d'água	2985,89	-690,53	2295,36	-262,87	2032,49	812,03	2844,52	-304,13	2540,39	438,06	2978,45	-686,54	2291,91	-766,13	1525,78	169,67	1695,45	500,27	2195,72
Arbustivo	32662,40	-5559,62	27102,78	4057,78	31160,56	-5049,58	26110,98	-3004,30	23106,67	2929,31	26035,99	-1982,08	24053,90	3205,87	27259,78	3168,95	30428,72	4016,81	34445,53
Arbustivo seco	4235,16	3167,67	7402,83	-3878,54	3524,28	3479,99	7004,28	-716,03	6288,25	3617,32	9905,57	-1211,85	8693,72	-1398,20	7295,52	-68,32	7227,19	-1214,29	6012,91
Carcinicultura	171,76	87,41	259,17	23,71	282,88	200,07	482,94	32,34	515,28	35,10	550,38	31,29	581,68	164,24	745,92	-36,43	709,49	79,88	789,37
Cultivos	11413,66	1437,22	12850,88	4315,57	17166,45	-880,39	16286,06	3096,99	19383,05	-5393,76	13989,29	4653,08	18642,37	-1194,88	17447,49	-4670,07	12777,42	-2473,55	10303,87
Dunas	3449,63	212,67	3662,30	792,02	4454,32	-1084,67	3369,65	212,59	3582,24	-181,17	3401,07	1071,45	4472,52	-1159,06	3313,46	498,04	3811,50	-237,82	3573,68
Gramineas	906,62	482,40	1389,01	-656,25	732,76	2296,76	3029,52	-431,84	2597,68	-268,21	2329,47	320,34	2649,81	-119,55	2530,27	794,42	3324,68	-1844,79	1479,89
Manguezal	1446,10	-416,29	1029,81	44,47	1074,28	206,51	1280,79	77,16	1357,95	2,42	1360,37	178,04	1538,41	-83,14	1455,27	-17,79	1437,48	-45,74	1391,74
Solo exposto	360,17	76,13	436,30	876,66	1312,96	-907,02	405,94	-96,42	309,52	-51,22	258,30	228,95	487,25	304,69	791,93	-453,01	338,93	357,37	696,29
Área úmida	10278,72	829,79	11108,51	-5637,14	5471,37	737,23	6208,60	1199,37	7407,98	-1138,69	6269,29	-2782,42	3486,87	814,96	4301,82	722,53	5024,36	832,61	5856,97
Urbano	459,68	373,14	832,83	324,60	1157,42	189,08	1346,50	-65,73	1280,77	10,86	1291,62	179,72	1471,35	231,21	1702,56	-107,98	1594,58	29,25	1623,83
Total	68369,79		68369,79		68369,79		68369,79		68369,79		68369,79		68369,79		68369,79		68369,79		68369,79

Tabela 23 - Superfície em ha correspondente a cada classe por ano, das mudanças líquidas entre cada classe de uso e cobertura entre 1985 e 2018 em Camocim.

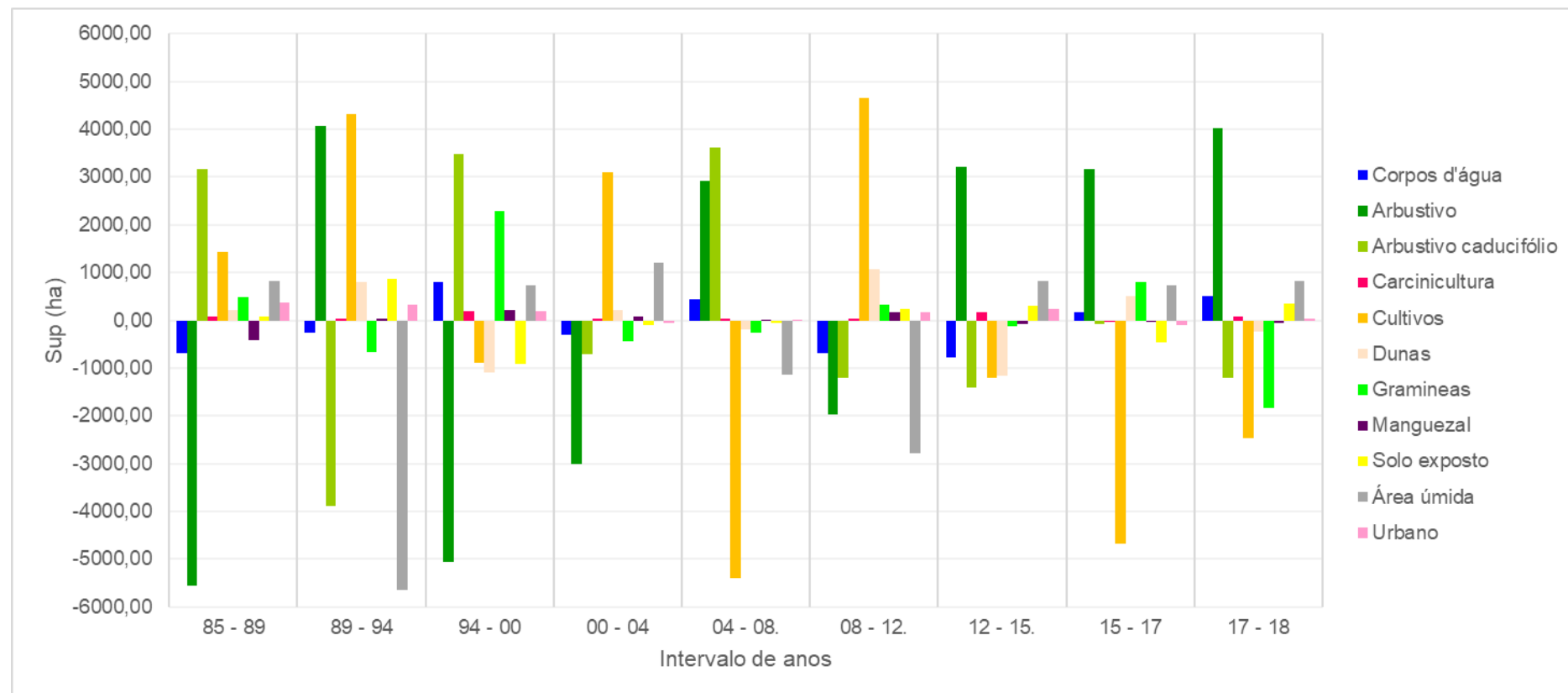
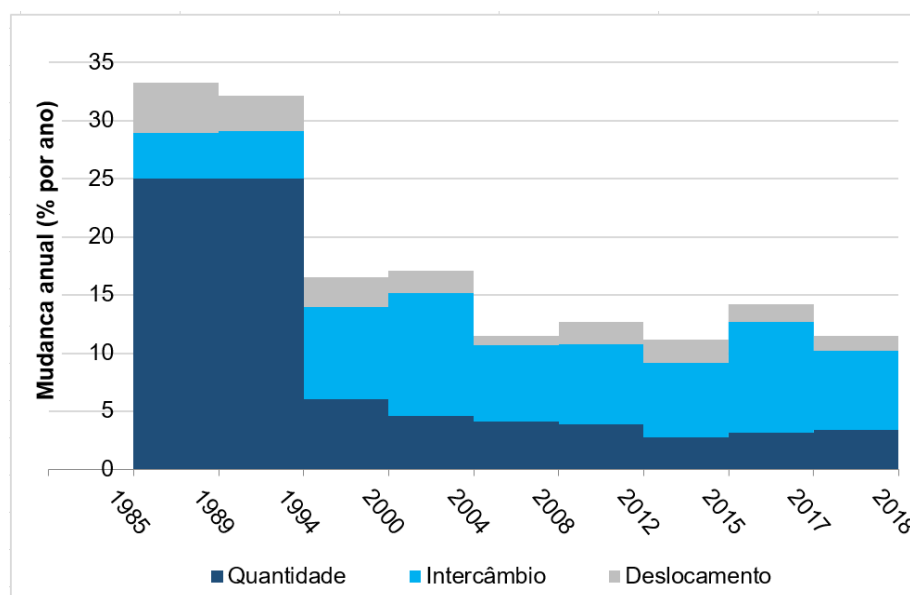


Figura 71 - Distribuição em ha, das mudanças positivas e negativas líquidas por cada classe de uso e cobertura entre 1985 e 2018 em Camocim.

Figura 72 - Mudanças anuais gerais (%) em Camocim entre os anos 1985 e 2018.

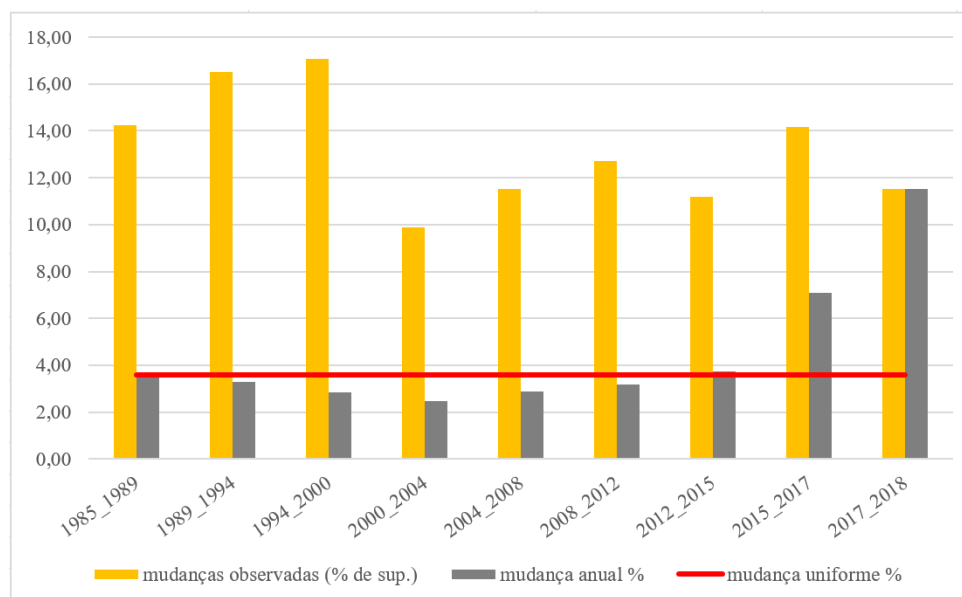


Fonte: Elaboracao própria.

A Figura 72 mostrou as mudanças em termos de quantidade, intercâmbio e deslocamento. Na Figura 73 é observado um padrão da mudança, onde foram identificadas as mudanças sistemáticas independentemente de qualquer tipo de persistência. A análise de intensidade da mudança compara a intensidade de mudança uniforme, que serve de referência para comparar as mudanças no mesmo nível hierárquico, e visa observar como a taxa de mudança varia entre os intervalos de tempo. O intervalo de tempo entre 1985 e 2012 possui uma taxa de mudança anual abaixo da linha de mudança uniforme, indicando que durante este período as mudanças foram lentas. No intervalo de tempo de 2012 a 2018, a taxa de mudança anual superou a mudança uniforme, sendo desta forma um período de mudanças rápidas.

As superfícies de mudança superaram o 11% entre 1985 e 2018, mostrando que a maior porcentagem de superfície mudou entre os anos 1989 e 2000, superando 16%. O período de 2017 e 2018 apresenta uma homogeneidade entre a quantidade de superfície que mudou e a taxa de mudança anual, isto pode ter relação com o fato de o intervalo de tempo avaliado correspondem a um ano, enquanto os outros intervalos encontram-se entre 3 e 6 anos. Desta forma, parece que conforme aumenta o intervalo de tempo avaliado, diminui a proporção real de mudança anual, já que as "falsas" mudanças relacionadas com os erros de classificação são mais ou menos as mesmas para períodos longos ou curtos.

Figura 73 - Intensidade da mudança em termos de velocidade entre 1985 e 2018 em Camocim.



Fonte: Elaboracao propria

Logo depois de produzir uma visão geral do comportamento das mudanças entre 1986 e 2018, foram estimadas os ganhos e perdas por classe, durante cada intervalo de tempo e como mudam estas em relação a área da categoria. Desta forma, foi comparada a intensidade da mudança anual por classe, com a correspondente intensidade uniforme de mudança anual. Para cada intervalo de tempo foram identificadas condições de ganhos e perdas que podem ser interpretadas de diversas formas, tais como: relacionadas com erros da classificação, como mudanças fenológicas, mudanças estacionais, que são aspectos que devem ser considerados com cautela.

A Figura 74 apresenta os gráficos com as variações para cada intervalo de tempo, destacando que a classe “Arbustivo” ficou sempre abaixo da linha de intensidade, o que quer dizer que esta classe permaneceu latente durante todo o período de estudo.

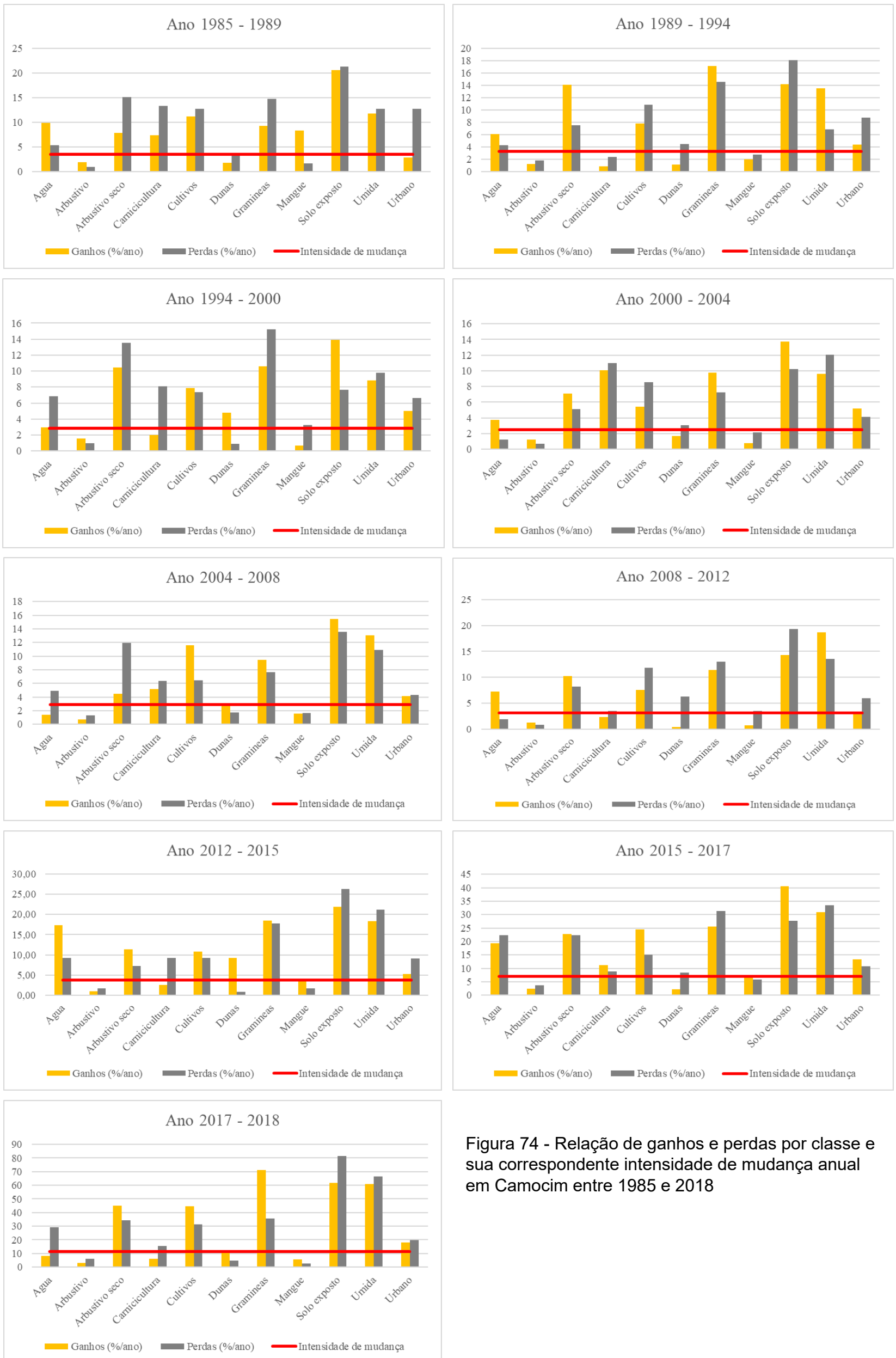


Figura 74 - Relação de ganhos e perdas por classe e sua correspondente intensidade de mudança anual em Camocim entre 1985 e 2018

No caso do manguezal, permaneceu latente na maior parte do período de estudo, com exceção do intervalo 1994 – 2000 onde destacou-se a porcentagem de perda, o que permite inferir a perda de áreas de manguezal para a carcinicultura. O restante das classes permaneceram ativas e com variabilidade em cada intervalo de tempo. Os ganhos e perdas dos corpos de água para cada intervalo de tempo, refletem os períodos de precipitações menores, próximas ou acima da meia de precipitação. As dunas são uma categoria que ficou latente entre 1985 e 1989, 2004 e 2008, 2017 e 2018. No restante dos intervalos foi uma categoria ativa e com variações de ganhos e perdas, sendo que os intervalos de tempo onde destacam-se os ganhos, correspondem com secas ou anos com precipitação abaixo da média.

Carcinicultura permaneceu latente apenas entre 1989 e 1994, no restante dos anos permaneceu ativa, destacando o período de 2000 e 2004 com um maior crescimento da atividade, já que neste período começaram a ser construídas ao longo do manguezal, as chamadas fazendas de camarão. Outras classes destacadas com porcentagem de ganhos e perdas próximas a 15% entre 1985 – 2018, são o solo exposto e arbustivo caducifólio; este último com exceção do período 2000 – 2004. As classes: cultivos, gramíneas e áreas úmidas, estiveram com ganhos e perdas entre 1985 e 2018, próximas a 10%.

A proporção de área úmidas se apresenta sempre maior do que a proporção dos corpos de águas, e nos intervalos onde aumentou o ganho de superfície dos corpos de água entre 10 e 15 % (1985 – 1989, 2012 – 2017) não houve diminuição das áreas úmidas.

A Figura 75, apresenta o conjunto de tabelas obtidas da matriz de transição, que resumem o comportamento dinâmico da área de estudo entre 1985 e 2018. Ressalta-se um resultado esperado e apontado por Pontius et al. (2004) e Salas e Aguilera (2019) como situação habitual na detecção de mudanças, tendo as áreas de persistência ou estabilidade predominarem na superfície total da área de estudo em uma proporção maior que 82,93 % entre 1994 e 2000. O período entre 2000 e 2004 mostrou o maior valor de estabilidade com 90,12%. Com relação às mudanças totais destaca-se o valor 17,07 % do período 1994 – 2000, enquanto o período 2000 -2004 ficou com 9,88 %. No restante dos intervalos de tempo encontraram-se mudanças totais entre 10 e 16,50%.

Ano 1985- 1989						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	1,05	0,69	0,28	0,97	-0,40	1,37
Arbustivo	73,14	6,11	2,88	8,98	3,23	5,75
Arbustivo caducifólio	1,69	0,77	2,61	3,39	1,84	1,54
Carcinicultura	0,07	0,03	0,08	0,11	0,05	0,06
Cultivos	3,65	2,99	3,82	6,81	0,84	5,97
Dunas	1,86	0,15	0,27	0,42	0,12	0,29
Gramineas	0,33	0,20	0,48	0,67	0,28	0,39
Manguezal	0,56	0,28	0,04	0,67	0,24	0,08
Solo exposto	0,04	0,17	0,22	0,32	0,04	0,34
Áreas Úmidas	3,16	2,82	3,30	0,39	0,48	5,64
Urbano	0,24	0,03	0,25	6,12	0,22	0,06
Totais	85,77	14,23	14,23	28,85	6,95	21,51

Ano 1989 - 1994						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,93	0,41	0,25	0,66	-0,15	0,81
Arbustivo	71,38	4,63	6,99	11,62	2,36	9,26
Arbustivo caducifólio	1,28	3,02	0,77	3,80	2,25	1,54
Carcinicultura	0,14	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01
Cultivos	4,57	2,91	5,41	8,32	2,51	5,81
Dunas	2,01	0,12	0,58	0,69	0,46	0,23
Gramineas	0,12	0,69	0,31	1,00	0,38	0,62
Manguezal	0,54	0,06	0,08	1,00	0,03	0,12
Solo exposto	0,07	0,18	0,69	0,14	0,51	0,36
Áreas Úmidas	2,09	4,37	1,09	0,87	3,28	2,19
Urbano	0,38	0,11	0,29	5,47	0,19	0,21
Totais	83,50	16,50	16,50	33,60	11,82	21,17

Ano 1994 - 2000						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,97	0,21	0,68	0,89	0,47	0,41
Arbustivo	71,08	7,29	4,35	11,64	2,94	8,70
Arbustivo caducifólio	0,76	1,28	3,31	4,59	2,02	2,57
Carcinicultura	0,14	0,02	0,14	0,16	0,12	0,04
Cultivos	5,27	4,71	4,19	8,90	0,51	8,39
Dunas	1,85	0,74	0,11	0,85	0,63	0,22
Gramineas	0,16	0,27	1,61	1,88	1,33	0,54
Manguezal	0,60	0,02	0,14	1,88	0,12	0,05
Solo exposto	0,13	0,64	0,11	0,17	0,53	0,22
Áreas Úmidas	1,49	1,69	2,12	0,74	0,43	3,38
Urbano	0,47	0,20	0,31	3,81	0,11	0,40
Totais	82,93	17,07	17,07	35,49	9,21	24,92

Ano 2000- 2004						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	1,40	0,25	0,07	0,32	-0,18	0,50
Arbustivo	71,65	3,78	2,03	5,81	1,75	4,06
Arbustivo caducifólio	2,91	1,16	0,74	1,91	0,42	1,49
Carcinicultura	0,17	0,11	0,13	0,24	0,02	0,23
Cultivos	7,41	2,06	3,86	5,92	1,80	4,12
Dunas	1,83	0,13	0,22	0,26	0,39	0,26
Gramineas	1,07	0,69	0,44	1,12	0,25	0,87
Manguezal	0,72	0,02	0,07	1,12	0,04	0,05
Solo exposto	0,11	0,13	0,07	0,09	0,06	0,15
Áreas Úmidas	2,23	1,38	2,08	0,20	0,70	2,77
Urbano	0,62	0,16	0,12	3,46	0,04	0,25
Totais	90,12	9,88	9,88	20,59	5,02	14,74

Ano 2004- 2008						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	1,39	0,08	0,34	0,42	0,26	0,17
Arbustivo	71,56	2,13	3,83	5,97	1,70	4,26
Arbustivo caducifólio	3,00	0,65	2,75	3,40	2,10	1,30
Carcinicultura	0,24	0,06	0,08	0,14	0,02	0,12
Cultivos	6,03	5,23	2,10	7,33	3,14	4,19
Dunas	1,84	0,24	0,14	0,38	0,11	0,27
Gramineas	0,94	0,57	0,41	0,98	0,16	0,83
Manguezal	0,74	0,05	0,05	0,98	0,00	0,10
Solo exposto	0,07	0,11	0,08	0,10	0,03	0,16
Áreas Úmidas	2,06	2,25	1,59	0,19	0,66	3,18
Urbano	0,62	0,12	0,13	3,84	0,01	0,25
Totais	88,49	11,51	11,51	23,75	8,18	14,84

Ano 2008- 2012						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	1,23	0,50	0,10	0,61	-0,40	1,01
Arbustivo	71,61	3,78	2,62	6,40	1,15	5,25
Arbustivo caducifólio	3,39	2,37	1,66	4,03	0,70	3,33
Carcinicultura	0,29	0,03	0,05	0,08	0,02	0,06
Cultivos	5,68	2,45	5,15	7,60	2,71	4,90
Dunas	1,95	0,03	0,65	0,68	0,62	0,06
Gramineas	0,74	0,62	0,80	1,42	0,19	1,24
Manguezal	0,77	0,02	0,13	0,15	0,10	0,05
Solo exposto	0,06	0,09	0,22	0,31	0,13	0,17
Áreas Úmidas	0,92	2,72	1,10	3,82	1,62	2,20
Urbano	0,65	0,10	0,20	0,30	0,10	0,20
Totais	87,30	12,70	12,70	25,41	6,95	18,46

Ano 2012- 2015						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,64	0,69	0,24	0,94	-0,45	1,38
Arbustivo	72,10	2,13	4,00	6,13	1,86	4,27
Arbustivo caducifólio	3,32	1,73	0,92	2,65	0,81	1,84
Carcinicultura	0,31	0,03	0,12	0,15	0,09	0,05
Cultivos	7,35	3,49	2,80	6,29	0,70	5,59
Dunas	1,88	0,72	0,05	0,77	0,68	0,10
Gramineas	0,69	0,85	0,78	1,63	0,07	1,56
Manguezal	0,80	0,09	0,04	1,63	0,05	0,09
Solo exposto	0,10	0,19	0,36	0,14	0,18	0,37
Áreas Úmidas	0,91	1,12	1,59	0,55	0,48	2,24
Urbano	0,72	0,14	0,27	2,71	0,13	0,27
Totais	88,82	11,18	11,18	23,58	4,60	17,75

Ano 2015- 2017						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,54	0,34	0,44	0,78	0,09	0,69
Arbustivo	72,39	3,71	5,68	9,39	1,97	7,42
Arbustivo caducifólio	2,32	1,92	1,86	3,79	0,06	3,73
Carcinicultura	0,34	0,10	0,07	0,17	0,03	0,14
Cultivos	5,18	4,96	2,22	7,18	2,74	4,43
Dunas	1,84	0,09	0,37	0,45	0,28	0,17
Gramineas	0,72	0,75	1,21	1,96	0,45	1,51
Manguezal	0,73	0,12	0,10	1,96	0,02	0,20
Solo exposto	0,09	0,37	0,11	0,22	0,26	0,22
Áreas Úmidas	0,96	1,54	1,93	0,48	0,38	3,09
Urbano	0,72	0,27	0,20	3,47	0,07	0,40
Totais	85,82	14,18	14,18	29,85	6,36	21,99

Ano 2017- 2018						
Classes	Estável	Ganho	Perda	Mudança Total	Mudança Neta	Intercâmbio
Corpos d'Água	0,90	0,08	0,37	0,45	0,29	0,16
Arbustivo	75,62	2,46	4,78	7,23	2,32	4,91
Arbustivo caducifólio	2,29	1,89	1,19	3,08	0,70	2,38
Carcinicultura	0,39	0,02	0,07	0,10	0,05	0,05
Cultivos	4,09	3,30	1,87	5,18	1,43	3,74
Dunas	1,96	0,24	0,10	0,34	0,14	0,20
Gramineas	0,55	1,37	0,30	1,68	1,07	0,61
Manguezal	0,78	0,05	0,02	1,68	0,03	0,04
Solo exposto	0,08	0,12	0,33	0,07	0,21	0,24
Áreas Úmidas	1,13	1,75	2,24	0,45	0,49	3,51
Urbano	0,75	0,17	0,18	3,99	0,02	0,33
Totais	88,54	11,46	11,46	24,25	6,74	16,18

Figura 75 - Tabelas com o comportamento dinâmico de cada classe por intervalo de tempo em Camocim

As classes que sofreram maiores mudanças totais entre 1985 e 1989 foram: arbustivo (8,98%), cultivos (6,81%), urbano (6,12%) e arbustivo caducifólio (3,39%). A mudança líquida negativa corresponde ao corpo d'água com (0,40%), enquanto as mudanças líquidas positivas foram arbustivo (3,23%) e arbustivo caducifólio (1,84%). O intercâmbio se apresenta com maior magnitude nos cultivos (5,97%), seguido do arbustivo (5,75%), e áreas úmidas (5,64%).

Entre 1989 e 1994, as classes com as maiores mudanças totais foram: arbustivo (11,62%), cultivos (8,32%), urbano (5,47%) e arbustivo caducifólio (3,80%). A mudança líquida negativa continua no corpo d'água com (0,15%), enquanto as mudanças líquidas positivas foram em maior proporção em áreas úmidas (3,28%), cultivos (2,51%), arbustivo (2,36%) e arbustivo caducifólio (2,25%). O Intercambio apresentou os maiores valores nas classes: arbustivo (9,26%), cultivos (5,81%) e áreas úmidas (2,19%).

As classes que sofreram maiores mudanças totais entre 1994 e 2000 foram: arbustivo (11,64%), cultivos (8,90%), arbustivo caducifólio (4,59%) e urbano (3,81%). As mudanças líquidas positivas foram arbustivo (2,94%) e arbustivo caducifólio (2,02%). O intercâmbio se apresenta com maior magnitude no arbustivo (8,70%), seguido dos cultivos (8,39%) e áreas úmidas (3,38%).

No intervalo 2000 - 2004, as classes com as maiores mudanças totais foram: cultivos (5,92%), arbustivo (5,81%), urbano (3,46%). A mudança líquida negativa continua no corpo d'água com (0,18%), enquanto destacam-se as mudanças líquidas positivas no arbustivo (1,75%) e cultivos (1,80%). O intercâmbio observa-se com maior magnitude em cultivos (2,12%), arbustivo (4,06%) e áreas úmidas (2,77%).

As classes que sofreram maiores mudanças totais entre 2004 e 2008 foram: cultivos (7,33%), arbustivo (5,97%), urbano (3,84%), arbustivo caducifólio (3,40%). Neste período não foram observadas mudanças negativas líquidas e destacam-se as mudanças líquidas positivas nos cultivos (3,14%), arbustivo caducifólio (2,10%) e arbustivo (1,70%). O intercâmbio se apresenta com maior magnitude nos arbustivo (4,26%), seguido dos cultivos (4,19%) e das áreas úmidas (3,18%).

Entre 2008 e 2012, as classes com as maiores mudanças totais foram: cultivos (7,60%), arbustivo (6,40%), arbustivo caducifólio (4,03%) e áreas úmidas (3,82%). A mudança líquida negativa continua no corpo d'água com (0,40%),

enquanto destacam-se as mudanças líquidas positivas nas classes cultivos (2,71%), áreas úmidas (1,62%) e arbustivo (1,15%). O Intercambio apresentou os maiores valores nas classes: arbustivo (5,25%), cultivos (4,90%), arbustivo caducifólio (3,33%) e áreas úmidas (2,20%).

As classes que sofreram maiores mudanças totais entre 2012 e 2015 foram: cultivos (6,29%), arbustivo (6,13%), urbano (2,71%), arbustivo caducifólio (2,65%). A mudança líquida negativa continua no corpo d'água com (0,45%), enquanto as mudanças líquidas positivas foram em arbustivo (1,86%). O intercâmbio se apresenta com maior magnitude nos cultivos (5,59%), seguido de arbustivo (4,27%) e áreas úmidas (2,24%).

No intervalo de 2015 - 2017, as classes com as maiores mudanças totais foram: arbustivo (9,39%), cultivos (7,18%), arbustivo caducifólio (3,79%) e urbano (3,47%). Neste período não foram observadas mudanças negativas líquidas e destacam-se as mudanças líquidas positivas nos cultivos (2,74%) e, arbustivo (1,97%). O intercâmbio observa-se com maior magnitude em arbustivo (7,42%), seguido de cultivos (4,43%), arbustivo caducifólio (3,77%) e áreas úmidas (3,09%).

Entre 2017 e 2018, as classes com as maiores mudanças totais foram: arbustivo (7,23%), cultivos (5,18%), urbano (3,99%) e arbustivo caducifólio (3,08%). Neste período não foram observadas mudanças negativas líquidas e destacam-se as mudanças positivas nas classes arbustivo (2,32%), cultivos (1,43%) e gramíneas (1,07%). O Intercambio apresentou os maiores valores nas classes: arbustivo (4,91%), cultivos (3,74%), áreas úmidas (3,51%) e arbustivo caducifólio (2,38%).

Depois de observar o comportamento das classes no tempo, destacaram, no período 1985 – 2018, as mudanças e intercâmbio nas superfícies com cobertura: arbustivo, arbustivo caducifólio, cultivos, áreas úmidas e corpos de água. Mas a interpretação do aumento ou redução das superfícies de mudança e sua significância, foi conduzida com a análise da matriz de transição, considerando os ganhos e perdas. Foram selecionadas as transições com a maior diferença entre a porcentagem de área observada e esperada, dando maior prioridade a extensão da mudança. No caso de classes que não mostram grandes diferenças em extensão, mas um valor de índice alto, foram considerados os casos onde a magnitude da mudança poderia corresponder a situações conhecidas dentro da área em estudo.

Nesta fase foram escolhidos os intervalos de tempo 1994 – 2000 e 2000 - 2004, por apresentarem o menor e o maior predomínio de áreas de estabilidade,

respectivamente. A tabela 24 mostra a matriz de transição desde dos ganhos entre 1994 e 2000.

O período 1994 – 2000, mostrou que o aumento da superfície arbustiva aconteceu em substituição ao arbustivo caducifólio (diferença de 0,800 e índice de 1,489) numa magnitude 1,5 vezes maior ao esperado pela sorte, mas também não substituiu de forma significativa os cultivos (diferença 0,871 e índice -0,174). Neste caso pode ter havido certa confusão porque os cultivos de caju são arbóreos e em ocasiões podem se confundir com a cobertura arbustiva densa. A classe arbustiva substituiu áreas de solo exposto (diferença 0,790 e índice -0,981) e áreas úmidas (diferença 0,809 e índice -0,420) de forma não significativa.

Outras transições numa magnitude próxima ao esperado pela sorte correspondem aos arbustivos caducifólios substituindo os cultivos (diferença 0,023 e índice 1,317); cultivos substituindo arbustivos e gramíneas (diferença e índice 0,461; 0,092 e 0,100; 2,694, respectivamente). As dunas substituem cobertura arbustiva (diferença 0,120 e índice --0,989) de forma não significativa, mas esta substituição acontece nas bordas do campo de dunas com o avanço das mesmas em sentido ao continente.

As áreas úmidas substituem a classe arbustivo de forma não significativa (diferença 0,147 e índice -0,694), mas substituem áreas de dunas (diferença 0,033 e índice 2,014), sendo que neste último caso, a substituição não representa um ganho de superfície, senão uma mudança temporária em termos de magnitude, pelo ganho de água que forma lagoas interdunares, que eventualmente poderia ser categorizada como um intercâmbio.

Os corpos d'água substituem a áreas úmidas de forma significativa (diferença 0,012 e índice 5,967). Pelo conhecimento no trabalho de campo, a área do Açude Gambarra mudou a cobertura. Neste sentido, a transição é válida porque no ano 1999 foi concluída a construção do açude Gangorra sobre o leito do riacho Gangorra no Município de Granja.

Tabela 24 - Matriz de transição desde os ganhos entre 1994 – 2000 em Camocim.

	Corpos d'água	Arbustivo	Arbustivo caducifólio	Carcinicultura	Cultivos	Dunas	Gramineas	Manguezal	Solo exposto	Áreas Úmidas	Urbano	Total	Perda
Água	0,972	0,188	0,242	0,014	0,021	0,008	0,002	0,002	0,050	0,152	0,001	1,651	0,473
	<i>0,972</i>	<i>0,164</i>	<i>0,004</i>	<i>0,000</i>	<i>0,021</i>	<i>0,005</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,002</i>	<i>0,007</i>	<i>0,001</i>	<i>17,270</i>	<i>2,947</i>
	<u>0,793</u>	<u>0,021</u>	<u>0,002</u>	<u>0,101</u>	<u>0,026</u>	<u>0,004</u>	<u>0,006</u>	<u>0,008</u>	<u>0,032</u>	<u>0,007</u>	<u>1,012</u>	<u>0,173</u>	
	0,143	55,450	38,901	0,025	0,387	1,520	0,316	30,466	21,790	-0,592	-0,904	-0,769	
Arbustivo	0,004	71,082	0,060	0,000	3,671	0,010	0,121	0,004	0,034	0,328	0,120	75,434	-2,936
	<i>0,397</i>	<i>71,082</i>	<i>0,690</i>	<i>0,055</i>	<i>3,362</i>	<i>0,873</i>	<i>0,143</i>	<i>0,211</i>	<i>0,257</i>	<i>1,072</i>	<i>0,227</i>	<i>78,901</i>	<i>13,466</i>
	0,054	-	0,095	0,008	0,461	0,120	0,020	0,029	0,035	0,147	0,031	4,623	0,789
	-0,991	-0,913	-1,000	0,092	-0,989	-0,157	-0,979	-0,866	-0,694	-0,472	-0,044	-0,677	
Arbustivo caducifólio	0,003	2,556	0,765	0,000	0,298	0,001	0,001	0,000	0,034	0,393	0,020	4,070	2,022
	<i>0,015</i>	<i>1,027</i>	<i>0,765</i>	<i>0,002</i>	<i>0,131</i>	<i>0,034</i>	<i>0,006</i>	<i>0,008</i>	<i>0,010</i>	<i>0,042</i>	<i>0,009</i>	<i>17,423</i>	<i>2,974</i>
	0,012	0,800	-	0,002	0,102	0,026	0,004	0,006	0,008	0,032	0,007	1,021	0,174
	-0,810	1,489	-1,000	-1,000	1,276	-0,975	-0,794	-0,981	2,387	8,434	1,238	-0,766	0,112
Carcinicultura	0,029	0,000	0,000	0,145	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004	0,101	0,001	0,281	0,116
	<i>0,000</i>	<i>0,016</i>	<i>0,000</i>	<i>0,145</i>	<i>0,002</i>	<i>0,001</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,000</i>	<i>0,001</i>	<i>0,000</i>	<i>17,095</i>	<i>2,917</i>
	0,012	0,785	0,021	-	0,100	0,026	0,004	0,006	0,008	0,032	0,007	1,002	0,171
	123,382	-0,997	-1,000	-	-0,869	-1,000	-0,386	6,516	21,951	157,189	9,877	-0,984	-0,953
Cultivos	0,003	3,384	0,248	0,000	5,273	0,001	0,107	0,000	0,077	0,354	0,021	9,468	-0,511
	<i>0,062</i>	<i>4,097</i>	<i>0,107</i>	<i>0,009</i>	<i>5,273</i>	<i>0,135</i>	<i>0,022</i>	<i>0,033</i>	<i>0,040</i>	<i>0,166</i>	<i>0,035</i>	<i>18,958</i>	<i>3,236</i>
	0,013	0,871	0,023	0,002	-	0,029	0,005	0,007	0,008	0,035	0,007	1,111	0,190
	-0,957	-0,174	1,317	-1,000	-	-0,996	3,806	-0,995	0,932	1,130	-0,411	-0,501	0,296
Dunas	0,017	0,012	0,000	0,000	0,006	1,851	0,000	0,001	0,000	0,073	0,000	1,960	-0,631
	<i>0,009</i>	<i>0,595</i>	<i>0,016</i>	<i>0,001</i>	<i>0,076</i>	<i>1,851</i>	<i>0,003</i>	<i>0,005</i>	<i>0,006</i>	<i>0,024</i>	<i>0,005</i>	<i>17,520</i>	<i>2,990</i>
	0,012	0,805	0,021	0,002	0,102	-	0,004	0,000	0,008	0,033	0,007	1,027	0,175
	0,853	-0,980	-1,000	-1,000	-0,919	-	-0,919	-0,780	-0,982	2,014	-1,000	-0,888	-0,964
Gramineas	0,002	0,251	0,518	0,001	0,100	0,452	0,155	0,000	0,163	0,105	0,013	1,761	1,335
	<i>0,003</i>	<i>0,213</i>	<i>0,006</i>	<i>0,000</i>	<i>0,027</i>	<i>0,007</i>	<i>0,155</i>	<i>0,002</i>	<i>0,002</i>	<i>0,009</i>	<i>0,002</i>	<i>17,139</i>	<i>2,925</i>
	0,012	0,787	0,021	0,002	0,100	0,026	-	0,006	0,008	0,032	0,007	1,004	0,171
	-0,444	0,178	92,142	0,171	2,694	63,302	-	-0,815	77,818	11,201	6,102	-0,897	-0,451
Mangue	0,005	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,000	0,601	0,000	0,136	0,000	0,746	0,121
	<i>0,000</i>	<i>0,019</i>	<i>0,001</i>	<i>0,000</i>	<i>0,002</i>	<i>0,001</i>	<i>0,000</i>	<i>0,601</i>	<i>0,000</i>	<i>0,001</i>	<i>0,000</i>	<i>17,174</i>	<i>2,931</i>
	0,012	0,789	0,021	0,002	0,100	0,026	0,004	-	0,008	0,032	0,007	1,006	0,172
	15,463	-0,973	-0,688	50,858	-0,765	0,153	-1,000	-	-0,441	173,245	-1,000	-0,957	-0,951
Solo exposto	0,002	0,010	0,004	0,000	0,035	0,023	0,000	0,000	0,127	0,034	0,001	0,236	-0,527
	<i>0,008</i>	<i>0,502</i>	<i>0,013</i>	<i>0,001</i>	<i>0,064</i>	<i>0,017</i>	<i>0,003</i>	<i>0,004</i>	<i>0,127</i>	<i>0,020</i>	<i>0,004</i>	<i>17,198</i>	<i>2,935</i>
	0,012	0,790	0,021	0,002	0,101	0,026	0,004	0,006	-	0,032	0,007	1,008	0,172
	-0,737	-0,981	-0,709	-1,000	-0,457	0,381	-0,827	-1,000	-	0,661	-0,757	-0,986	-0,963
Áreas Úmidas	0,143	0,793	0,135	0,003	0,518	0,241	0,019	0,016	0,225	1,492	0,026	3,611	0,429
	<i>0,021</i>	<i>1,368</i>	<i>0,036</i>	<i>0,003</i>	<i>0,174</i>	<i>0,045</i>	<i>0,007</i>	<i>0,011</i>	<i>0,013</i>	<i>1,492</i>	<i>0,012</i>	<i>17,627</i>	<i>3,008</i>
	0,012	0,809	0,021	0,002	0,103	0,027	0,004	0,006	0,008	-	0,007	1,033	0,176
	5,967	-0,420	2,764	0,203	1,974	4,330	1,534	0,427	15,877	-	1,196	-0,795	-0,296
Urbano	0,000	0,094	0,076	0,000	0,056	0,004	0,019	0,000	0,048	0,013	0,471	0,783	0,110
	<i>0,002</i>	<i>0,159</i>	<i>0,004</i>	<i>0,000</i>	<i>0,020</i>	<i>0,005</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,002</i>	<i>0,006</i>	<i>0,471</i>	<i>17,182</i>	<i>2,932</i>
	0,012	0,789	0,021	0,002	0,100	0,026	0,004	0,006	0,008	0,032	-	1,007	0,172
	-0,956	-0,408	17,258	-0,531	1,765	-0,206	21,408	-1,000	30,081	1,061	-	-1,000	-0,894
Total	1,179	78,370	2,048	0,164	9,979	2,590	0,426	0,626	0,763	3,182	0,673		
Ganho	0,207	7,288	1,283	0,020	4,706	0,740	0,270	0,024	0,636	1,690	0,202		

Valores em Negrito: porcentagem com relação a toda a imagem, **Valores em Itálico:** valor esperado se a mudança fosse pelo azar, **Valores Sublinhados:** é a diferença entre o valor observado e estimado. **Valores simples:** Índice: valor observado menos o estimado dividido pelo estimado

Valores destacados na cor amarelo: mudanças significativas

Valores destacados na cor azul: mudanças aparentemente não significativas

Transições como arbustivo substituindo o urbano, cultivos substituindo o urbano, não são reais, sendo interpretadas como erros na classificação arbustivo.

Considerando a perda total para classe com relação às outras mencionase que: quando classes diferentes dos cultivos ganham superfícies de forma significativa, substituem os cultivos (diferença 0,190 e índice 0,296), se outras classes diferentes do arbustivo caducifólio ganham de forma significativa, estas as substituem. As outras classes que tem aumentado sua extensão de forma não significativa, tais como arbustivo, dunas, gramíneas, solo exposto e áreas úmidas, por terem o valor do índice negativo, não conseguem substituir as outras.

Os resultados da matriz de transição, considerando as perdas, são mostradas na tabela 25. Quando o Arbustivo perde superfície é substituído de forma significativa pelo arbustivo caducifólio (diferença 0,135 e índice 4,747) ou por cultivos (diferença 0,171 e índice 3,725). Quando os cultivos perdem superfície são substituídos pelo arbustivo caducifólio (diferença 0,039 e índice 0,824).

O arbustivo caducifólio pode perder para gramíneas (diferença 0,017 e índice 18,281). Os cultivos perdem superfície e são substituídos pelo arbustivo (diferença 0,048 e índice 16,547). As gramíneas perdem para áreas arbustivo caducifólio (diferença 0,034 e índice -0,990) mas não de forma significativa.

Outras mudanças aparentemente não significativas, mas que representam tendências e pequenas variações constatadas no campo, correspondem a: as dunas perdem superfície e são substituídas por gramíneas (diferença 0,016 e índice 16,206) e áreas úmidas (diferença 0,022 e índice 4,265). Esta substituição deve ser entendida como uma mudança temporária em termos de magnitude, um intercambio, quando aumenta o conteúdo de água no campo de dunas favorecendo a presença de áreas úmidas e cobertura de gramíneas.

Tabela 25 - Matriz de transição desde as perdas entre 1994 – 2000 em Camocim.

	Corpos d'água	Arbustivo	Arbustivo caducifólio	Carcinicultura	Cultivos	Dunas	Gramineas	Manguezal	Solo exposto	Áreas Úmidas	Urbano	Total
Água	0,972	0,188	0,242	0,014	0,021	0,008	0,002	0,002	0,050	0,152	0,001	1,651
	0,972	0,193	0,111	0,000	0,179	0,000	0,026	0,000	0,000	0,046	0,001	
		0,044	0,034	0,001	0,043	0,001	0,016	0,001	0,001	0,022	0,003	
		-0,981	-0,974	154,168	-0,985	136,473	-0,932	21,279	15,575	2,141	-0,894	
Arbustivo	0,004	71,082	0,060	0,000	3,671	0,010	0,121	0,004	0,034	0,328	0,120	75,434
	0,019	71,082	0,445	0,001	0,716	0,000	0,105	0,001	0,000	0,183	0,004	
	0,028	-	0,135	0,006	0,171	0,004	0,065	0,006	0,004	0,086	0,013	
	8,980		4,747	-0,931	3,725	23,698	1,390	-0,388	19,374	3,341	22,815	
Arbustivo caducifólio	0,003	2,556	0,765	0,000	0,298	0,001	0,001	0,000	0,034	0,393	0,020	4,070
	0,005	0,197	0,765	0,000	0,183	0,000	0,027	0,000	0,000	0,047	0,001	
	0,007	0,045	-	0,001	0,044	0,001	0,017	0,002	0,001	0,022	0,003	
	49,321	-0,695	-1,000	0,352	-1,000	18,281	-0,284	30,058	1,876	73,954		
Carcinicultura	0,029	0,000	0,000	0,145	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004	0,101	0,001	0,281
	0,005	0,190	0,110	0,145	0,176	0,000	0,026	0,000	0,000	0,045	0,001	
	0,007	0,044	0,033	-	0,042	0,001	0,016	0,001	0,001	0,021	0,003	
	1,969	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-0,980	8,929	-1,000	-0,923	-0,839	
Cultivos	0,003	3,384	0,248	0,000	5,273	0,001	0,107	0,000	0,077	0,354	0,021	9,468
	0,005	0,209	0,121	0,000	5,273	0,000	0,028	0,000	0,000	0,050	0,001	
	0,008	0,048	0,037	0,002	-	0,001	0,018	0,002	0,001	0,023	0,003	
	3,203	16,547	1,466	0,273	46,106	2,516	1,479	265,606	9,450	51,201		
Dunas	0,017	0,012	0,000	0,000	0,006	1,851	0,000	0,001	0,000	0,073	0,000	1,960
	0,005	0,193	0,111	0,000	0,179	1,851	0,026	0,000	0,000	0,046	0,001	
	0,007	0,044	0,034	0,001	0,043	-	0,016	0,001	0,001	0,022	0,003	
	0,598	-0,950	-0,992	-1,000	-0,997	16,206	2,417	189,448	4,265	3,215		
Gramineas	0,002	0,251	0,518	0,001	0,100	0,452	0,155	0,000	0,163	0,105	0,013	1,761
	0,005	0,193	0,111	0,000	0,179	0,000	0,155	0,000	0,000	0,046	0,001	
	0,007	0,044	0,034	0,001	0,043	0,001	0,001	0,001	0,001	0,022	0,003	
	-0,522	-0,373	-0,990	-0,724	-0,403	1,166	-1,000	2,921	-0,588	18,586		
Mangue	0,005	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,000	0,601	0,000	0,136	0,000	0,746
	0,005	0,191	0,110	0,000	0,177	0,000	0,026	0,601	0,000	0,045	0,001	
	0,007	0,044	0,033	0,001	0,042	0,001	0,016	-	0,001	0,021	0,003	
	-0,629	-0,977	-0,999	4,024	-0,999	7,753	-0,988	-1,000	-0,655	-1,000		
Solo exposto	0,002	0,010	0,004	0,000	0,035	0,023	0,000	0,000	0,127	0,034	0,001	0,236
	0,005	0,190	0,110	0,000	0,176	0,000	0,026	0,000	0,127	0,045	0,001	
	0,007	0,044	0,033	0,001	0,042	0,001	0,016	0,001	-	0,021	0,003	
	9,866	-0,819	-0,691	17,798	-0,563	-0,120	5,321	-0,503	3,996	48,429		
Áreas Úmidas	0,143	0,793	0,135	0,003	0,518	0,241	0,019	0,016	0,225	1,492	0,026	3,611
	0,005	0,215	0,124	0,000	0,200	0,000	0,029	0,000	0,000	1,492	0,001	
	0,008	0,049	0,038	0,002	0,048	0,001	0,018	0,002	0,001	-	0,004	
	27,954	0,525	2,168	475,661	0,772	539,149	2,600	568,555	251,514	11,059		
Urbano	0,000	0,094	0,076	0,000	0,056	0,004	0,019	0,000	0,048	0,013	0,471	0,783
	0,005	0,191	0,110	0,000	0,177	0,000	0,026	0,000	0,000	0,045	0,471	
	0,007	0,044	0,033	0,001	0,042	0,001	0,016	0,001	0,001	0,021	-	
	-0,876	-0,373	-0,821	6,813	-0,883	-1,000	-0,500	-1,000	7,801	-0,430		
Total	1,179	78,370	2,048	0,164	9,979	2,590	0,426	0,626	0,763	3,182	0,673	
	17,353	69,471	17,791	17,115	18,851	17,408	17,372	17,195	17,107	19,394	17,201	
	1,017	4,071	1,042	1,003	1,105	1,020	1,018	1,008	1,002	1,136	1,008	
	-0,932	0,128	-0,885	-0,990	-0,471	-0,851	-0,975	-0,964	-0,955	-0,836	-0,961	
Ganho	0,207	7,288	1,283	0,020	4,706	0,740	0,270	0,024	0,636	1,690	0,202	
	2,962	11,856	3,036	2,921	3,217	2,971	2,965	2,935	2,920	3,310	2,936	
	0,174	0,695	0,178	0,171	0,189	0,174	0,174	0,172	0,171	0,194	0,172	
	-0,930	-0,385	-0,577	-0,993	0,463	-0,751	-0,909	-0,992	-0,782	-0,489	-0,931	

Valores em Negrito: porcentagem com relação a toda a imagem, **Valores em Itálico:** valor esperado se a mudança fosse pelo azar, **Valores Sublinhados:** é a diferença entre o valor observado e estimado. **Valores simples:** Índice: valor observado menos o estimado dividido pelo estimado
Valores destacados na cor amarelo: mudanças significativas
Valores destacados na cor azul: mudanças aparentemente não significativas

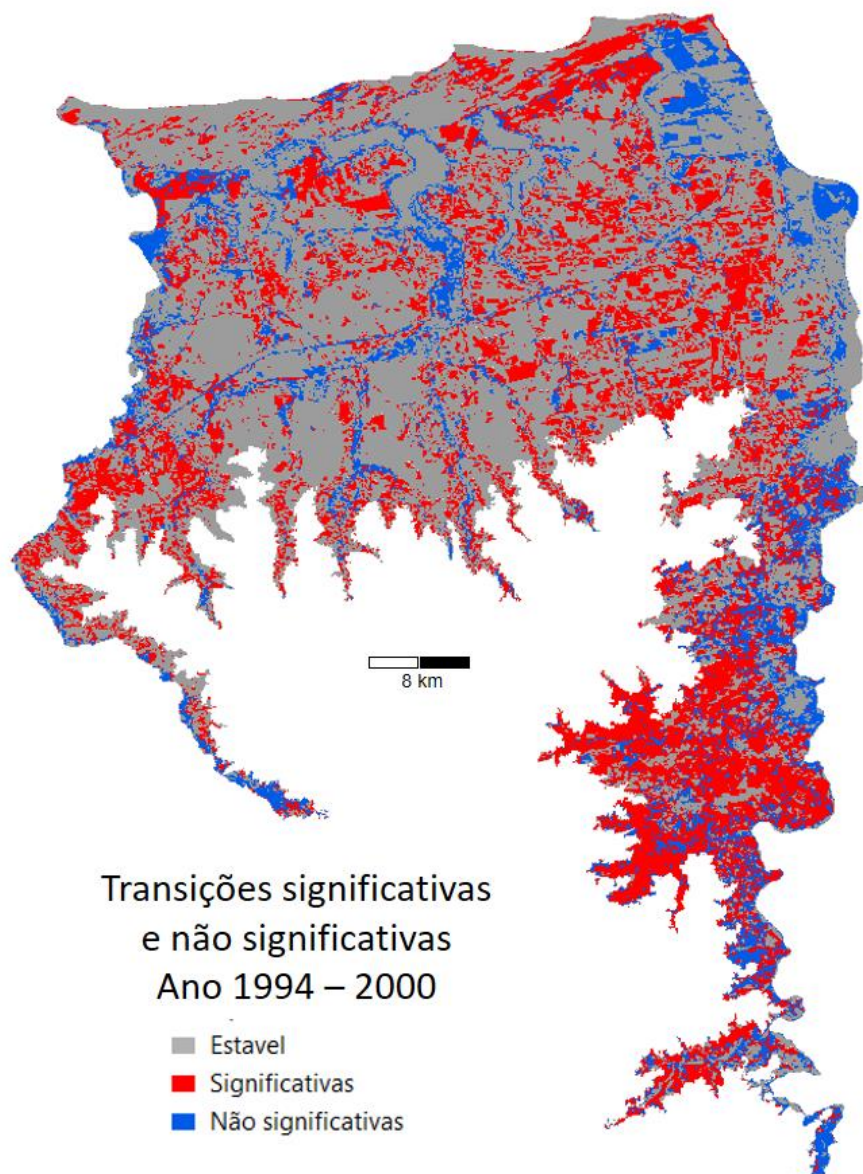
O manguezal perde superfície, sendo substituído por dunas (diferença 0,001 e índice 7,753), com uma diferença baixa e uma magnitude 7 vezes maior do que o estatisticamente esperado, indicando que acontece o avanço do campo de dunas na área do manguezal, promovido pela direção dos ventos, redução das precipitações num período de tempo e o desmonte das dunas. De acordo com relatos dos moradores de Xavier, o maquinário movimentando os sedimentos para a manutenção das torres e da estrada de acesso aos geradores, além de causar o soterramento das lagoas, força a areia ir se deslocando com maior velocidade para o rio, avançando sobre o manguezal. A população também relata o assoreamento da Barra dos Remédios pelo desmonte de dunas que ocorre constantemente na área.

O solo exposto perde superfície sendo substituído por corpos d'água (diferença 0,002 e índice 9,866) indicando o que acontece quando aumentam as precipitações em um período e a lâmina de água cobre as beiras das lagoas costeiras.

Considerando o ganho total por classe com relação às outras observa-se que: quando classes diferentes de cultivos perdem superfícies, esta classe as substitui (diferença 0,189 e índice 0,463). No caso das classes corpos d'água, arbustivo, arbustivo caducifólio, dunas, gramíneas e áreas úmidas, por terem o valor do índice negativo, a substituição destas por outras classes pode ser não significativa.

A Figura 76 apresenta a distribuição das transições em Camocim no período 1994 – 2000, dando como resultado: 39.306,98 ha estáveis, 19.899,11 ha de transições significativas e 9.073,65 ha de transições não significativas, representando 57,49%, 29,23% e 13,27% da superfície total, respectivamente.

Figura 76 - Transições significativas e não significativas no período 1994 – 2000 em Camocim.



Fonte: Elaboração própria.

O período 2000 – 2004 foi o período com maior quantidade de superfície estável, a matriz de transições significativas dos ganhos (tabela 26) mostra que os corpos d'água substituem em uma magnitude de 2 vezes as dunas (diferença de 0,017 e índice de 2,241), isto está relacionado com o aumento da lâmina de água nas áreas de lagoas interdunares.

Tabela 26 - Matriz de transição desde os ganhos entre 2000 – 2004 em Camocim.

	Corpos d'água	Arbustivo	Arbustivo caducifólio	Carcinicultura	Cultivos	Dunas	Gramineas	Manguezal	Solo exposto	Áreas Úmidas	Urbano	Total	Perda
Água	1,403 1,403	0,001 0,190 0,767 -0,996	0,015 0,010 0,041 0,452	0,000 0,001 0,003 -0,409	0,000 0,024 0,096 -0,991	0,001 0,005 0,020 -0,852	0,000 0,004 0,018 -0,918	0,004 0,002 0,008 1,111	0,000 0,001 0,002 -1,000	0,050 0,009 0,037 4,530	0,000 0,002 0,008 -1,000	1,475 10,041 1,017 -0,853	-0,176 0,992 0,100 -0,928
Arbustivo	0,003 0,254 0,067 -0,988	71,655 71,655 -	0,128 0,626 0,166 -0,796	0,000 0,043 0,011 -0,990	1,588 1,456 0,385 0,090	0,003 0,301 0,080 -0,989	0,061 0,271 0,072 -0,777	0,005 0,115 0,030 -0,956	0,002 0,036 0,010 -0,932	0,192 0,555 0,147 -0,654	0,050 0,120 0,032 -0,583	73,687 40,198 4,071 0,833	-1,746 3,970 0,402 -0,488
Arbustivo caducifólio	0,002 0,020 0,017 -0,914	0,115 0,913 0,786 -0,874	2,909 2,909 -	0,000 0,003 0,003 -0,985	0,102 0,115 0,099 -0,111	0,000 0,024 0,020 -1,000	0,276 0,021 0,018 11,971	0,000 0,009 0,008 -1,000	0,002 0,003 0,002 -0,414	0,218 0,044 0,038 3,993	0,030 0,009 0,008 2,176	3,654 10,294 1,042 -0,645	-0,416 1,017 0,103 -0,267
Carcinicultura	0,035 0,002 0,017 17,794	0,005 0,085 0,756 -0,943	0,003 0,005 0,041 -0,250	0,168 0,168 -	0,002 0,011 0,095 -0,800	0,000 0,002 0,020 -1,000	0,003 0,002 0,018 0,550	0,001 0,001 0,007 -0,195	0,005 0,000 0,002 18,999	0,077 0,004 0,036 17,882	0,000 0,001 0,008 -1,000	0,300 9,903 1,003 -0,970	0,019 0,978 0,099 -0,865
Cultivos	0,004 0,038 0,018 -0,884	3,014 1,715 0,833 0,757	0,247 0,093 0,045 1,669	0,000 0,006 0,003 -0,984	7,409 7,409 -	0,000 0,045 0,022 -0,998	0,054 0,040 0,019 0,359	0,000 0,017 0,008 -0,994	0,025 0,005 0,003 3,653	0,474 0,082 0,040 4,774	0,039 0,018 0,009 1,196	11,267 10,908 1,105 0,033	1,800 1,077 0,109 2,582
Dunas	0,007 0,002 0,017 2,241	0,008 0,101 0,769 -0,917	0,003 0,005 0,042 -0,415	0,000 0,000 0,003 -1,000	0,000 0,013 0,097 -1,000	1,828 1,828 -	0,122 0,002 0,018 50,709	0,000 0,001 0,008 -0,581	0,000 0,000 0,002 -0,834	0,114 0,005 0,037 22,551	0,000 0,001 0,008 -1,000	2,083 10,073 1,020 -0,793	0,124 0,995 0,101 -0,744
Gramineas	0,000 0,012 0,017 -0,968	0,038 0,527 0,768 -0,927	0,174 0,028 0,041 5,114	0,000 0,002 0,003 -1,000	0,015 0,066 0,096 -0,778	0,048 0,014 0,020 2,499	1,074 1,074 -	0,000 0,005 0,008 -1,000	0,005 0,002 0,002 1,856	0,153 0,025 0,037 5,045	0,003 0,005 0,008 -0,436	1,510 10,052 1,018 -0,850	-0,251 0,993 0,101 -0,561
Manguezal	0,009 0,000 0,017 22,513	0,002 0,018 0,760 -0,902	0,000 0,001 0,041 -0,839	0,016 0,000 0,003 239,744	0,000 0,002 0,095 -1,000	0,000 0,000 0,020 -1,000	0,000 0,000 0,018 -0,752	0,723 0,723 -	0,000 0,000 0,002 -1,000	0,041 0,001 0,036 46,065	0,000 0,000 0,008 -1,000	0,791 9,950 1,008 -0,921	0,045 0,983 0,099 -0,930
Solo exposto	0,003 0,002 0,017 0,173	0,015 0,098 0,756 -0,849	0,001 0,005 0,041 -0,792	0,000 0,000 0,003 -1,000	0,006 0,012 0,095 -0,540	0,000 0,003 0,020 -1,000	0,014 0,002 0,018 5,026	0,000 0,001 0,007 -1,000	0,107 0,107 -	0,029 0,005 0,036 5,257	0,006 0,001 0,008 5,236	0,180 9,899 1,002 -0,982	-0,056 0,978 0,099 -0,925
Áreas Úmidas	0,185 0,024 0,017 6,785	0,551 1,083 0,783 -0,491	0,582 0,058 0,042 8,968	0,095 0,004 0,003 22,553	0,332 0,136 0,098 1,443	0,079 0,028 0,020 1,820	0,129 0,025 0,018 4,117	0,014 0,011 0,008 0,265	0,081 0,003 0,002 23,027	2,227 2,227 -	0,033 0,011 0,008 1,906	4,308 10,245 1,037 -0,580	0,697 1,012 0,102 1,057
Urbano	0,000 0,003 0,017 -0,961	0,031 0,123 0,760 -0,751	0,007 0,007 0,041 0,098	0,001 0,000 0,003 0,374	0,014 0,015 0,095 -0,100	0,000 0,003 0,020 -1,000	0,027 0,003 0,018 8,333	0,000 0,001 0,008 -1,000	0,009 0,000 0,002 22,040	0,035 0,006 0,036 5,013	0,621 0,621 -	0,745 9,953 1,008 -1,000	-0,038 0,983 0,100 -0,875
Total	1,651	75,434	4,070	0,281	9,468	1,960	1,761	0,746	0,236	3,611	0,783		
Ganho	0,248	3,779	1,161	0,113	2,058	0,131	0,687	0,024	0,129	1,383	0,161		

Valores em Negrito: porcentagem com relação a toda a imagem, **Valores em Itálico:** valor esperado se a mudança fosse pelo azar, **Valores Sublinhados:** é a diferença entre o valor observado e estimado. **Valores simples:** Índice: valor observado menos o estimado dividido pelo estimado

Valores destacados na cor amarelo: mudanças significativas

Valores destacados na cor azul: mudanças aparentemente não significativas

A classe arbustiva tem aumentado por substituir cultivos (diferença de 0,833 e índice de 0,757), mas não substitui o arbustivo caducifólio e o solo exposto (diferença de 0,786, 0,756 e índice de -0,874, -0,849, respectivamente)

O aumento da superfície cultivos vem da substituição do arbustivo (diferença de 0,385 e índice de 0,090), com tudo não substitui de forma significativa os arbustivos caducifólios e gramíneas (diferença 0,099; 0,096 e índice -0,111; -0,778 respectivamente). O aumento da superfície de gramíneas se explica pela substituição significativa dos cultivos (diferença 0,019 e índice 0,359) e do solo exposto (diferença 0,018 e índice 5,026).

Outras mudanças aparentemente não significativas, mas que representam tendências e pequenas variações constatadas no campo, correspondem a: o manguezal aumenta sua superfície de forma significativa nos corpos d'água (diferença 0,008 e índice 1,111). O aumento de superfície do solo exposto, que substitui de forma significativa as áreas de gramíneas (diferença 0,002 e índice 1,856). As áreas úmidas aumentam a superfície substituindo corpos d'água (diferença 0,037 e índice 4,530) e solo exposto (diferença 0,036 e índice 5,257). Estes casos são mudanças que têm um caráter sazonal, porém são temporárias, pelo que podem ser categorizadas como intercâmbio.

Considerando a perda total de uma classe com relação às outras menciona-se que: quando classes diferentes de cultivos ganham superfícies de forma significativa, substituem os cultivos (diferença 0,109 e índice 2,582), se outras classes diferentes das áreas úmidas ganham de forma significativa, estas as substituem (diferença 0,102 e índice 1,057). O restante das classes que aumentaram sua superfície de forma significativa, por terem índices negativos, não substituíram o solo exposto, gramíneas, arbustivo caducifólio, arbustivo e corpos d'água.

Os resultados da matriz de transição das perdas, são mostrados na tabela 27. Quando os corpos d'água perdem superfície, são substituídos de forma significativa pelas dunas (diferença 0,003 e índice 9,856) e/ou áreas úmidas (diferença 0,021 e índice 3,199). Quando o arbustivo perde superfície, é substituído pelos cultivos (diferença 0,147 e índice 4,328) e dunas (diferença 0,010 e índice 2,386).

Tabela 27 - Matriz de transição desde as perdas entre 2000 – 2004 em Camocim.

	Corpos d'água	Arbustivo	Arbustivo caducifólio	Carcinicultura	Cultivos	Dunas	Gramineas	Manguezal	Solo exposto	Áreas Úmidas	Urbano	Total
Agua	1,403 <i>1,403</i>	0,001 <i>0,042</i> <u>0,021</u> -0,929	0,015 <i>0,006</i> <u>0,008</u> -0,693	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 198,143	0,000 <i>0,151</i> <u>0,039</u> -0,971	0,001 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 9,856	0,000 <i>0,002</i> <u>0,004</u> -0,810	0,004 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 195,532	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 44,923	0,050 <i>0,044</i> <u>0,021</u> 3,199	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -0,322	1,475
Arbustivo	0,003 <i>0,000</i> <u>0,003</u> 2,484	71,655 <i>71,655</i> -	0,128 <i>0,021</i> <u>0,028</u> 4,447	0,000 <i>0,001</i> <u>0,005</u> 6,371	1,588 <i>0,566</i> <u>0,147</u> 4,328	0,003 <i>0,002</i> <u>0,010</u> 2,386	0,061 <i>0,007</i> <u>0,017</u> 4,311	0,005 <i>0,000</i> <u>0,003</u> 9,026	0,002 <i>0,000</i> <u>0,003</u> 71,053	0,192 <i>0,165</i> <u>0,079</u> 2,347	0,050 <i>0,001</i> <u>0,005</u> 51,870	73,687
Arbustivo caducifólio	0,002 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 278,634	0,115 <i>0,043</i> <u>0,021</u> 1,975	2,909 <i>2,909</i> -	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 18,155	0,102 <i>0,155</i> <u>0,040</u> 0,599	0,000 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 3,727	0,276 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 87,329	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 2,239	0,002 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 18,647	0,218 <i>0,045</i> <u>0,022</u> 11,960	0,030 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 45,077	3,654
Carcinicultura	0,035 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 7,123	0,005 <i>0,041</i> <u>0,020</u> -0,990	0,003 <i>0,006</i> <u>0,007</u> -0,991	0,168 <i>0,168</i> -	0,002 <i>0,149</i> <u>0,039</u> -0,999	0,000 <i>0,001</i> <u>0,003</u> -1,000	0,003 <i>0,002</i> <u>0,004</u> -1,000	0,001 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 345,357	0,005 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,077 <i>0,043</i> <u>0,021</u> 1,187	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 3,116	0,300
Cultivos	0,004 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 2,615	3,014 <i>0,047</i> <u>0,023</u> 33,112	0,247 <i>0,006</i> <u>0,008</u> 15,294	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 9,959	7,409 <i>7,409</i> -	0,000 <i>0,001</i> <u>0,003</u> -1,000	0,054 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 5,875	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,025 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 92,056	0,474 <i>0,049</i> <u>0,023</u> 5,804	0,039 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 79,903	11,267
Dunas	0,007 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 12,960	0,008 <i>0,042</i> <u>0,021</u> -0,923	0,003 <i>0,006</i> <u>0,008</u> -1,000	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,000 <i>0,152</i> <u>0,039</u> -0,999	1,828 <i>1,828</i> -	0,122 <i>0,002</i> <u>0,004</u> 23,730	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,114 <i>0,044</i> <u>0,021</u> 0,794	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	2,083
Gramineas	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 6,021	0,038 <i>0,042</i> <u>0,021</u> 0,443	0,174 <i>0,006</i> <u>0,008</u> 48,074	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 16,504	0,015 <i>0,151</i> <u>0,039</u> -0,640	0,048 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 183,646	1,074 <i>1,074</i> -	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 1,207	0,005 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 250,528	0,153 <i>0,044</i> <u>0,021</u> 1,942	0,003 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 172,160	1,510
Mangue	0,009 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 75,785	0,002 <i>0,042</i> <u>0,020</u> -0,878	0,000 <i>0,006</i> <u>0,008</u> -1,000	0,016 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 2,885	0,000 <i>0,150</i> <u>0,039</u> -0,999	0,000 <i>0,001</i> <u>0,003</u> -0,362	0,000 <i>0,002</i> <u>0,004</u> -1,000	0,723 <i>0,723</i> -	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,041 <i>0,044</i> <u>0,021</u> -0,689	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,791
Solo exposto	0,003 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,015 <i>0,041</i> <u>0,020</u> -0,941	0,001 <i>0,006</i> <u>0,007</u> -0,699	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 29,670	0,006 <i>0,149</i> <u>0,039</u> -0,833	0,000 <i>0,001</i> <u>0,003</u> -0,920	0,014 <i>0,002</i> <u>0,004</u> 1,477	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,107 <i>0,107</i> -	0,029 <i>0,043</i> <u>0,021</u> 0,876	0,006 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 57,041	0,180
Áreas Úmidas	0,185 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 862,019	0,551 <i>0,047</i> <u>0,023</u> 3,089	0,582 <i>0,006</i> <u>0,008</u> 33,610	0,095 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 389,730	0,332 <i>0,169</i> <u>0,044</u> 1,802	0,079 <i>0,001</i> <u>0,003</u> 153,079	0,129 <i>0,002</i> <u>0,005</u> 69,754	0,014 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 767,222	0,081 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 477,529	2,227 <i>2,227</i> -	0,033 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 203,371	4,308
Urbano	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,031 <i>0,042</i> <u>0,020</u> 0,205	0,007 <i>0,006</i> <u>0,008</u> 4,383	0,001 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,014 <i>0,150</i> <u>0,039</u> -0,739	0,000 <i>0,001</i> <u>0,003</u> -1,000	0,027 <i>0,002</i> <u>0,004</u> 0,615	0,000 <i>0,000</i> <u>0,001</u> -1,000	0,009 <i>0,000</i> <u>0,001</u> 115,621	0,035 <i>0,044</i> <u>0,021</u> -0,252	0,621 <i>0,621</i> -	0,745
Total	1,651 10,023 1,015 -0,835	75,434 37,530 3,800 1,010	4,070 10,250 1,038 -0,603	0,281 9,905 1,003 -0,972	9,468 11,129 1,127 -0,149	1,960 10,085 1,021 -0,806	1,761 10,027 1,015 -0,824	0,746 9,954 1,008 -0,925	0,236 9,893 1,002 -0,976	3,611 11,222 1,136 -0,678	0,783 9,949 1,008 -0,921	
Ganho	0,248 0,990 0,100 -0,749	3,779 3,706 0,375 0,020	1,161 1,012 0,102 0,147	0,113 0,978 0,099 -0,885	2,058 1,099 0,111 0,873	0,131 0,996 0,101 -0,868	0,687 0,990 0,100 -0,307	0,024 0,983 0,100 -0,976	0,129 0,977 0,099 -0,868	1,383 1,108 0,112 0,248	0,161 0,983 0,099 -0,836	

Valores em Negrito: porcentagem com relação a toda a imagem, **Valores em Itálico:** valor esperado se a mudança fosse pelo azar, **Valores Sublinhados:** é a diferença entre o valor observado e estimado. **Valores simples:** Índice: valor observado menos o estimado dividido pelo estimado

Valores destacados na cor amarelo: mudanças significativas

Valores destacados na cor azul: mudanças aparentemente não significativas

Quando a superfície de carcinicultura se reduz é substituída por áreas úmidas (diferença 0,021 e índice 1,187). Esta transição não é comum de acontecer, mas foi observado no processo de classificação e posterior verificação em campo, uma redução das áreas dedicadas a carcinicultura no manguezal do Rio Coreaú entre os anos 2000 e 2004.

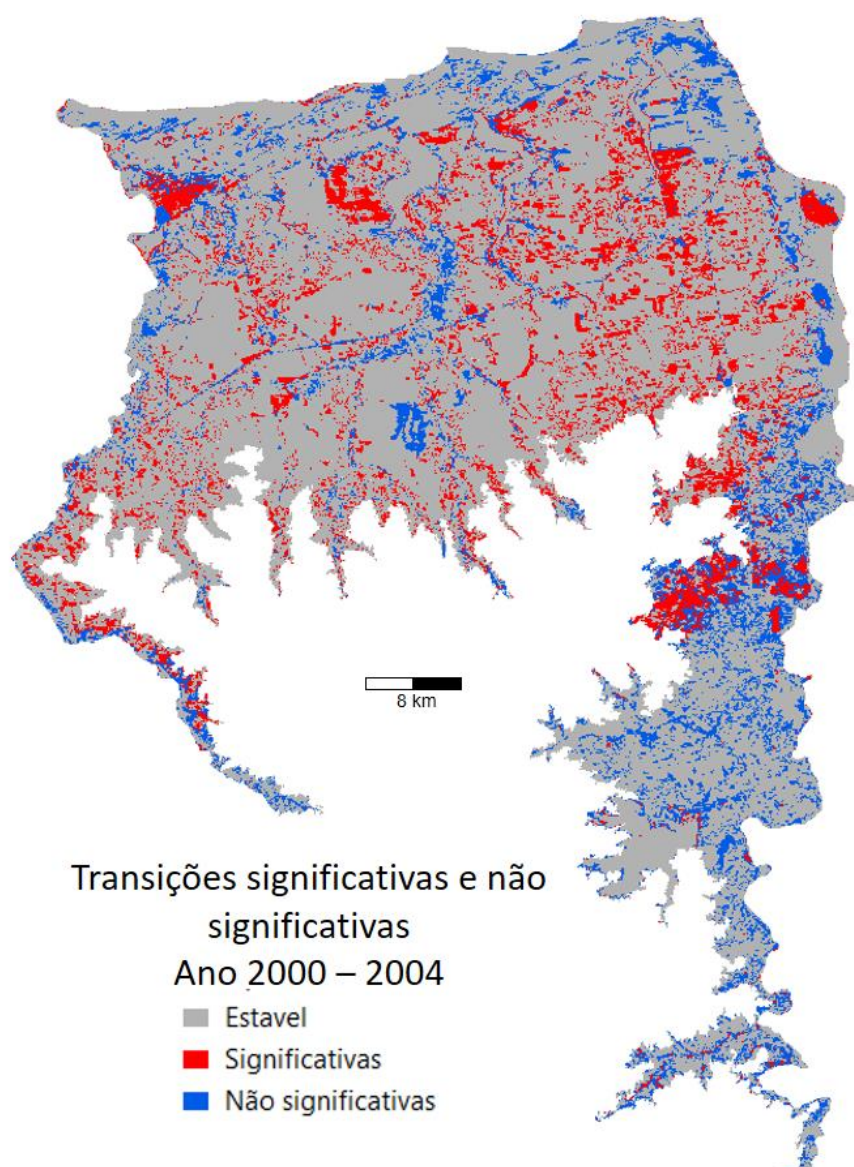
Quando as dunas perdem superfície, são substituídas de forma significativa pelas áreas úmidas (diferença 0,021 e índice 0,794), mas quando manguezal perde superfície não é substituída por áreas úmidas (diferença 0,021 e índice -0,689).

A classe urbana, sendo substituída de forma significativa por arbustivo caducifólio, não é real, sendo atribuído a um erro na classificação.

Considerando o ganho total de uma classe em relação as outras menciona-se que: quando classes diferentes de arbustivo perdem superfícies, esta classe as substitui (diferença 0,375 e índice 0,020). Quando são diferentes do arbustivo caducifólio, são substituídas por esta classe (diferença 0,102 e índice 0,147). Se as classes que predem são diferentes de cultivos, são substituídas por esta (diferença 0,111 e índice 0,873). Quando classes diferentes de áreas úmidas perdem superfície, esta classe a substitui (diferença 0,112 e índice 0,248). Quando as dunas perdem superfície, não são substituídas pelo arbustivo, arbustivo caducifólio, cultivos ou áreas úmidas.

A Figura 77 apresenta a distribuição das transições em Camocim no período 2000 – 2004, dando como resultado: 51.847,74 ha estáveis, 8.531,04 ha de transições significativas e 7990,97 ha de transições não significativas, representando 75,83%, 12,47% e 11,68% da superfície total, respectivamente.

Figura 77 - Transições significativas e não significativas no período 2000 – 2004 em Camocim.



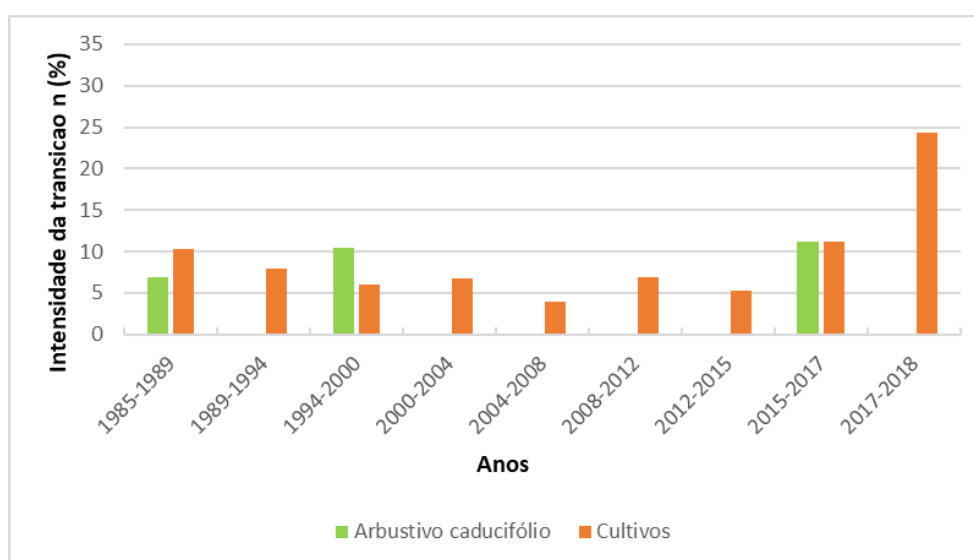
Fonte: Elaboração própria.

Aplicando o método de Aldwaik e Pontius (2012) foi possível conhecer quais classes avançam para as transições de forma preferencial e quais classes evitam a transição em Camocim durante cada um dos intervalos de tempo estudados entre 1985 e 2018.

Foi aplicado o mesmo esquema aplicado na área de Aracati com relação a escolha das classes de acordo com a intensidade de transição e apresentadas as transições que foram consideradas as mais interessantes em Camocim.

As fontes de transição para áreas arbustivas (Figura 78) em relação aos ganhos, foram cultivos como principal fonte, seguida por arbustivo caducifólio que mostrou uma transição preferencial apenas em alguns intervalos de tempo: 1985 – 1989, 1994 – 2000 e 2015 – 2017, evitando a transição nos outros intervalos de tempo. A classe cultivos se comporta de uma forma estacionaria, já que avança para todos os intervalos de estudo, mesmo com algumas variações de intensidades, sendo a menor e maior intensidade com 3,97 % e 24,33% correspondentes aos intervalos de tempo 2000 – 2008 e 2017 – 2018, respectivamente.

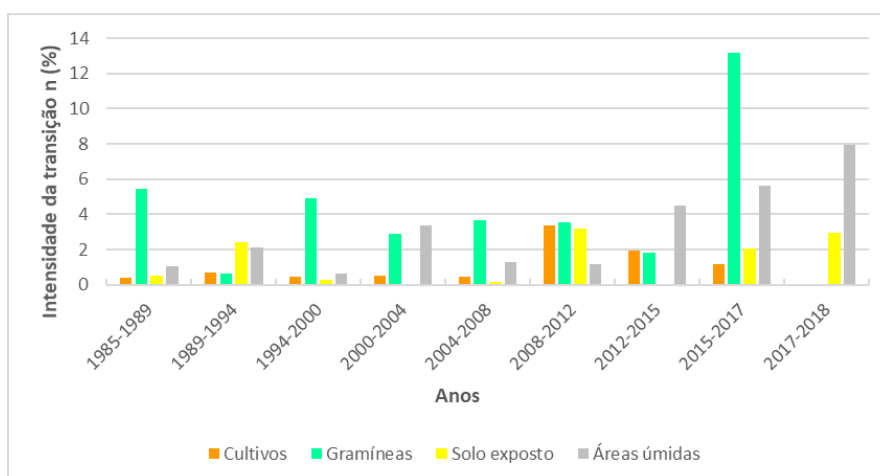
Figura 78. - Intensidade de mudança da classe arbustivo baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.



Fonte: Elaboração própria.

A fonte de transição para o arbustivo caducifólio (Figura 79) que mostrou uma transição preferencial em todos os intervalos, foi a área úmida, que apresentou um comportamento estacionário, mesmo com algumas variações da intensidade, sendo a menor e maior intensidades com 0.62 % e 7.94 % correspondentes aos intervalos de tempo 1994 – 2000 e 2017 – 2018, respectivamente. Em outras fontes de transição preferencial tais como gramíneas, solo exposto e cultivos, houve avanço em alguns intervalos de tempo, mas evitaram a transição em poucos intervalos de tempo.

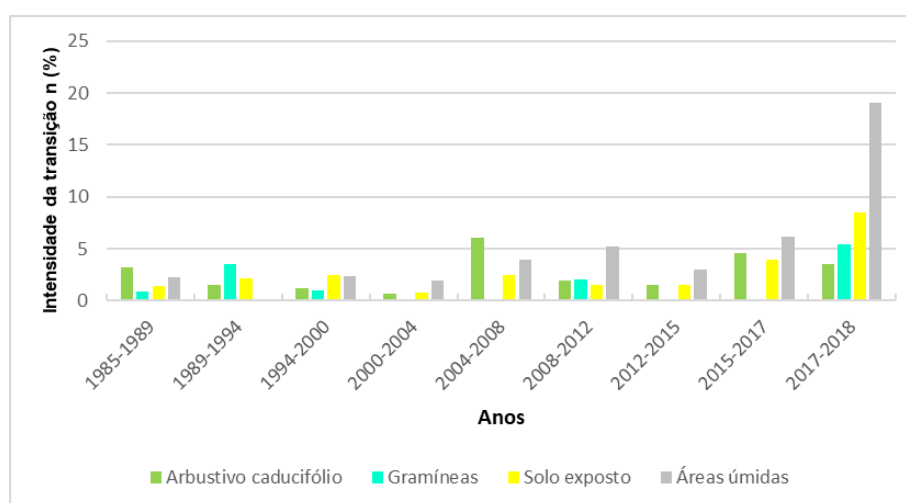
Figura 79. - Intensidade de mudança da classe arbustivo caducifólio baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.



Fonte: Elaboração própria.

As áreas de cultivos tiveram como fontes de transição preferencial, em todos os intervalos os solos expostos e arbustivo caducifólio (Figura 80), que apresentaram um comportamento estacionário, mesmo com algumas variações da intensidade, sendo os valores de menor correspondentes ao intervalo de tempo 2000 – 2004 para ambas classes. Os valores de maior intensidade correspondem a 6.01% para o arbustivo caducifólio entre 2004 – 2008 e 8.46% para solo exposto entre 2017 – 2018.

Figura 80. - Intensidade de mudança da classe cultivos baseados nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.



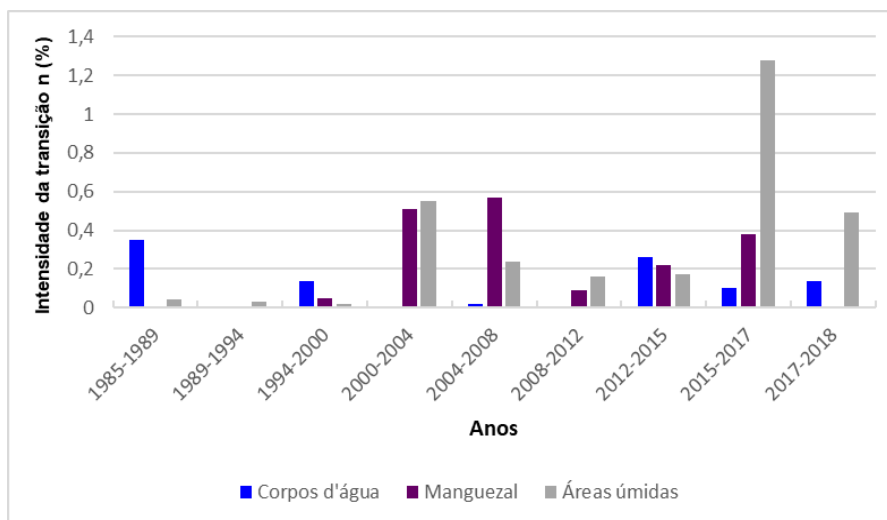
Fonte: Elaboração própria.

Outra fonte de transição preferencial onde houve avanço em quase todos os intervalos de tempo e evitando a transição foram as áreas úmidas entre 1989 – 1994. As gramíneas apresentaram cinco períodos de transição preferencial, evitando a transição entre os anos 2000 – 2008 e 2012 – 2015.

Sobre as fontes de transição das classes arbustivo, arbustivo caducifólio e cultivos, observou-se que existe uma dinâmica de ganhos e perdas entre as mudanças entre estas classes, onde dependendo do intervalo do tempo e da ação de fenômenos como a seca por exemplo, outras classes como gramíneas, solo exposto e áreas úmidas avançam ou evitam a expansão sobre as três primeiras classes. Entre a classe arbustivo e cultivos existe uma relação inversamente proporcional: quando a área arbustiva aumenta, as áreas de cultivo se reduzem e vice-versa, sendo visível na maioria dos intervalos de tempos, com exceção dos anos 1989 – 1994, onde ambas classes parecem ganhar e perder de uma forma mais equilibrada.

A expansão da carcinicultura nas planícies fluviomarinhas dos rios Coreaú e Tapuio, teve como fonte de transição preferencial, em todos os intervalos, a área úmida (Figura 81), que apresentou um comportamento estacionário, mesmo com algumas variações da intensidade, sendo a menor e maior intensidade de 0.02 % e 1.28 %, correspondentes aos intervalos de tempo 1994 – 2000 e 2015 – 2017, respectivamente. Outras fontes de transição preferencial foram os corpos d'água e manguezal, onde houve avanço em alguns intervalos de tempo e evitando a transição em poucos intervalos de tempo. Neste ponto destaca a maior intensidade de transição de áreas de manguezal para a prática da carcinicultura entre os anos 2000 – 2008, que coincide com um dos períodos de maior crescimento desta atividade na área de estudo.

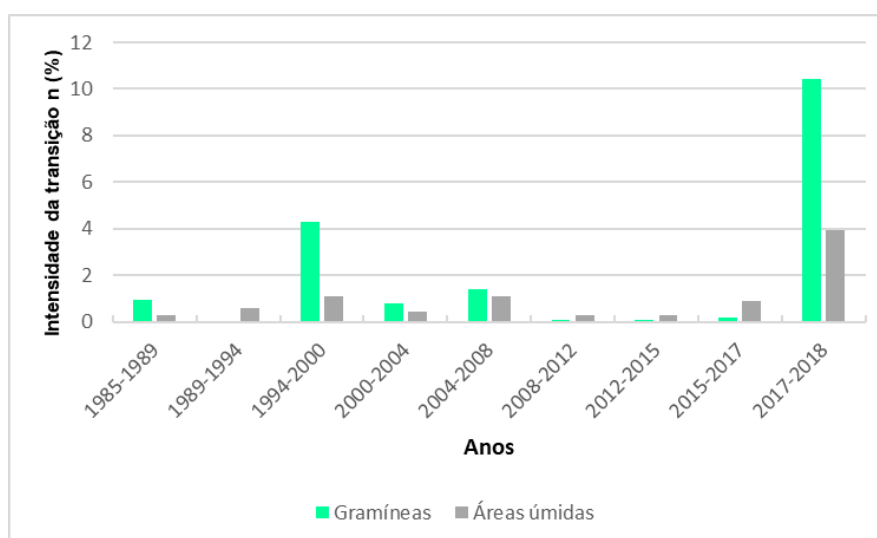
Figura 81. - Intensidade de mudança da carcinicultura baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.



Fonte: Elaboração própria.

As áreas de dunas tiveram como fonte de transição preferencial, em todos os intervalos, as áreas úmidas (Figura 82), que apresentou um comportamento estacionário, mesmo com algumas variações da intensidade, sendo os valores de menor intensidade de 0,07% entre 2008 – 2015 e 3,96% entre 2017 – 2018. Outra fonte de transição preferencial com avanço em quase todos os intervalos de tempo foi a classe gramíneas, que evitaram a transição entre 1989 – 1994.

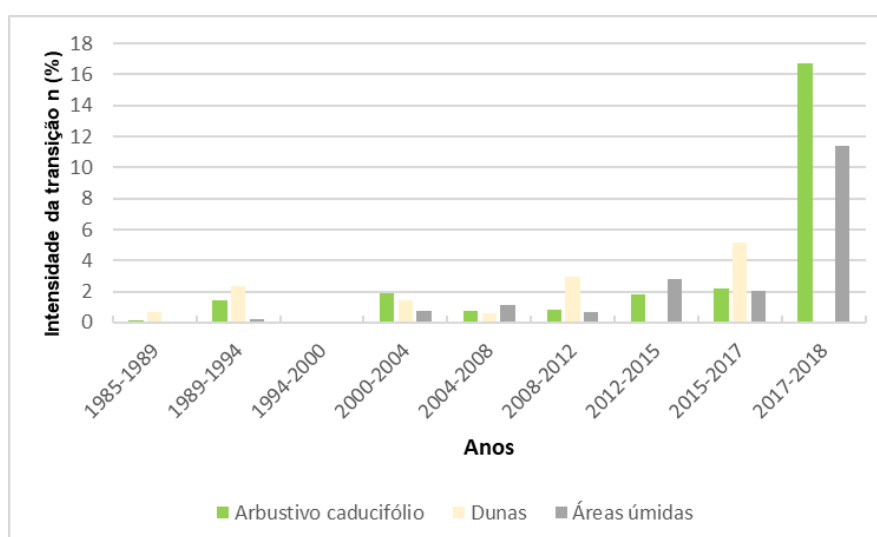
Figura 82 - Intensidade de mudança das dunas baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.



Fonte: Elaboração própria.

As áreas de gramíneas tiveram como fonte de transição preferencial em todos os intervalos, as áreas úmidas (Figura 83), que apresentaram um comportamento estacionário, mesmo com algumas variações da intensidade, sendo os valores de menor intensidade 0.09% entre 1985 – 1989 e 1994 – 2000 e os valores de maior intensidade 11.38% entre 2017 – 2018. Outras fontes de transição preferencial que avançaram em quase todos os intervalos de tempo foram: as gramíneas, que evitaram a transição entre 1989 – 1994 e as dunas que evitaram a transição nos anos 1994 – 2000, 2012 – 2015 e 2017 - 2018.

Figura 83 - Intensidade de mudança das gramíneas baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.



Fonte: Elaboração própria.

As proporções de transições das áreas úmidas e gramíneas para dunas são, na maior parte dos intervalos de tempo, inferiores a 4.28%, com exceção das gramíneas com 16.74% para os anos 2017 – 2018. As proporções de transições das dunas, áreas úmidas e arbustivo caducifólio para gramíneas, são inferiores a 5.16%, com exceção dos anos 2017 – 2018. Estes processos transicionais mostram também as dinâmicas de intercâmbio entre dunas, gramíneas e áreas úmidas, sendo estas últimas estacionárias, sempre presentes em uma proporção variável com relação às gramíneas e às dunas.

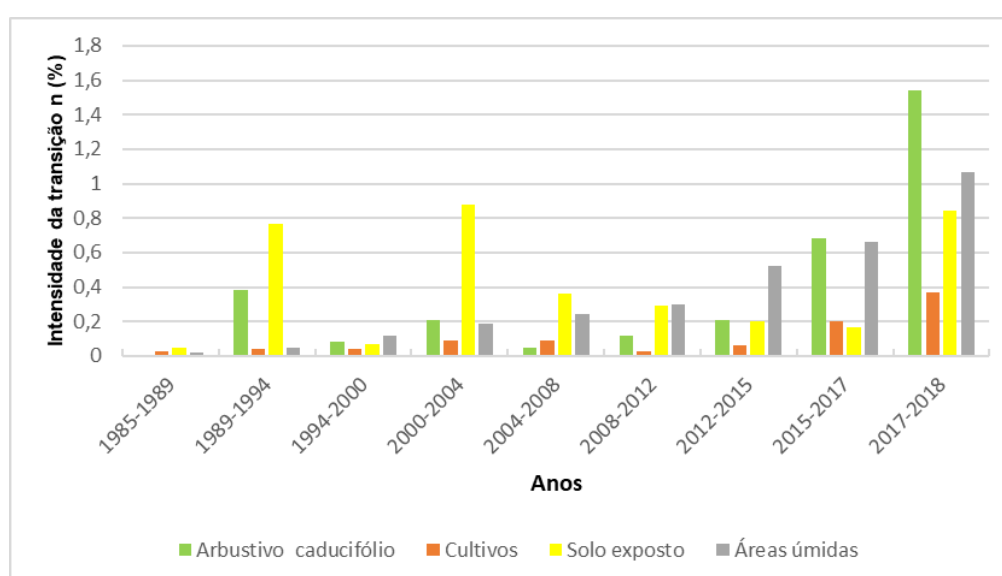
Uma relação que ficou demonstrada nestas transições foi que quando na transição de gramíneas para dunas, a proporção das gramíneas é maior, a proporção de dunas para gramíneas é menor; um exemplo encontrou-se nos anos

2015-2017, enquanto a transição das dunas sobre as gramíneas era de 5.16% a transição das gramíneas sobre as dunas foi de 0.18%.

Este período de tempo (2015 – 2017) corresponde com um período de seca, que pela redução das precipitações, favorece o avanço das dunas sobre áreas úmidas que em muitos casos estão vinculadas com gramíneas. Um exemplo contrário foi o período 2004 – 2008, enquanto a transição das dunas sobre as gramíneas era de 0.63%, a transição das gramíneas sobre as dunas foi de 1.41%. Este período corresponde com um período onde as precipitações ocorridas foram superiores à média, o que reduz o movimento das dunas, favorecendo o aumento da proporção de áreas úmidas e gramíneas por conta da maior presença de água.

Na transição para terras urbanas, os solos expostos foram a principal fonte, seguida pelo arbustivo caducifólio, áreas úmidas e cultivos. De acordo com a Figura 84, a intensidade de transição apresentou um comportamento estacionário, mesmo com algumas variações da intensidade, nas áreas de solo exposto, áreas úmidas e cultivos. Outra fonte de transição preferencial que avançou em quase todos os intervalos de tempo foi o arbustivo caducifólio, que evitou a transição entre 1985 – 1989. A expansão das terras urbanas sobre áreas úmidas aumentou gradativamente passando de 0.02% a 1.07% entre 1985 e 2018.

Figura 84. - Intensidade de mudança das terras urbanas baseado nos ganhos ao nível de transição entre 1985 e 2018.



Fonte: Elaboração própria

As proporções das transições do solo exposto alcançaram a maior intensidade de 0.88 % entre 2000 e 2004, seguidas de arbustivo caducifólio de 1.54 % e as áreas úmidas de 1.07% entre os anos 2017 – 2018.

Logo da análise de resultados para cada uma das áreas de estudo com relação as transições significativas, é importante retomar o relatado por Lu et al. (2004), Chuvieco (2010), Tewkesbury (2015) com relação ao método de detecção de mudanças: comparação pós classificação, uma das desvantagens deste método é que gera um erro de propagação multiplicativo, como a precisão da detecção de mudanças é dependente de classificações individuais, os erros de classificação de cada data estabelecem uma maior probabilidade de erro no mapa de mudanças.

A probabilidade de algumas áreas classificadas não corresponder a classe correta, faz parte do processo de classificação, mesmo que o tente se reduzir o mais possível as fontes de erros para gerar um produto de alta exatidão. Esses erros fazem parte daquele ruído que é permanece no produto final.

De forma geral, em ambas áreas de estudo, pode-se afirmar que as metodologias de Pontius et al. (2004), Aldwaik e Pontius (2012), Pontius e Santacruz (2014), permitiram mascarar os erros de propagação resultantes do processo de pós-classificação. Isto foi observado quando foram identificadas transições entre classes de uso e cobertura sem sentido que foram qualificadas como erros de classificação, aspecto que indicou a probabilidade de que em algumas áreas onde a transição foi lógica, os erros ficaram mascarados.

Se pensar nos níveis de aproximação do método, A hipótese estacionaria, por exemplo a nível de categoria, indica que as mudanças são proporcionais ao nível da categoria, o que permite inferir que o erro pode se comportar da mesma forma. Então o método identifica as intensidades de mudanças apesar do erro, entendendo-se que a hipótese do erro estacionário é mais o menos o mesmo e é independente da data de análise. Neste sentido, o método de transições significativas tem a vantagem de não ser tão afetado pelo erro dos produtos resultantes da classificação supervisionada.

As áreas de dunas em ambas áreas de estudo, mantiveram sua morfodinâmica característica, salvo algumas modificações produto da instalação dos parques eólicos.

4.2.2.2 *Análise de mistura espectral*

Na determinação de mudanças sobre o campo de dunas móveis utilizando imagens ópticas, as considerações do ponto de vista espectral foram as mesmas do que na área de estudo em Aracati. Os aerogeradores ficam camuflados no contexto das dunas e as estradas de acesso e base de cada aerogerador, por causa do movimento constante das dunas acaba cobrindo secções das estradas, diminuindo o contraste espacial causando dificuldades na identificação. Por isso a Análise de Mistura Espectral em Camocim, também foi útil para determinar o deslocamento das dunas móveis.

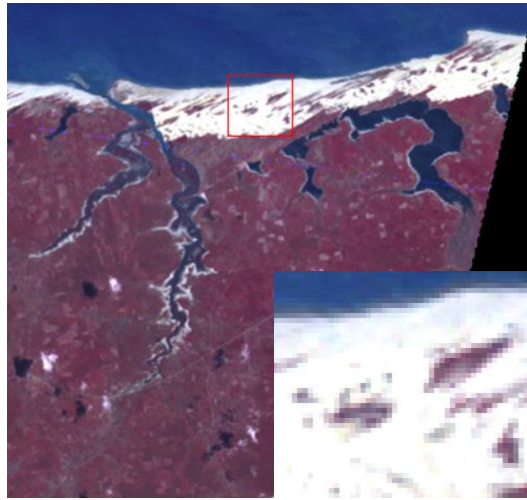
O campo de dunas móveis em Camocim apresenta-se como um lugar onde predominam as dunas barcanóides, lagoas e brejos interdunares, além de lagoas costeiras, um conjunto de elementos que contribuem na discriminação visual das dunas e padrões de movimento. Um exemplo disso é a percepção mais clara das marcas espaço temporais que indicam o movimento das dunas de maior tamanho.

As feições no campo de dunas móveis, destacadas nas Figuras 85 e 86, possuem uma extensão e uma configuração espacial que permite sua discriminação na série temporal, apesar das diferenças em termos de resolução espacial, espectral e radiométrica.

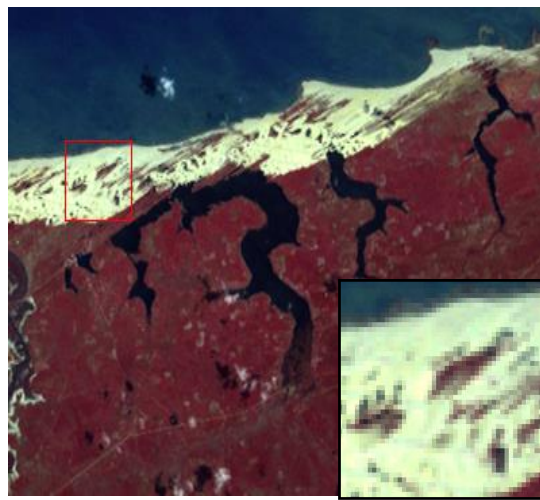
Como foi constatado em Aracati, algumas lagoas conservam uma lâmina de água, mesmo em alguns anos considerados de seca. Mas a partir do ano 2011, embora tenham sido registradas chuvas em torno da média no Ceará, a distribuição da precipitação em Camocim não foi favorável para recarga.

Até o ano 2016 foi observado o impacto da série de 5 anos secos seguintes a 2011, já que as lagoas interdunares, apresentavam pouca ou nenhuma lâmina de água. Verifica-se também a redução expressiva das lagoas costeiras. Com as chuvas do ano 2017, as lagoas voltaram a possuir uma reduzida lâmina de água, com uma leve recuperação em 2018.

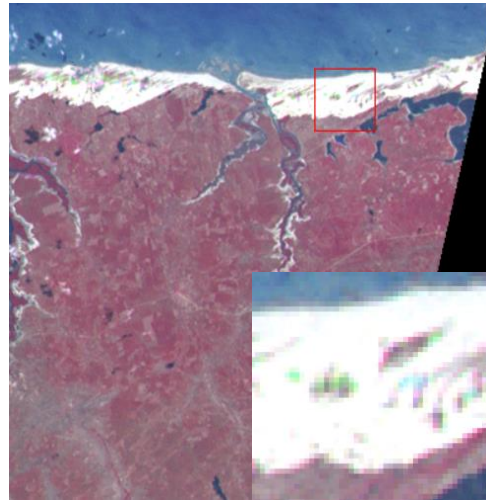
Merece destaque o fato de que a não existência de lâmina de água em alguns anos, não significa a falta de água nos brejos interdunares. A área úmida permanece com cobertura de herbáceas, porém nos casos onde não existe lâmina de água, predomina a resposta espectral da vegetação.



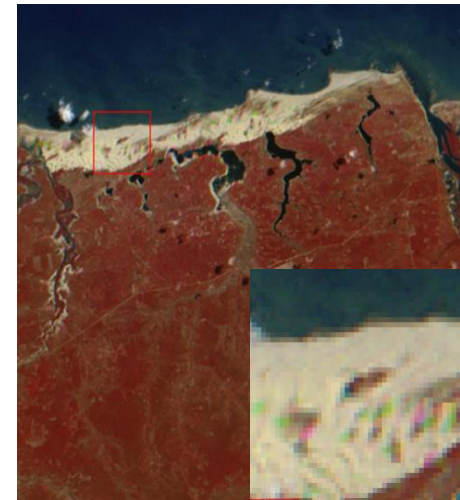
09-09-1972. LM1. Sensor MSS



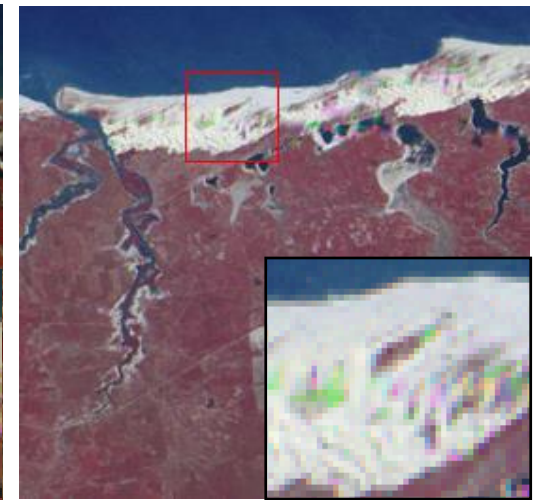
10-09-1973. LM1. Sensor MSS



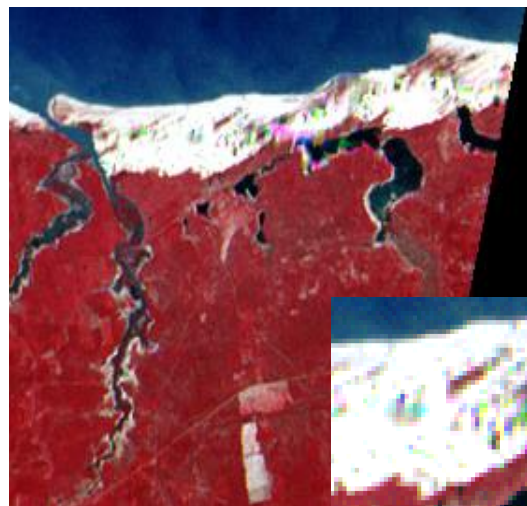
14-09-1978. LM1. Sensor MSS



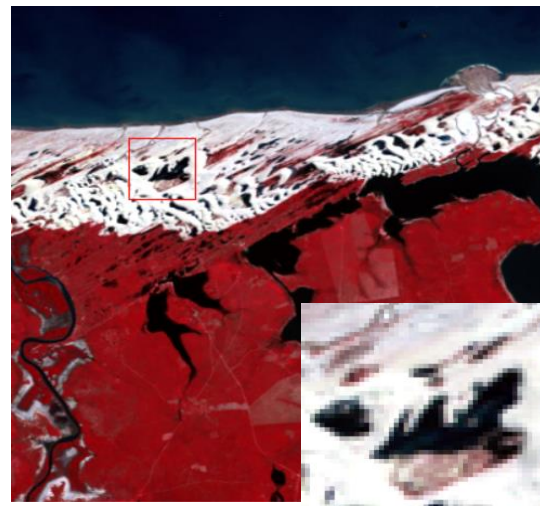
06-08-1980. LM1. Sensor MSS



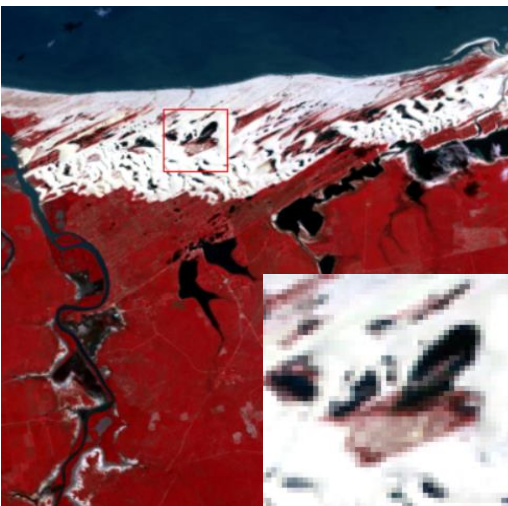
02-08-1981. LM2. Sensor MSS



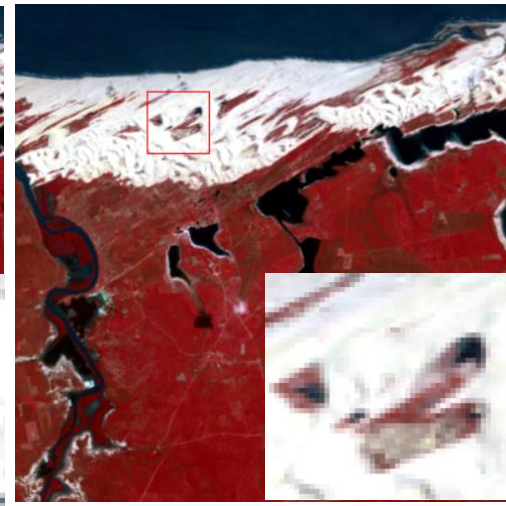
26-05-1982. LM3. Sensor MSS



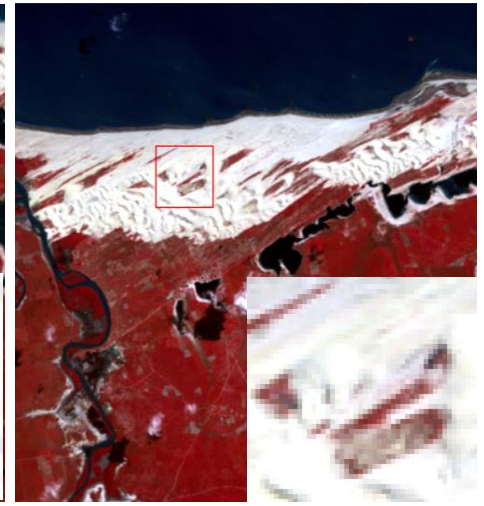
27-07-1985. LM5. Sensor TM



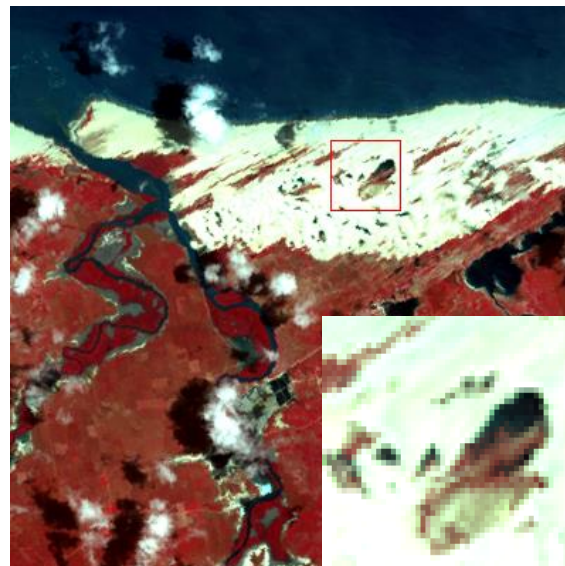
23-08-1989. LM5. Sensor TM



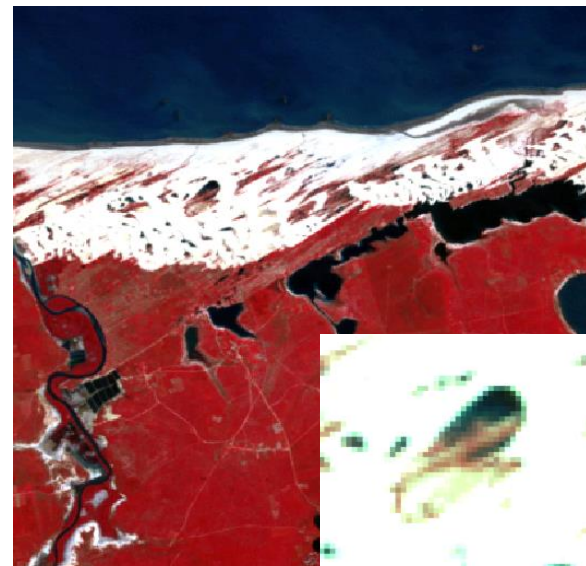
31-08-1992. LM5. Sensor TM



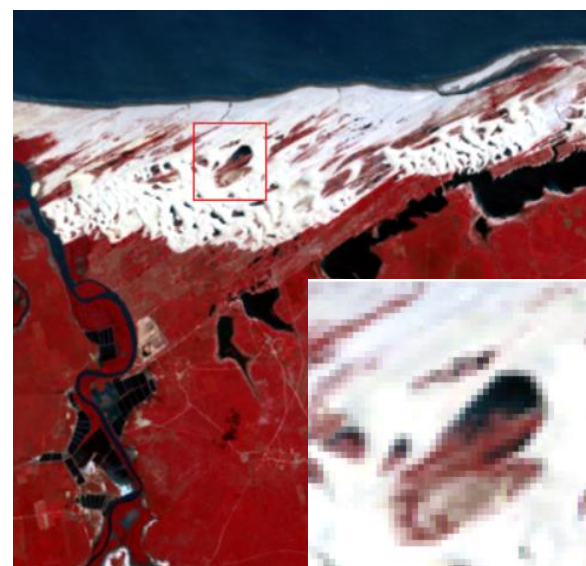
31-08-1993. LM5. Sensor TM



30-09-2000. LT7. Sensor ETM+

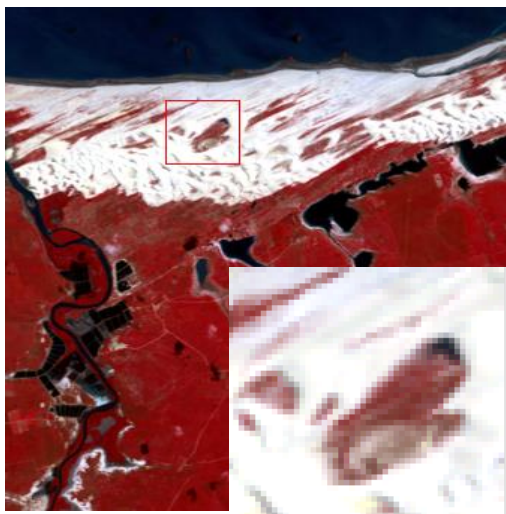


16-08-2001. LT7. Sensor ETM+

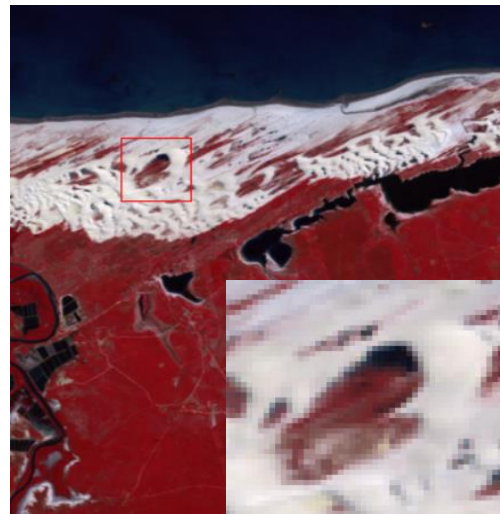


01-09-2004. LT5. Sensor TM

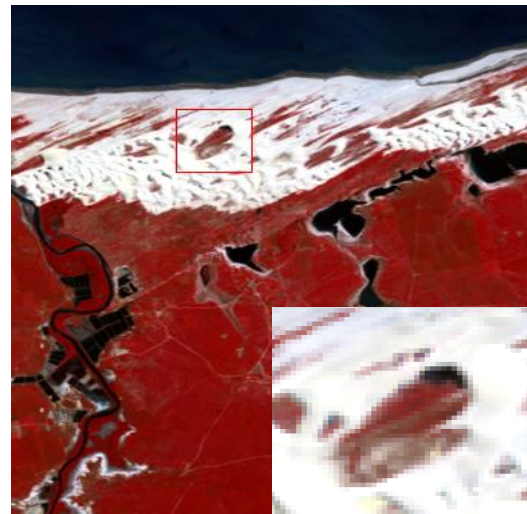
Figura 85 - Serie Temporal de Imagens Landsat em Camocim, com ênfase no campo de dunas móveis e lagoas interduais entre 1972 – 2004.
Fonte: USGS (2018), INPE (2017)



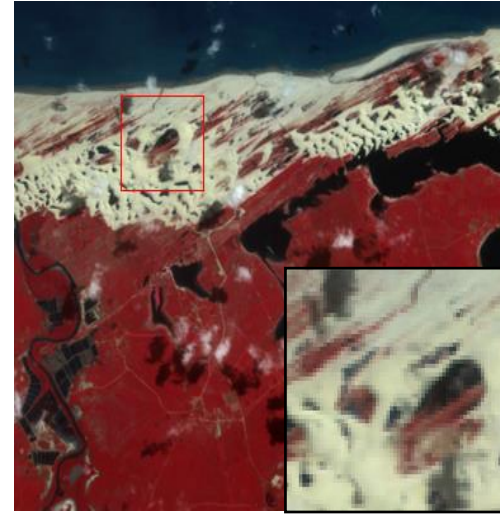
19-08-2005. LT5. Sensor TM



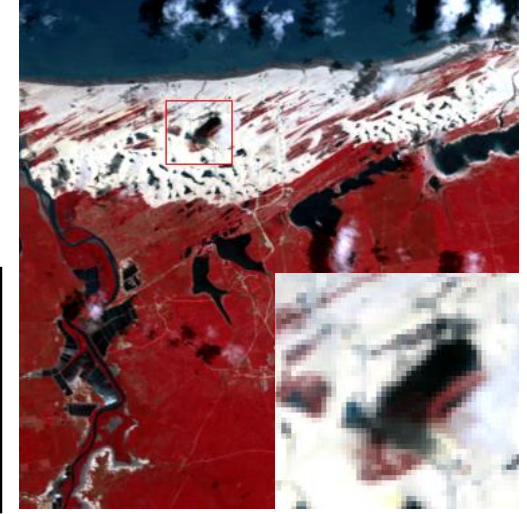
06-08-2006. LT5. Sensor TM



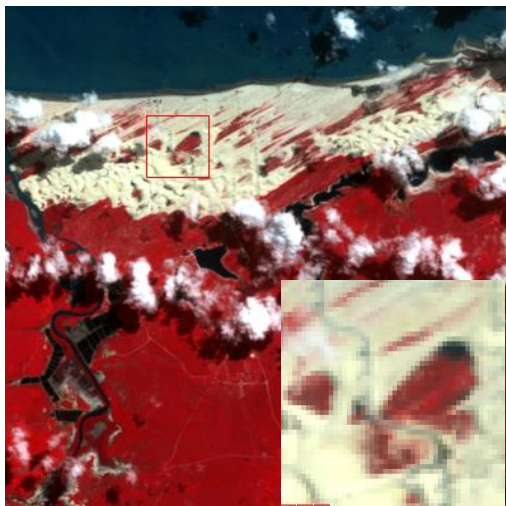
09-08-2007. LT5. Sensor TM



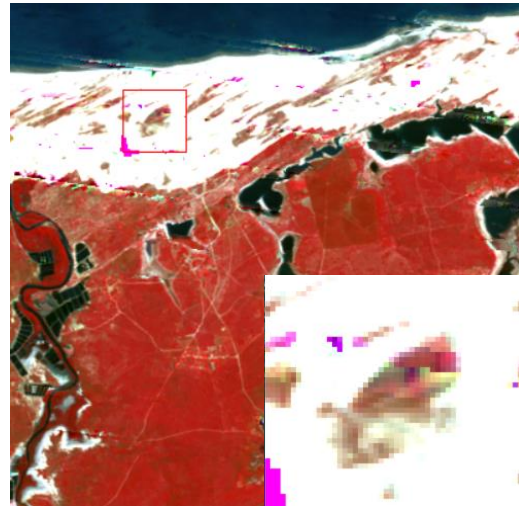
11-08-2008. LT5. Sensor TM



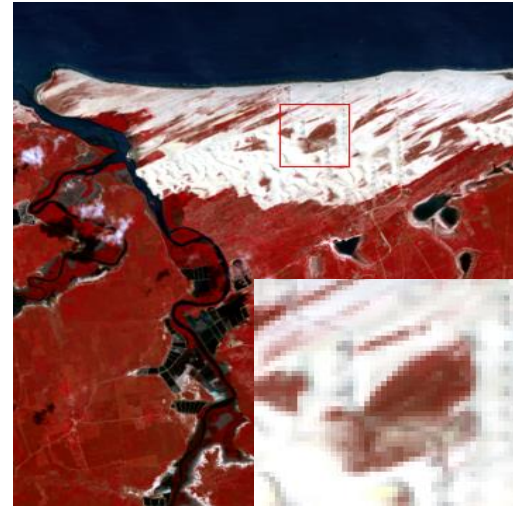
01-02-2009. LT5. Sensor TM



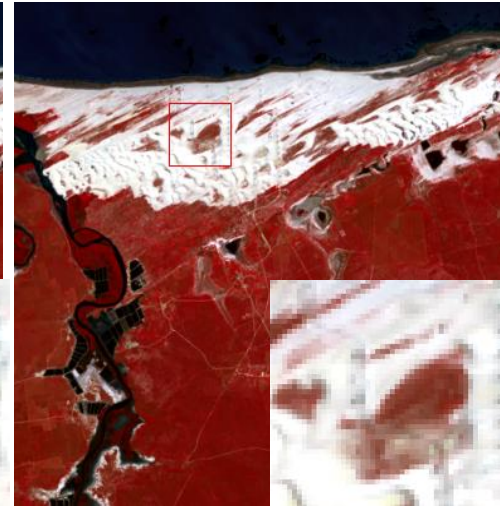
29-05-2010. LT5. Sensor TM



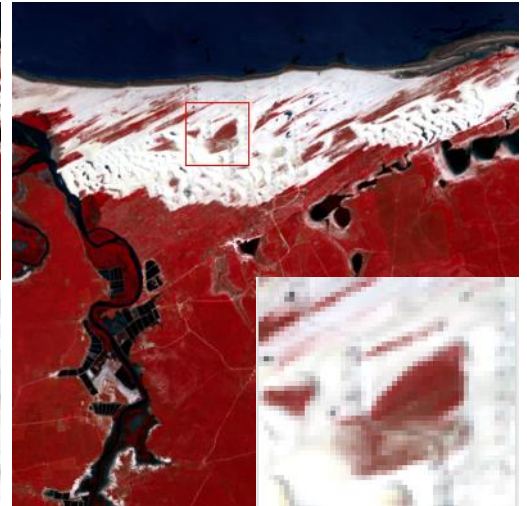
08-09-2012. LT7. Sensor ETM+



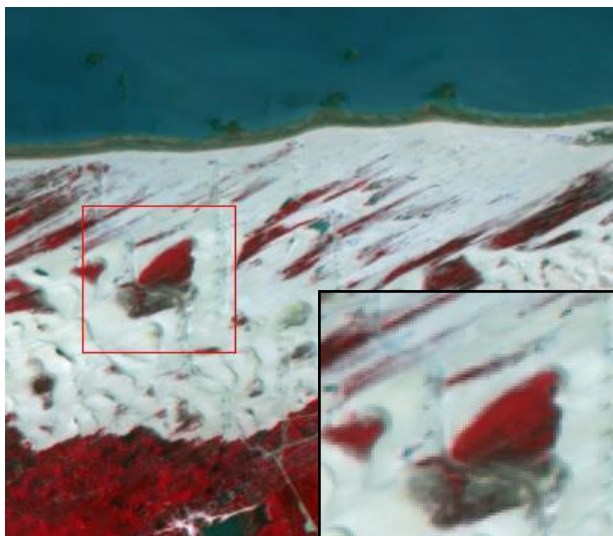
25-08-2013. LC8. Sensor OLI



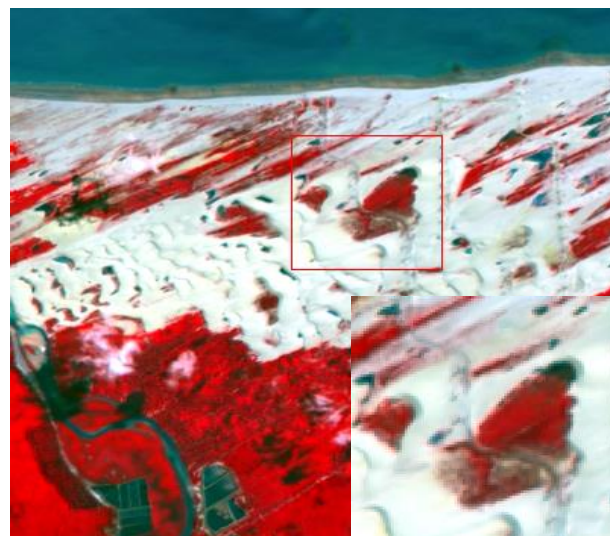
12-08-2014. LC8. Sensor OLI



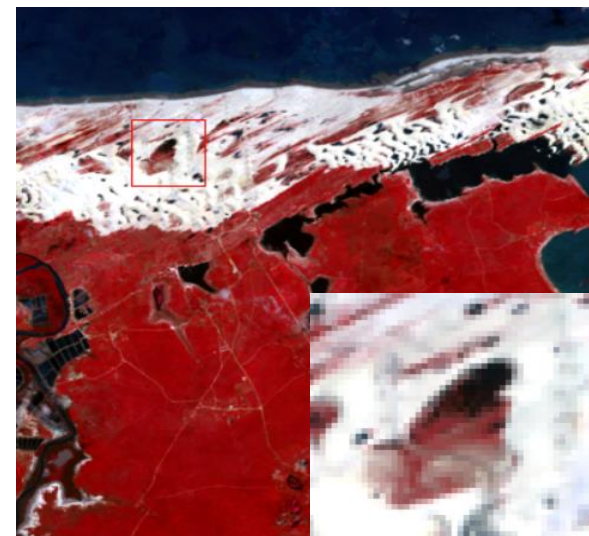
31-08-2015. LC8. Sensor OLI



17-08-2016. LC8. Sensor OLI



04-08-2017. LC8. Sensor OLI



23-08-2018. LT8. Sensor OLI

Figura 86 - Serie Temporal de Imagens Landsat em Camocim, com ênfase no campo de dunas móveis e lagoas interduais entre 2005 – 2018.
Fonte: USGS (2018), INPE (2017)

Neste campo de dunas, a construção do parque eólico, também trouxe o desaparecimento da Lagoa do Ferreira, que era uma das lagoas de maior extensão.

A Lagoa do Ferreira, em Camocim a partir do ano 2009, é um exemplo onde a presença da lâmina de água foi fortemente influenciada pela construção da estrada de acesso aos aerogeradores e a abertura para o mar desta lagoa, para drenar a água acumulada. Estes aspectos modificaram totalmente a dinâmica eólica deste lugar no campo de dunas móveis.

As Figuras 85 e 86 mostram a configuração da Lagoa do Ferreira em Camocim, como é chamada pelos moradores da comunidade de Xavier, localizada nas proximidades do parque eólico. Esta lagoa era um dos corpos de água de maior superfície no campo de dunas móveis objeto deste estudo e uma área de pesca tradicional da mencionada comunidade, que foi modificada no processo de construção da estrada de acesso aos aerogeradores, como foi relatado por Meireles (2012), Meireles et al. (2013), Mendes (2016), Gorayeb et al. (2016), Gorayeb et al. (2018) e constatado nos relatos dos moradores da comunidade.

As imagens dos anos 1973, 1981 e 1982, dos satélites Landsat 1, 2 e 3, respectivamente, apresentam algumas limitações na identificação das dunas e na extensão da lagoa interdunal. A partir do ano 1985, observa-se uma mudança na morfologia do brejo, lagoa interdunal e nas dunas, pela própria dinâmica do campo de dunas móveis.

No ano 2009, foi construído um parque eólico, cujo processo de implementação, de acordo a Meireles (2012), Meireles et al. (2013) e como foi conferido no trabalho de campo, causou alterações topográficas e morfológicas, tais como corte de dunas, soterramento de lagoas interdunares, aterramento de dunas fixas e eliminação de sua vegetação; alteração do nível hidrostático do lençol freático dos aquíferos sub-superficiais.

As imagens Landsat a partir do ano 2009 mostram a estrada de acesso que seccionou a Lagoa do Ferreira com fins da construção do parque eólico e a mudança posterior na abrangência espacial das lagoas interdunares e dunas móveis. A Figura 87, apresenta com maior detalhe a mencionada estrada, pelos 0,2 m de resolução espacial da ortofoto da SEMACE do ano 2014, junto com as fotos tomadas nos trabalhos de campo dos anos 2016 e 2017, destacando também a vegetação herbácea na área do brejo dunar sem lâmina de água e as dunas barcanóides.

As Figuras 85 a 86, correspondentes as imagens Landsat, apresentam estas alterações topográficas e morfológicas que podem se considerar evidências da mudança na dinâmica eólica e alteração do nível hidrostático do lençol freático.

Os aspectos antes mencionados, contribuem para explicar que desde o ano 2010 até o 2017, têm-se apresentado variações que levaram a que atualmente não se forma uma lagoa com as dimensões observadas nas imagens dos anos 1985, 1989, 2000, 2008 e 2009, que aliás, contribuía com o sustento alimentar de alguns dos moradores da comunidade de Xavier. De acordo as conversas com os moradores da comunidade de Xavier e o trabalho de Mendes (2016), na Lagoa do Ferreira, antes da construção do parque eólico, era praticada a pesca artesanal.

Figura 87 - Lagoa do Ferreira e dunas barcanóides em Camocim, seccionadas pela estrada de acesso aos aerogeradores.



Fonte: Semace (2014), Durán (Agosto, 2017).

As variações na abrangência espacial das lagoas interdunares e da morfologia de uma duna barcanoide podem ser observadas na Figura 88, que mostra uma duna barcanoide, o brejo interdunal e uma pequena lagoa interdunal, cuja lâmina de água variou nos anos 2014, 2016 e 2017. De acordo ao ortofoto, a lagoa no ano 2014 estava sem lâmina de água. Nos trabalhos de campo foi observado que em junho de 2016 a lagoa estava com água, tendo alguns pontos até 2 m de profundidade. Em dezembro de 2017, a lâmina de água foi reduzida e apresentou profundidade máxima de 0,40 m.

A Figura 88 apresenta um exemplo da dinâmica das lagoas nos diferentes meses e anos, onde variam a lâmina de água da lagoa e a morfologia das dunas circundantes. Este processo se repete em diferentes magnitudes no campo de dunas móveis e indica se a quantidade de precipitação no período de chuvas num determinado ano foi normal ou abaixo/acima da média.

Figura 88 - Variações da lâmina de água de uma lagoa interdunal e uma duna barcanoide em Camocim, próximo ao parque eólico.



Fonte: Semace (2014), Durán (2016, 2017).

*Letras a, b, c indicam o lugar onde foi tirada a foto da lagoa em datas diferentes

Depois de descrever as mudanças observadas na análise visual das imagens, foi realizada a quantificação das mudanças no campo de dunas de Camocim. A análise de mistura espectral, proporcionou um produto que permite estabelecer do ponto de vista espectral, quanto mudaram as dunas e ofereceu uma análise de tendência, mostrando a direção de avanço das dunas.

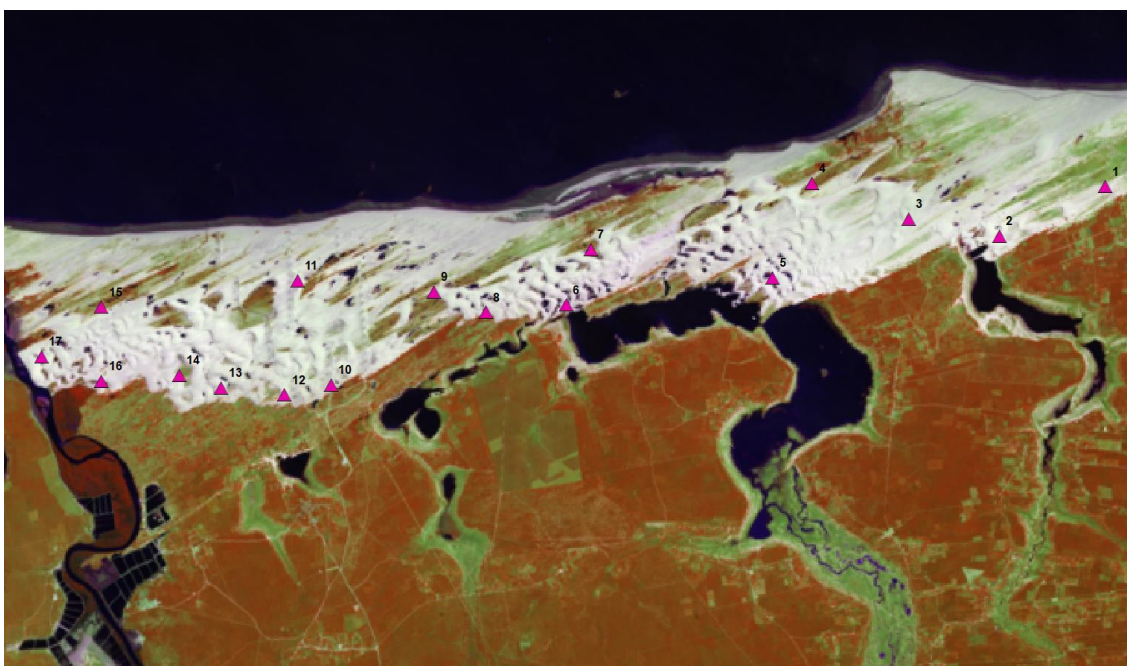
Para observar mudanças no deslocamento no campo de dunas foram gerados os componentes: água, vegetação, dunas, umidade, cujas proporções permitiram uma melhor discriminação dos limites dos alvos, especialmente a separação das dunas com relação aos outros tipos de cobertura.

Foi realizada a comparação temporal entre os componentes AME

correspondentes aos campos de dunas para um intervalo de 33 anos. Um total de 17 locais foram escolhidos para obter valores de deslocamento total, com base nas diferenças observadas e identificadas na interpretação visual das imagens no intervalo de tempo escolhido (Figura 89).

Nos 17 locais escolhidos para obter o valor líquido, em metros, do deslocamento local, também foram criadas as imagens diferença a cada dois ou três anos (com exceção dos intervalos: 1994 – 2000, devido à falta de imagens), para observar se existiram mudanças no deslocamento das dunas antes e depois do intervalo 2006 – 2009, período do tempo no qual foram instalados os aerogeradores sobre o campo de dunas móveis em Camocim.

Figura 89 - Localização dos pontos escolhidos para obter valores do deslocamento das dunas em Camocim.



Fonte: Elaboração própria. Imagem Landsat 8 OLI RGB 453, 23-08-2018.

Na Figura 90, são visualizadas na cor Ciano, as localidades onde o deslocamento é visível. Esta composição RGB foi útil para criar uma imagem diferença colorida, em alguns pontos onde ocorreram algumas das maiores mudanças em termos de extensão do deslocamento das dunas entre 1985 e 2018, os valores encontrados nos exemplos da Figura 90 foram entre 480 e 600 m.

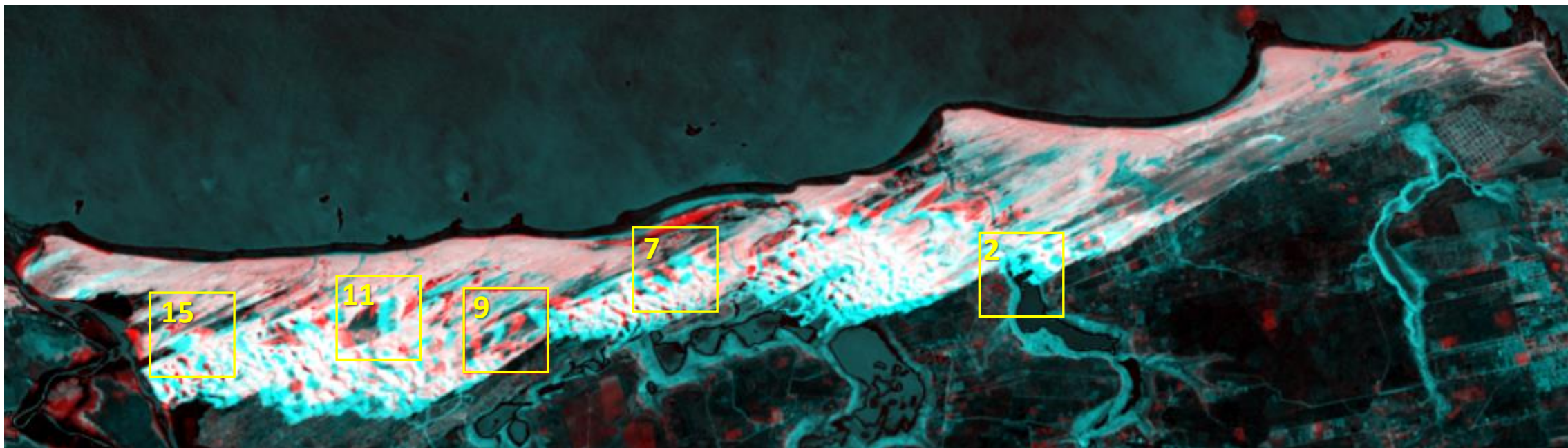
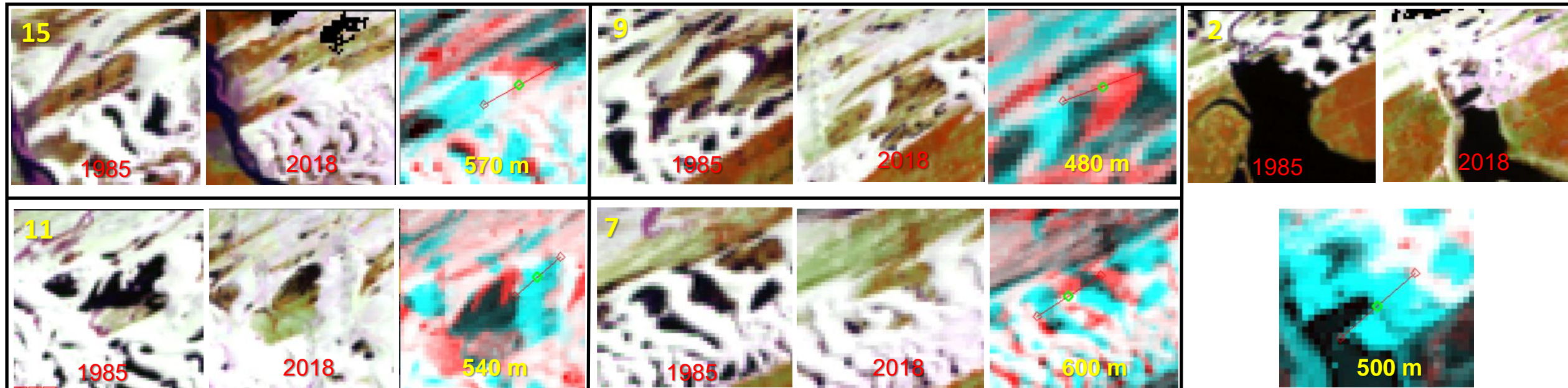


Figura 90 - Visualização das mudanças nas dunas em Camocim. Alguns exemplos dos maiores deslocamentos entre 1985 e 2018.



A tabela 28, apresenta os valores de deslocamento das dunas por cada ponto estabelecido. Nesta área de estudo foi aplicado o mesmo critério sobre o deslocamento mínimo observado em Aracati, já que pela resolução espacial da imagem Landsat de 30 m, os píxeis que fazem parte do componente “dunas” vão refletir essa distância mínima, sendo o valor de 30 metros o deslocamento mínimo observado.

Para obter valores de deslocamento mais detalhados seria preciso aplicar a AME em imagens com altíssima resolução espacial e trabalhos de campo. No caso do campo de dunas em Camocim, a morfologia de dunas barcanóides – brejos – lagoas interdunares, ajudaria a fazer a identificação das mudanças de forma mais simples.

A Figura 91, apresenta a tendência do deslocamento das dunas por cada ponto de observação entre 1986 e 2018. As linhas de tendência permitem observar o comportamento das dunas nos pontos de observação, destacando-se um comportamento dinâmico sem interrupções. Alguns pontos apresentaram algumas quedas aleatórias que indicam uma possível redução na velocidade de avanço da duna, mas com recuperação de tendência dinâmica no período seguinte.

Pontos	1985_1987	1987_1989	1989_1992	1992_1994	1994_2000	2000_2003	2003_2006	2006_2009	2009_2012	2012_2014	2014_2016	2016_2018	Movimento
1	30	30	60	30	90	90	60	30	30	30	30	0	510
2	60	60	90	30	60	60	30	30	60	60	30	30	600
3	60	30	30	30	90	60	30	30	30	60	30	30	510
4	60	60	90	30	90	60	30	60	30	60	30	30	630
5	60	30	60	60	60	60	30	60	60	60	30	30	600
6	30	60	60	60	120	60	30	60	60	90	60	30	720
7	30	30	60	30	90	90	30	30	60	60	60	30	600
8	30	30	60	30	90	150	60	30	60	60	30	30	660
9	30	30	30	30	90	60	30	30	30	60	60	30	480
10	30	30	30	30	60	90	30	60	60	60	30	30	540
11	30	30	30	30	90	60	30	60	30	60	60	30	540
12	30	60	60	30	120	90	60	60	30	60	30	30	660
13	30	30	30	30	60	60	30	30	30	30	30	30	420
14	30	30	60	30	120	60	60	60	30	90	30	30	630
15	30	30	60	30	90	60	60	60	30	60	30	30	570
16	30	30	60	30	60	90	60	60	30	60	30	30	570
17	30	30	60	60	90	120	60	90	60	60	30	30	720

Tabela 28 - Valores de deslocamento das dunas por ponto distribuído no campo de dunas de Camocim entre 1985 e 2018.

Nota: a coluna ressaltada em vermelho corresponde ao período de instalação dos aerogeradores e as filas ressaltadas em azul correspondem aos pontos localizados dentro do parque eólico.

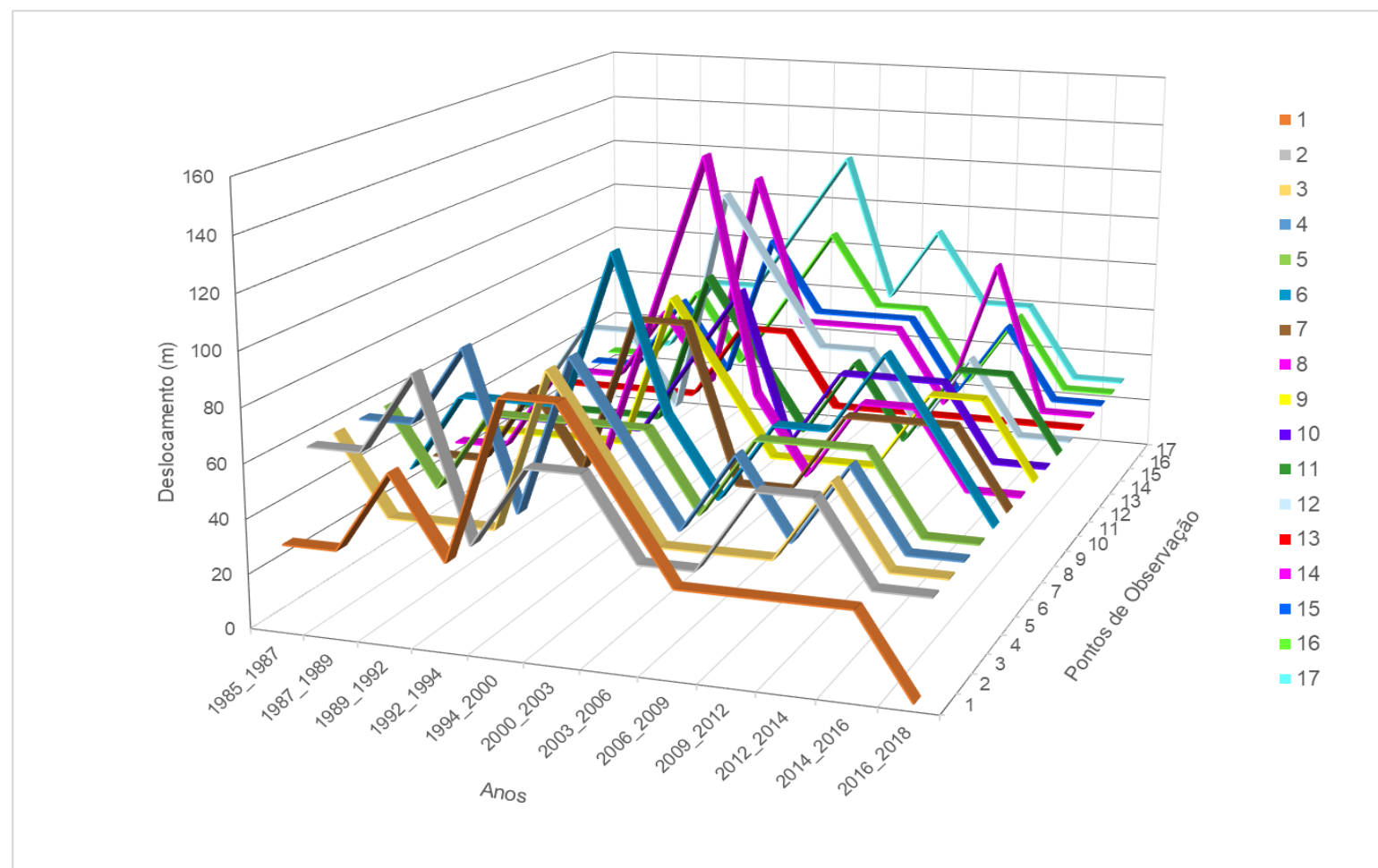


Figura 91 - Tendência do deslocamento das dunas por ponto de observação no campo de dunas de Camocim entre 1985 e 2018.

Evidencia-se um padrão em todos os pontos: de queda entre 1992 – 1994, seguido de um aumento substancial do deslocamento entre 1994 – 2000, sendo os pontos 6, 12, 14 com valores de 120 m. Contrastando esse padrão com os dados de Null (2008), Banco Mundial (2015) e Cortez et al. (2017), pode-se afirmar que apenas um período (entre 1997 – 1998), coincide com os anos de seca no Ceará. Neste caso, a deficiência na quantidade de precipitação ajudou, conseqüentemente, às dunas a se movimentarem-se com maior velocidade.

A localização dos pontos 9, 10, 11 e 12 que se encontram no leste (antes e entre as 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 das dunas na direção do continente.

De acordo com a tabela 4.15, os pontos 9, 10, 11 e 12, a partir de 2009 até 2018 tiveram deslocamentos entre 30 m e 60 m, não atingindo em nenhum dos casos valores de 90 ou 120 m registrados em anos prévios.

Nos pontos 10 e 12, foi evidente a redução no deslocamento. Estes pontos estão localizados próximos ao limite do campo de dunas e onde as estradas construídas para o acesso ao parque eólico atravessa as dunas aí localizadas. Nos trabalhos de campo foram observados trabalhos de fixação de dunas com aterramentos e deslocamento de terra com maquinaria, para preservar a estrada de acesso.

Este resultado sugere que a construção do parque eólico tem influência no deslocamento das dunas, que indica que a instalação do parque eólico num ambiente dinâmico, como são as dunas móveis, tem dado lugar a transformações morfológicas no campo de dunas, desconfigurando as complexas formas do campo de dunas e interferindo na dinâmica do aquífero.

O ponto 9, corresponde a uma duna que vai avançando em sentido ao parque eólico, ainda na sua dinâmica natural. Enquanto o ponto 11 corresponde a duna que tem na sua face de barlavento à Lagoa do Ferreira e está localizada entre duas estradas de acesso. Neste último ponto, são visíveis as mudanças na forma da crista da duna e redução da área onde se formava a lagoa interdunar provocadas pelo soterramento. A construção da estrada causou uma redução do seu deslocamento entre 2009 – 2012, tendência que se manteve entre 2016 – 2018.

A variação da lâmina de água nas lagoas interdunares tem relação direta com a própria dinâmica natural das dunas, cujo tamanho e movimento pode

modificar o tamanho do brejo interdunar e a extensão da lagoa interdunar ao longo dos anos, mas no caso da Lagoa do Ferreira, a dinâmica natural teve interferência humana, causando uma perda irrecuperável, como pode ser observado nas Figuras 85 e 86.

Em Camocim, o movimento das dunas em termos de deslocamento geral aproximou-se do determinado no estudo de Meirelles (2011) no campo de dunas de Jericoacoara, que fica aproximadamente a uns 42 km da área de estudo em Camocim, e tem características morfológicas, dinâmica e localização semelhante. Só nas áreas onde está localizado o parque eólico apresentou algumas mudanças que indicam que a construção dos aerogeradores reduz a movimentação das dunas em alguns locais específicos assim como a perda de algumas lagoas interdunares.

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A pesquisa teve por objetivo analisar as mudanças no uso e cobertura da terra nas planícies costeiras da região do baixo Jaguaribe e Camocim no Estado do Ceará entre os anos 1985 e 2018, utilizando técnicas de detecção de mudanças multitemporais em imagens de sensores ativos e passivos e a relação das mudanças produzidas com a instalação de parques eólicos em áreas de dunas, sendo que os métodos aplicados apresentaram resultados satisfatórios, permitindo comparar, quantificar e descrever as mudanças de uso e cobertura da terra em um intervalo de 33 anos, considerado suficiente para observar as transformações ocorridas nos elementos que constituem as planícies costeiras.

O mapeamento dos processos e unidades geoambientais foi importante para compreender o processo de uso e ocupação da terra sobre as planícies costeiras objeto deste estudo. Neste sentido, a classificação dos elementos do terreno através dos geomorphons, facilitou a identificação e delimitação das unidades geoambientais na faixa do litoral onde se localizam os campos de dunas, que possuem morfologias diferentes, já que algumas feições do ambiente eólico, tais como dunas longitudinais, planície de deflação e dunas fixas, apresentaram dificuldades na diferenciação apenas na interpretação visual.

A utilização de um MDT de alta resolução, como o utilizado, gerado a partir de dados LIDAR, mostrou a potencialidade do método dos geomorphons na

delimitação de feições menores e discriminação de elementos de terreno, como por exemplo: a superfície de avalanche, área de barlavento como encosta, a crista da duna, a base da duna, áreas brejo e lagoas interdunares, marcas espaços-temporais, marcas espaço direcionais e configuração linear dos eolianitos.

Os geomorphons foram um método útil no mapeamento de feições geomorfológicas que auxiliam o mapeamento e atualização de unidades geoambientais. Visando a utilização de dados de elevação do terreno obtidos a partir de drones, sem dúvida, os geomorphons são muito uteis no mapeamento geomorfológico da dinâmica costeira.

A elaboração da série multitemporal utilizando imagens da série Landsat foi possível porque o catálogo histórico de imagens é suficientemente extenso que incluía todo o período de tempo contemplado nesta pesquisa. Embora a utilização de dados multisensor seja uma tendência que promove a integração de dados, a disponibilidade de imagens já processadas, com valores de ND originais alterados pela aplicação de diversos processamentos não explícitos nos metadados da imagem, limita a extração de informação espectral.

Exemplo de essa situação, foram as imagens QuickBird e RapidEye disponíveis, que sendo recomendáveis para realizar uma análise multitemporal de dunas por sua muita alta resolução, não puderam ser utilizadas para extrair informação espectral pelo método de análise de mistura espectral, porque o nível de processamento que possuem (produto ortoimagem com melhoramentos de contraste) não preservou os valores originais da informação espectral. Estas imagens foram utilizadas para validar a aplicação do método AME nos pontos de observação escolhidos.

A variabilidade espacial e temporal pôde ser observada ao longo das imagens Landsat disponíveis em cada área de estudo desde a década de 1970 até 2018. As imagens do sensor MSS não foram utilizadas nesta pesquisa, na série temporal para classificação de uso e cobertura da terra. Destaca-se que as imagens do sensor MSS, possuem um valor significativo para estudos de detecção de mudanças e foram uteis para observar a evolução das lagoas interdunares afetadas pela construção dos parques eólicos, tanto em Aracati como em Camocim.

Na detecção de mudanças multitemporal devem ser utilizadas imagens sem nuvens, que representem as características de uso e cobertura numa mesma época do ano. Com a evolução de diversas técnicas no sensoriamento remoto, foi

possível fazer *composite* com o Google Earth Engine, para criar uma imagem sem nuvens a partir de outras imagens de datas próximas. Este processo abre a possibilidade de utilizar o acervo de imagens Landsat sem a limitação das nuvens e aproveitar todo o potencial das informações.

Também a utilização da técnica *Gap Fill* para utilização de cenas do Landsat 7 ETM+ SLC-off, permitiu criar uma cena adequada para aplicação da classificação no ano 2012, contribuindo com a manutenção dos períodos da análise entre 3 e 4 anos, já que o ano 2012 inicialmente carecia de imagens dos sensores TM e OLI. A aplicação desta técnica mostrou-se útil, porque permitiu a utilização de todas as cenas do sensor ETM+ que tenham o problema de falhas (*strips*), sendo possível fazer classificação supervisionada com um bom nível de exatidão, como ocorreu nesta pesquisa, onde foram obtidas classificações com exatidão de 85,10% na área de Aracati e 85,31% na área de Camocim, permanecendo no limite recomendado por Foody (2002) na classificação de imagens.

Na Identificação dos tipos de mudanças no uso e cobertura da terra na planície costeira do baixo Jaguaribe, os métodos de detecção de mudanças aplicados em imagens ALOS PALSAR e imagens Landsat, permitiram identificar e quantificar áreas com mudanças ou tendências.

O método de detecção de mudanças incoerentes nas imagens ALOS PALSAR na planície costeira do baixo Jaguaribe, permitiu observar quais foram as áreas de mudança e não mudança, sendo que com o método Log Ratio, foi possível ressaltar o processo de implementação do parque eólico, através da detecção de mudanças na extensão das estradas de acesso do parque eólico e na movimentação das dunas no momento da construção. A desvantagem foi determinar o limiar para determinar as áreas de mudanças ou não mudanças, e evitar o mapeamento do ruído como mudança. Este método exigiu o conhecimento prévio das mudanças observadas na área de estudo e deve ser aplicado em conjunto com outros métodos para obter uma melhor compreensão dos tipos de mudanças. O nível de processamento 1,5, mostrou algumas falhas de bandeamento que impediram a utilização das imagens na aplicação do método em Camocim.

A detecção de mudanças com o método pós classificação, permitiu identificar 11 classes de uso e cobertura e quantificar as variações das duas áreas de estudo, com informação de campo entre os anos 2017 e 2018. A comparação pós classificação é um dos métodos mais utilizados para determinar mudanças entre

diversas classes de uso e cobertura e deu resultados altamente satisfatórios nesta pesquisa.

A análise da matriz das transições significativas permitiu obter resultados além da comparação das superfícies líquidas de ganhos e perdas, mostrou as relações de mudança em termos de proporção, intensidade, transição e hierarquia no período de estudo entre 1985 – 2018 e entre os intervalos de tempo menores, onde foram realizadas as comparações. O mapeamento das transições significativas mostrou uma aproximação mais real das mudanças, estabelecendo quais classes especificamente tiveram transição e sua localização nas áreas de estudo.

A intensidade das transições foi semelhante em ambas áreas de estudo, destacando como as transições de maior intensidade entre as classes arbustivo, arbustivo caducifólio e cultivos. Mesmo com valores de intensidade baixo foram observadas: 1) as transições de áreas úmidas e manguezal para carcinicultura; 2) as dinâmicas entre gramíneas, áreas úmidas e dunas que avançam ou evitam a transição de acordo com eventos como a seca; 3) o crescimento paulatino das áreas urbanas, avançando principalmente sobre cobertura de arbustivo caducifólio, solo exposto, cultivos e áreas úmidas. A expansão das terras urbanas sobre o campo de dunas em Aracati foi percebida nos resultados.

A aplicação dos métodos de detecção de mudança permitiu verificar a existência de relação entre as mudanças no uso e cobertura da terra e a implantação de parques eólicos em áreas de dunas.

O campo de dunas móveis como é um ambiente dinâmico, está em constante transformação, ou seja, vai apresentar mudanças ao longo do tempo independentemente da instalação dos aerogeradores. Mas neste espaço com dinâmica própria a intervenção antrópica a traves da instalação do parque eólico sem dúvida alterou o ambiente natural, provocando alterações ao redor dos aerogeradores que impactaram e continuaram modificando a dinâmica natural do ambiente. A instalação de aerogeradores é um fator que contribuiu com as mudanças detectadas.

Sobre se a instalação dos parques eólicos influência de forma incidente e persistente nas mudanças do uso e cobertura nas planícies costeiras e áreas de dunas, alterando negativamente as dinâmicas de fluxo costeiro, foi demonstrado que as mudanças de uso e cobertura da terra identificadas na planície costeira como um todo, não demonstraram ter relação com a implantação dos parques eólicos sobre o

campo de dunas móveis. Mas as mudanças identificadas pela implantação do parque eólicos se restringiram ao campo de dunas. Nas imagens de radar foi identificado o processo de instalação do parque eólico em Aracati e com as imagens ópticas a análise de mudanças no campo de dunas móveis em Aracati e Camocim pelo método de análise de mistura espectral.

Merece destaque que mesmo tenham sido registradas chuvas em torno da média no Ceará em 2011, a distribuição da precipitação em Aracati e Camocim não foi favorável para recarga. Entre 2011 e 2016, os 5 anos de seca mostraram a redução expressiva das lagoas costeiras em Camocim e a pequena ou inexistente lâmina de água nas lagoas interdunares, tanto em Aracati como em Camocim.

A construção das estradas de acesso aos parques eólicos, trouxe a modificação e desaparecimento da Lagoa do Ferreira em Camocim, e de outra lagoa em Aracati, ambas com superfícies entre 20 e 11 km² aproximadamente, sendo qualificadas nas comunidades de Xavier em Camocim e Cumbe em Aracati como algumas das lagoas de maior extensão, de onde era possível a pesca artesanal pelos moradores das comunidades antes mencionadas nas épocas de defeso de peixes e lagostas.

A implantação dos aerogeradores nos campos de dunas causaram efetivamente impacto na morfologia das dunas. Os resultados do AME mostraram que nos pontos de observação escolhidos para medir o deslocamento das dunas nas áreas mais próximas ao parque eólico houve dois comportamentos: em Aracati não foi identificada uma diferença significativa em termos de deslocamento das dunas, mas em Camocim a redução foi evidente e parece manter-se no tempo, mesmo com a interferência de outras variáveis, estacionais e/ou climáticas.

Este impacto persiste no tempo, a instalação do parque eólico num ambiente dinâmico como são as dunas móveis deu lugar sim, a transformações morfológicas no campo de dunas, desconfigurando as complexas formas do campo de dunas, interferindo na dinâmica do aquífero, que merecem um estudo específico, a uma escala de maior detalhe. A construção dos parques eólicos causou não somente um impacto ambiental, também social importante, como foi conferido durante o desenvolvimento deste trabalho, devido ao conhecimento da realidade do meio físico e social vinculado com este parque eólico.

A aplicação da análise de mistura espectral em ambas áreas de estudo, mostrou os deslocamentos das dunas entre 1985 até 2018, baseados na diferença

espectral entre uma data e outra, mas não mostrou uma relação direta com fenômenos climáticos como El Niño e La Niña, mas com o fenômeno da seca sim, existe uma aproximação.

A utilização de imagens de resolução espacial média como Landsat, foi limitante para medir o deslocamento das dunas em intervalos de tempo inferiores a 2 anos. Para medir deslocamentos inferiores a 30 m, seria necessárias imagens de muita alta resolução, para obter resultados mais detalhados que possam refletir a influência do parque eólico no campo de dunas móveis em Aracati e Camocim.

O contraste espectral gerou dificuldades na identificação de mudanças com as imagens Landsat, por isso recomenda-se que estudos futuros nestas áreas sejam a uma escala maior, que podem ser realizados com imagens de novos sensores com maior resolução espacial disponíveis gratuitamente e com a expectativa de uma disponibilidade futura de imagens semelhantes antes da construção dos parques eólicos, que permita conhecer a dinâmica das áreas impactadas antes e depois do empreendimento. Este aspecto mostra a importância de realizar estudos de detecção de mudanças antes da construção dos empreendimentos, para uma melhor identificação do impacto posterior.

A realização de Relatórios Ambientais Simplificados ao invés de estudos de impacto ambiental, antes da construção destes complexos eólicos tanto em Aracati como em Camocim, sem dúvida, gerou falta informação detalhada sobre possíveis impactos decorrentes da instalação dos aerogeradores, todo por priorizar a produção de energia “limpa” com a menor quantidade de obstáculos administrativos por parte do Estado.

A partir do ano 2014, foram construídos aerogeradores no tabuleiro litorâneo de Aracati, que foram identificados e classificados como Urbano, aparecendo como um leve incremento das áreas urbanas de 2015 até 2018. Estes aerogeradores encontram-se em áreas de vegetação arbustiva e cultivos de caju, e pelo observado nos trabalhos de campo, a instalação dos aerogeradores não gerou uma mudança significativa nas classes onde se encontram, devido ao tamanho e porque as classes impactadas, mantêm o uso e cobertura inicial, sem maiores intercâmbios em termos de superfície.

As ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho e esta pesquisa demonstrou a potencialidade de análise que pode ser replicada com futuros trabalhos que ampliem

o conhecimento sobre a planície costeira de Aracati e Camocim, assim como em outras áreas costeiras de características semelhantes. A metodologia de detecção de mudanças é possível de ser aplicada para determinar outras causas de mudanças como as que foram abordadas neste trabalho assim como em outros ambientes diferentes a planície costeira, já que o sistema terrestre é um geossistema em constante transformação que pode ser identificada ou medida sempre que seja preciso medir o impacto do tipo de mudança.

Recomendações

A geração dos geomorphons, são muito uteis no mapeamento geomorfológico da dinâmica costeira e delimitação de unidades geoambientais em áreas de dunas móveis. Recomenda-se utilização de um MDT de alta ou muita alta resolução, já que o algoritmo melhora a definição das formas de terreno especificamente naquelas cobertas com vegetação.

A análise multitemporal de dunas deve ser realizada com imagens de muita alta resolução que possam ser processadas para obter valores físicos de radiância e reflectância, para que possam ser aplicados qualquer método de análise espectral. Medições de deslocamento das dunas no campo podem auxiliar na validação de resultados obtidos a partir de imagens de sensores remotos.

As imagens ALOS PALSAR com nível de processamento 1.5 podem ter alguns problemas, então recomenda-se utilizar imagens com nível de processamento 1.1, que permitem um maior controle no pré-processamento da imagem. Na detecção de mudanças especificamente no campo de dunas, a recomendação é testar métodos como *Offset Tracking* ou interferometria, para medir a taxa de migração das dunas.

Neste sentido, sugere-se continuar observando as mudanças no campo de dunas para avaliar se a redução do deslocamento se mantém ao longo do tempo ou é estacionário, se tem a interferência de outras variáveis, estacionais e/ou climáticas.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA - **Associação Brasileira de Energia Eólica. Boletim Anual de Geração Eólica 2019**. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/06/PT_Boletim-Anual-de-Gera%C3%A7%C3%A3o-2019.pdf. Acesso em: 07 jun. 2020.
- 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**, United States, n. 91, p. 8098–8112. 1986.
- AGUILAR, Manuel A.; SALDANA, María; AGUILAR, Fernando J. Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. Amsterdam, n. 21, p. 427–435. 2013.
- ALASKA SATELLITE FACILITY. **About ALOS PALSAR**. Alaska, 2018. Disponível em: <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/about-palsar/>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- ALDWAIK, Safaa Zakaria, PONTIUS JR., Robert Gilmore. Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition. **Landsc. Urban Plann**, Amsterdam, n. 106 (1), p. 103–114. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.02.010>. Acesso em: 15 set. 2019.
- AL-MUTIRY, M.; HERMAS, E.A.; AL-GHAMDI, K.A.; AL-AWAJI, H. Estimation of dune migration rates north Riyadh City, KSA, using SPOT 4 panchromatic images. **Journal of African Earth Sciences**, Amsterdam, n. 124, p. 258 – 269. 2016.
- ALPHAN, Hakan. Bi-Temporal Analysis of Landscape Changes in the Easternmost Mediterranean Deltas Using Binary and Classified Change Information. **Environmental Management**, Netherlands, n. 51, p. 541–554. 2013.
- AL-SHARIF et al. Revisiting Methods and Potentials of SAR Change Detection. **Proceedings of the World Congress on Engineering**. London, U.K, Vol III, WCE 2013, July 3 - 5, 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**, São José dos Campos, v. 7, p. 583 -592, 1992.
- AMARANTE, O. A; ZACK, J; BROWER, M; SA, A. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: MME; Rio de Janeiro: Eletrobras, 2001.
- ANDERSON, Paul S. **Fundamentos para a fotointerpretação**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 1982. 138p.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Brasília: ANEEL, 2002. 153 p. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf. Acesso em: 22 abr. 2016.

ANEEL. **Capacidade de Geração do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Brasília: ANEEL, 2014. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 20 abr. 2016.

ANGELO, Neide; FERREIRA, Rute. Detecção de Mudanças em Imagens Multitemporais de Sensoriamento Remoto Empregando SVM com Kernel RBF e Nova Métrica de Pertinência. **Revista De Ciências Ambientais – RCA**. Canoas, v. 9, n. 2, 2015.

ANTUNES, Mauro; SIQUEIRA, Jéssica. Características das imagens RapidEye para mapeamento e monitoramento agrícola e ambiental. *In: XVI Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. Anais [...]*. Foz do Iguaçu: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 547-554.

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: XIII Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. Anais [...]*. Florianópolis: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 6315-6322.

ARAUJO, Thiago; FONSECA, Eliana. Análise multitemporal dos Lençóis Maranhenses entre 1984 a 2014 utilizando sensoriamento remoto orbital. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n. 01, p. 280-295. 2016.

ARAUJO, Thiago. **Análise espaço-temporal dos lençóis maranhenses com o uso de imagens de satélite para o planejamento ambiental**. 2015. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BAIG, Muhammad Hasan Ali; ZHANG, Lifu; SHUAI, Tong; TONG, Qingxi. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance, **Remote Sensing Letters**, 5:5, 423-431, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434>. Acesso em: 08 mar. 2019.

BEZERRA, Luiz. **Caracterização dos Tabuleiros Pré-Litorâneos do Estado do Ceará**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais). Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2009.

BEZERRA, Luiz; LACERDA, Luiz; MAIA, Luís. **Identificação dos tabuleiros pré-litorâneos do Estado do Ceará com imagens SRTM**. Natal: 62^a Reunião Anual da SBPC. 2010. Disponível em: <http://www.sbpcnet.org.br/livro/62ra/resumos/resumos/1858.htm>. Acesso em: 30 out. 2016.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina. v. 3. 2003.

BIRD, Eric. **Coastal geomorphology: an introduction**. 2. ed. England: John Wiley & Sons, Ltd., 2002. 411 p.

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**. United States, v. 95. n. 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**, n. 1, p. 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.** v. 1. n. 95-1. p. 23-26. 1995.

BORBA, Eduardo. **Impactos ambientais, revegetação e perspectivas de uso dos sistemas de dunas em setores da costa cearense**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais). Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2010.

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

BOVOLO, F., C. MARIN AND L. BRUZZONE. A Hierarchical Approach to Change Detection in Very High Resolution SAR Images for Surveillance Application. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, n.4, p. 2042-2054. 2013.

BRANCO, P. N. C. **Análise dos Sistemas Depositionais e Dinâmica Costeira do Município de Aquiraz, Estado do Ceará, com Auxílio de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 2003. Tese (Doutorado em processamento de dados em geologia e análise ambiental). Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

BRASIL. **Resolução n. 279 de 27 de junho de 2001**. Licenciamento ambiental simplificado para empreendimentos do setor elétrico. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2001/res_conama_279_2001_licenciamentoambientalsimplificadoparaempreendimentoseltricos.pdf. Acesso em: 25 may. 2016.

BRASIL: Agência Espacial Brasileira. **Formação continuada de professores: sensoriamento remoto**. Brasília: Ministério da ciência e tecnologia, 2008. 82p.

BRAUN, Andreas; HOCHSCHILD, Volker. A SAR-Based Index for Landscape Changes in African Savannas. **Remote Sens**. n. 9, p. 359. 2017. doi:10.3390/rs9040359

BROWN, Daniel; ARBOGAST, Alan. Digital Photogrammetric Change Analysis as Applied to Active Coastal Dunes in Michigan. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v. 65. n. 4. pp. 467-474. 1999.

BRUZZONE, L.; BOVOLO, F. A Novel Framework for the Design of Change-Detection Systems for Very-High-Resolution Remote Sensing Images. **Proceedings of IEEE**. v. 101, n. 3, p. 609-630. 2012.

BRUZZONE, Lorenzo. **Current Scenario and challenges in the analysis of multitemporal remote sensing images**. Athens, Greece: 4th advanced training course in Land Remote Sensing. 2013. Disponível em: https://earth.esa.int/documents/10174/643004/D4T2b_bruzzo_LTC2013.pdf. Acesso em: 15 mar. 2017.

BRUZZONE, L. **Multitemporal Analysis**. Valencia, Spain: 5th ESA Advanced Training Course on Land Remote Sensing. 2014.

CAMARGO SCHUBERT. **Atlas Eólico e Solar: Ceará**. Ceará: Carmargo Schubert Engenheiros Associados – Curitiba; ADECE, FIEC, SEBRAE – Fortaleza. 2019. Disponível em: <http://atlas.adece.ce.gov.br/>. Acesso em: 15 ago. 2019.

CAMPS-VALLS, G; BRUZZONE, L. Kernel-Based Methods for Hyperspectral Image Classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 43, n. 6, p. 1351-1362. 2005.

CANTY, M. J. & NIELSEN, A. A. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. **Remote Sensing of Environment**. v. 112. p. 1025-1036. 2008.

CARVALHO, A.M.; CLAUDINO-SALES, V.; MAIA, L.P.; CASTRO, J.W.A. Eolianitos de Flecheiras/Mundaú, Costa Noroeste do Estado do Ceará, Brasil - Registro ímpar de um paleo-sistema eólico costeiro. *In*: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Souza, C.R.G.; Fernandes, A.C.S.; Berbert-Born, M.; Queiroz, E.T.; (Edit.) **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: CPRM, 2008. v. 2. 515 p. Disponível em: <http://sigep.gov.br/sitio118/sitio118.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2017.

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**, Brasília, n. 6(1), p. 147-173. 2003.

CASTRO, A.; MORO, M.; MENEZES, M. O Complexo Vegetacional da Zona Litorânea no Ceará: Pecém, São Gonçalo do Amarante. **Acta Botanica Brasilica**, Minas Gerais, n. 26(1), p. 108-124. 2012.

CEARÁ. **Lei Estadual nº 13.796 de 30 de junho de 2006**. Institui a política estadual de gerenciamento costeiro e o plano estadual de gerenciamento costeiro e dá outras providências. Disponível em: <http://www.al.ce.gov.br/legislativo/legislacao5/leis2006/13796.htm>. Acesso em: 01 dez. 17.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). **Fim do fenômeno La Niña no pacífico equatorial**. Cachoeira Paulista, CPTEC – INPE. 2018. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 01 abr 2018.

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**. v. 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.

CHEN, Zhikang; ELVIDGE, Christopher; GROENEVELD, David. Monitoring Seasonal Dynamics of Arid Land Vegetation Using AVIRIS Data. **Remote Sensing of Environment**, n. 65. p. 255-266 1998.

CHEN, X.; VIÉRLING, L.; DEERING, D. A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, p. 63–79, 2005.

CHUVIECO, E. **Fundamentos de Teledetección Espacial**. 3. ed. 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.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 1999. 236p.

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

CLAUDINO-SALES, V. **Os litorais cearenses**. In: Silva. J. B. (Org.). Ceará: um novo olhar geográfico. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha, 2005.

CLAUDINO-SALES, V.; PEULVAST, J.P. Dune Generation and Ponds on the Coast of Ceara State (Northeast Brazil). In: ALLISON, RJ (ed.). **Applied Geomorphology: Theorie and Practice**. New York: Wiley and Son, 2002. p.443-463.

CLEMENTE, AUGUSTO MONSO. **Utilização da Estatística Espacial para analisar a dinâmica do Feijão e da Soja no Brasil, entre os anos de 1990 a 2013**. 2015. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Territorial). Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

COBURN, C. A. & ROBERTS, A. C. B. A multiscale texture analysis procedure for improved forest stand classification. **International Journal of Remote Sensing**. n. 25. p. 4287–4308. 2004.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH). **Base Cartográfica de infraestrutura hídrica do Ceará**. Fortaleza: COGERH, 2015. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/mapas/>. Acesso em: 10 nov. de 2018.

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**. n. 52, p. 121–133. 2002.

CONGALTON, R.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. Boca Raton, Florida: CRC/Lewis Press, 1999. 137 p.

COMBER, Alexis; BRUNSDON, Chris; CHARLTON, Martin; HARRIS, Paul. Geographically weighted correspondence matrices for local error reporting and change analyses: mapping the spatial distribution of errors and change. **Remote Sensing Letters**. v. 8, p. 234-243. 2017.

CORTIZO, Luis; ISLA, Federico I. Dinámica de la Barrera Medanosa e Islas de Barrera de Patagones (Buenos Aires, Argentina). **Latin american journal of sedimentology and basin analysis**. v. 19 (1), p. 47-63. 2012.

COSTA, Gessivaldo. CELINA-Estimativa de Temperaturas Para o Estado do Ceará. Versão 1.0. UFC, 2007.

CRIST, E. P.; CICONE, R. C. A Physically-Based Transformation Of Thematic Mapper Data – The TM Tasseled Cap, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-22, n.3, p. 256-263, 1984.

CRÓSTA, Alvaro Penteado. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Ed. rev. Campinas – SP: IG/UNICAMP., 1992.

DANTAS, Ana Paula. O que o Ceará precisa para voltar a ser a “terra da energia dos ventos”. **Revista da Fiec**. Publicação do Sistema Federação das Indústrias do Estado do Ceará. Ano VIII. N. 96. Agosto 2015. Disponível em: <https://arquivos.sfipec.org.br/sfipec/files/files/REVISTA_FIEC_AGOSTO.pdf>

DA LUZ et al. Classificação híbrida de imagens Landsat-8 e RapidEye para o mapeamento do uso e cobertura da terra nas Unidades Amostrais de Paisagem do Inventário Florestal Nacional do Brasil. *In*: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 7222 – 7230.

DA SILVA, Luiz; ARAUJO, Rogério; MAIA, Luiz; CAVALCATE, Maria. **Zoneamento ecológico-econômico da zona costeira do Estado do Ceará**. In: XLV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. 22 a 25 de julho de 2007. Apresentação Oral. Londrina. 20 p.

Ceará inaugura maior eólica. **Diário do Nordeste**, Fortaleza, 12 ago 2009. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/ceara-inaugura-maior-eolica-1.347708>. Acesso em: 16 de setembro de 2016.

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**. v.11, p. 2141. 2019. doi:10.3390/rs11182141

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Adequação do projeto executivo para melhoramentos com adequação de capacidade e segurança – ponte sobre o rio Jaguaribe** (atualização). Ceará: Volume 01 – relatório do projeto e documentos para concorrência. 2006. Disponível em http://www1.dnit.gov.br/anexo/Projetos/Projetos_ edital0095_14-03_0.PDF. Acesso em: 10 nov. de 2017.

DONG, Pinliang. Automated measurement of sand dune migration using multi-temporal lidar data and GIS. **International Journal of Remote Sensing**. v. 36, n. 21, p. 5426–5447. 2015.

DUTRA, L.; MURA, J.; FREITAS, C.; DOS SANTOS, J.; ELMIRO, M. Processamento de Imagens de Radar de Abertura Sintética – Princípios e Aplicações. *In: Anais do IV Workshop em Tratamento de Imagens, 2003, Anais [...]*. NPDI/DCC/ICEx/UFMG, p. 4-13.

ELS, A.; MERLO, S.; KNIGHT, J. Comparison of two satellite imaging platforms for evaluating sand dune migration in the Ubari Sand Sea (Libyan Fazzan). **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7/W3**. Berlin, Germany: 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment. 2015. Disponível em: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-7-W3/1375/2015/isprsarchives-XL-7-W3-1375-2015.pdf>. Acesso em: 02 nov. de 2017.

FADHIL, Ayad. Sand dunes monitoring using remote sensing and GIS techniques for some sites in Iraq. **PIAGENG 2013: Intelligent Information, Control, and Communication Technology for Agricultural Engineering**. Edited by Honghua Tan, Proc. of SPIE. v. 8762, 876206. 2013. doi: 10.1117/12.2019735

FARFÁN G., MICHELLE, G. RODRÍGUEZ-TAPIA, J.-F. MAS. “Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. **estigaciones Geográficas. Instituto de Geografía, UNAM**. Boletín, n. 90, 2016. pp. 89-104., México. Disponível em: [dx.doi.org/10.14350/rig.48600](https://doi.org/10.14350/rig.48600). Acesso em: 10 jul. de 2019.

FARIA, Fabio Augusto. **Disciplina de Processamento de Imagens**. São Paulo: Instituto de Ciência e Tecnologia – UNIFESP. 2015. Disponível em: http://www.ic.unicamp.br/~ffaria/pi2s2015/class16/aula_textura.pdf. Acesso em: 12 abr. 2019.

FARR, TOM G. et al. Microwave Penetration and Attenuation in Desert Soil: A Field Experiment with the Shuttle Imaging Radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. GE-24, n. 4. 1986.

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.

FERNANDES, Afrânio. **Conexões florísticas do Brasil**. Fortaleza: Ed. Banco do Nordeste, 2003.

FERNANDES, Afrânio. **Fitogeografia Brasileira - Fundamentos Fitogeográficos: Fitopaleontologia, Fitoecologia, Fitossociologia, Fitocorologia**. 1a Parte - 3. ed. Revisada. Fortaleza: Edições UFC, 2007.

FERNANDES, Albaniza. A produção midiática da maré do camarão no Ceará. **Mercator**. Revista de Geografia da UFC, ano 06, n. 11, p.117. 2007.

FERNANDEZ, G. B.; MUEHE, D. Algumas Considerações sobre o Efeito do Fenômeno El Niño sobre Feições Costeiras ao Longo da Costa Brasileira. **GEOgraphia**, Ano VIII, n.15, p. 115 – 128. 2006.

FERNANDES, Pedro; VICENS, Raul; FURTADO, Luiz. Modelo automático de normalização radiométrica de série multitemporal LANDSAT-5 usando pontos pseudoinvariantes (PIF). **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 69/2, p. 241-251. 2017.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

FERREIRA, Ruth. **Uma metodologia para detecção de mudanças em imagens multitemporais de sensoriamento remoto empregando Support Vector Machines**. 2014. 89 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

FIRPO, M.; SANSIGOLO, C.; ASSIS, S. Climatologia e variabilidade sazonal do número de ondas de calor e de frio no Rio Grande do Sul associadas ao ENOS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.1, 95 - 106, 2012.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3. ed. São Paulo, SP: Oficina de textos, 2011. p. 128.

FOGA, S., SCARAMUZZA, P.L., GUO, S., ZHU, Z., DILLEY, R.D., BECKMANN, T., SCHMIDT, G.L., DWYER, J.L., HUGHES, M.J., LAUE, B. **Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products**. Remote Sensing of Environment, 194, 379-390.2017. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.026>. Acesso em: 06 mar. 2019.

FONZAR, B.C. A Circulação Atmosférica na América do Sul: os Grandes Sistemas Planetários e Subsistemas Regionais que Atingem o continente. Localização e trajetória. **Cadernos de Geociências**, Rio de Janeiro, 11 :11-33. 1994.

FOODY, G. M. Monitoring the magnitude of land-cover change around the Southern limits of the Sahara. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 67, 841–847. 2001.

FOUMELIS, F. **ESA SNAP/Sentinel-1 Toolbox. SAR Coregistration Approaches & Change Detection**. College of Urban and Environmental Sciences, Tianjin Normal University. China 16 -21 November 2015. Advanced Training Courses on land remote sensing. ESA. 2015.

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), **Calendário das Chuvas no Estado do Ceará**. Ceará: Funceme. 2019. Disponível em: <http://www.funceme.br/app/calendario/>. Acesso em: 15 Out, 2019.

FURTADO, Luiz; SILVA, Thiago; FERNANDES, Pedro; NOVO. Land cover classification of Lago Grande de Curuai floodplain (Amazon, Brazil) using multi-sensor and image fusion techniques. **Acta Amazonica**. v. 45, n. 2, p. 195 – 202. 2015.

GAIDA, William; BREUNIG, Fábio Marcelo; GALVÃO, Lênio Soares; PONZONI, Flávio Jorge. Correção Atmosférica em Sensoriamento Remoto: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.13, n.01 (2020) 229-248.

GARCIA, Mariano; RAMOS, Ruben. **Máquinas Vector - Soporte**. Técnicas de Clasificación en Teledetección. Master en Tecnologías de la Información. 04-09 de feb de 2019. 33 p. Notas de Aula.

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.

GOMEZ, Uriel; BOSQUE SENDRA, Joaquín. Transiciones de la Cobertura y Uso de la Tierra en el Período 1991 – 2005 en la Cuenca del Río Combeima, Colombia. **Série Geográfica - Profesora María de los Ángeles Díaz Muñoz, In Memoriam**. n. 14, p. 163 – 178. 2007 – 2008

GONZALEZ, R. C. & WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

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**. Fortaleza: Edições UFC, 2019. Disponível em: http://www.observatoriodaenergiaeolica.ufc.br/wp-content/uploads/2019/07/livro_web.pdf. Acesso em: 13 Out, 2019.

- GORAYEB, Adryane; BRANNSTROM, Christian. Caminhos para uma gestão participativa dos recursos energéticos de matriz renovável (parques eólicos) no nordeste do Brasil. **Mercator**, Fortaleza, v. 15, n. 1, p. 101-115, mar. 2016. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/1812>. Acesso em: 11 Out, 2016.
- GORAYEB, A.; MENDES, J. S.; MEIRELES, A. J.; BRANNSTROM, C.; SILVA, E. V.; FREITAS, A. L. R. . Wind-energy Development Causes Social Impacts in Coastal Ceará state, Brazil: The Case of the Xavier Community. **Journal of Coastal Research**, v. 75, p. 383-383, 2016.
- GORAYEB, Adryane; BRANNSTROM, Christian; MEIRELES, Antonio Jeovah; MENDES, Jocicléa . Wind power gone bad: Critiquing wind power planning processes in northeastern Brazil. **Energy Research & Social Science**, v. 40, p. 82-88, 2018.
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.;THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**. n. 202, p.18-27, 2017.
- GOUDIE, A.S. **Encyclopedia of Geomorphology**. Volume 1. London: Ed. Routledge, 2004. 1202 p.
- GRANDJEAN, Gilles et al. Subsurface Structures Detection by Combining L-Band Polarimetric SAR and GPR Data: Example of the Pyla Dune (France). **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 39, n. 6, 2001.
- 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, n. 1, p. 65-74. 1988.
- GUERRA, Antonio Teixeira. **Dicionário geológico-geomorfológico**. 8. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993. 446 p.
- GUTIÉRREZ, Mateo. **Geomorfologia Climática**. Barcelona: Ediciones Omega, S.A., 2001. 642 p.
- GUTMAN, G., HUANG, C., CHANDER, G., NOOJIPADY, P., AND MASEK, J. G. Assessment of the NASA-USGS Global Land Survey (GLS) datasets. **Remote Sensing of Environment**, v. 134, p. 249– 265. 2013.
- HALL, F. G.; STREBEL, D. E.; NICKESON, J. E.; GOETZ, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensory images. **Remote Sensing of Environment**. v. 35, n. 1, p. 11-27, 1991.
- HARALICK, R., SHANMUGAN, K., AND DINSTEIN, I. Textural Features for Image Classification. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics** v. 3, no. 6, p. 610-621. 1973.
- HAYKIN, S. **Redes Neurais: princípios e prática**. Porto Alegre: Ed. Bookman, 2001.

HERMAS, EISayed; AL-GHAMDI, Khalid; NIANG, Abdoul Jelil. **A new approach for the determination of dune migration rates using time Séries aster images: a case study on sand dunes west makkah city** (2017). Disponível em: https://www.iau.edu.sa/sites/default/files/resources/t_4_-_elsayed_hermas.pdf. Acesso em: 11 jun, 2017.

HERMAS, EISayed; LEPRINCE, Sebastien; EL-MAGD, Islam Abou. Retrieving sand dune movements using sub-pixel correlation of multi-temporal óptical remote sensing imagery, northwest Sinai Peninsula, Egypt. **Remote Sensing of Environment**. n.121. p. 51-60. 2012.

HIERA, Mitchel; LIMA, Antonio; ZANELLA, Maria. Tendência da precipitação no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Climatologia**. Ano 15, v. 24, p. 300-321. JAN/JUN 2019

HONG, M. – G.; KIM, C. Standwise change detection for growing stock using repeat-pass ALOS PALSAR / PALSAR-2 data. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Volume XLI-B7. XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. 2016.

HOPLEY, David. **Encyclopedia of Modern Coral Reefs**. Netherlands: Ed. Springer Science+Business Media B.V. 2011. DOI 10.1007/978-90-481-2639-2

HSU, C. W., CHANG, C. C., AND LIN, C. J. **A practical guide to support vector classification**. 2007. National Taiwan University. Disponível em: <http://ntu.csie.org/~cjlin/papers/guide/guide.pdf>. Acesso em: 11 jun, 2019.

HUANG, C.; YANG, WYLIE L.; HOMER, COLLIN; AND ZYLSTRA, G. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. **Int. j. Remote Sensing**. v. 23, n. 8, p. 1741–1748. 2002

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**. n. 111, p. 319-334. 2012.

HURD, James et al. Coastal Area Land-Cover Change Analysis for Connecticut. *In*: WANG, Yeqiao (Ed). **Remote sensing of coastal environments**. Boca Raton: Taylor & Francis Séries in remote sensing applications. CRC Press. 2010. p. 333-354.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Malha Municipal Digital 2010**. Última actualizacao 2015. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>. Acesso em: 09 Out. 2016.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). INPE – DGI: português. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/index.php>. Acesso em: 11 de dezembro de 2017.

IWAHASHI, J. e PIKE, R. J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature.

Geomorphology, n. 86, p. 409–440. 2007.

JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Example-Based Retrieval of Alike Land-Cover Scenes From NLCD2006 Database. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 10, n. 1, p. 155-159. 2013.

JENERETTE, GD; POTERE, D. Global analysis and simulation of land-use change associated with urbanization. **Landscape Ecol.** n. 25, p. 657–670. 2010.

JENSEN, J. R., COWEN, D., NARUMALANI, S., and HALLS, J. Principles of change detection using digital remote sensor data. *In*: **Integration of Geographic Information Systems and Remote Sensing**. Cambridge: edited by J. L. Star, J. E. Estes, and K. C. McGwire. Cambridge University Press, 1997. pp. 37–54.

JENSEN, J.R., 2005. **Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005. 526 p.

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

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** v. 12, n. 12. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189292>. Acesso em: 09 Out. 2019.

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

KASSAWMAR; N.; RAO, K.; ABRAHA, G. An integrated approach for spatio-temporal variability analysis of wetlands: a case study of Abaya and Chamo lakes, Ethiopia. **Environ Monit Assess.** n. 80, p. 313–324. 2011. DOI 10.1007/s10661-010-1790-z

KRÜGUER, Carsten; LAKES, Tobia. Revealing Uncertainties in Land Change Modeling Using Probabilities. **Transactions in GIS**, v. 20, n. 4, p. 526–546. 2016.

KUX, Hermann Johann Heinrich; PINHEIRO, Eduardo da Silva. Dados do satélite Quickbird para o mapeamento do uso e cobertura da terra numa seção da Mata Atlântica no Estado do Rio Grande do Sul. *In*: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 4509-4516.

LAMBIN, E. F., and STRAHLER, A. H. Indicators of land-cover change for change vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales. **International Journal of Remote Sensing**, n. 15, p. 2099–2119. 1994.

LAM, Doris; REMMEL, Tarmo; DREZNER, Taly. Tracking Desertification in California Using Remote Sensing: ASand Dune Encroachment Approach. **Remote Sensing**, n. 3, p. 1 – 13. 2011.

LANCASTER, Nicholas; MCCARLEY-HOLDER, Grace. Decadal-scale evolution of a small dune field: Keeler Dunes, California 1944–2010. **Geomorphology**. v. 180-181, p. 281-291. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.017>

LANG, Stefan; BLASCHKE, Thomas. **Análise da paisagem com SIG**. Tradução Hermann Kux. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 424 p.

LEAL, J. R. L. V. **Zoneamento Geoambiental da Área de Proteção Ambiental de Canoa Quebrada – Aracati – Ceará**. 2003. 210 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LEE, Jong-Sen; POTTIER, Eric. **Polarimetric radar imaging: from basics to applications**. Boca Raton: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2009

LEPRINCE, S., S. BARBOT, F. AYOUB, AND J. AVOUAC. Automatic and Precise Orthorectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. n. 45, p. 1529–1558. 2007. doi:10.1109/TGRS.2006.888937.

LEVIN, N., BEN-DOR, E.; KARNIELI A. Topographic information of sand dunes as extracted from shading effects using Landsat images. **Remote Sensing of the Environment**. n. 90, p. 190-209. 2004.

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**. n. 56, p. 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**, 5. ed. New York: John Wiley & Sons. 2004. 763 p.

LIMA, M. C. Pesca artesanal, carcinicultura e geração de energia eólica na zona costeira do Ceará. **Revista Terra Livre – AGB**, v. 31, p. 1 -16, 2009.

LIAO, W.-H. Region Description Using Extended Local Ternary Patterns. In: (ICPR) 20th International Conference on Pattern Recognition, **Anais [...]**. p. 1003–1006 (Aug.). 2010.

LIU, William. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: ed. UNIDERP, 2007. 908 p.

LÓPEZ-ROLDÁN, P. AND FACHELLI, S., **Metodología de la investigación social cuantitativa**. Barcelona, España: Ed. Dipòsit Digital de Documents. Universitat Autònoma de Barcelona, 2015.

LU, D. et al. Change detection techniques. **Int. J. Remote Sensing**. v. 25, n. 12, p. 2365–2407. 2003. DOI: 10.1080/0143116031000139863

LUNETTA, Ross S.; ELVIDGE, Christopher. **Remote Sensing Change Detection**. London:Ed. Taylor & Francis Ltd., 1999.

MADUGUNDU, R.; AL-GAADI, K.A.; PATIL, V.C.; TOLA, E. Detection of land use and land cover changes in Dirab region of Saudi Arabia using remotely sensed imageries. **American Journal of Environmental Science**. v. 10, n. 1, p. 8-18, 2014. doi:10.3844/ajessp.2014.8.18

MAGALHÃES, Gledson Bezerra; DA SILVA, Edson Vicente. Da teoria à prática: as unidades geoambientais e sua contribuição para o planejamento territorial cearense. VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física. Coimbra: **Anais** [...]. II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física. Universidade de Coimbra, 2010. Disponível em: <https://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema3/gledson>.

MAIA, Luís; FREIRE, George; MORAIS, Jáder; RODRIGUES, Angela; PESSOA, Paulo; MAGALHÃES, Silvania. Dynamics of coastal dunes at Ceará state, northeastern Brazil: dimensions and migration rate. **Arq. Ciên. Mar**, Fortaleza. n. 34, p. 11 - 22. 2001.

MATHER, P. M. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction**. 3. ed. England: John Wiley & Sons Ltd, 2004.

MEIRELLES, A. J. A. Geodinâmica dos Campos de Dunas Móveis de Jericoacoara/CE-BR. **Mercator - Revista de Geografia da UFC**, v. 10, n. 22, mayo-agosto, 2011, pp. 169-190.

MEIRELES, A. J. A. **Geomorfologia costeira: funções ambientais e sociais**. Fortaleza: Edições UFC, 2012.

MEIRELES, A.J. A, GORAYEB, A, SILVA, D.R.F, LIMA, G.S. Socio-environmental impacts of wind farms on the traditional communities of the western coast of Ceará, in the Brazilian Northeast. England: Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), **Journal of Coastal Research**, Special Issue n. 65, p. 81-86. 2013.

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

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.; ALMEIDA, Tati de (Org). **Introdução ao processamento de imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: UNB, 2012. 266 p.

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**. Fortaleza: Editora FUNECE, 2000. p: 106-180.

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.

MORAIS, Jader; FREIRE, George. Plataforma Continental. *In*: Campos, A. Alves (coord.). **A Zona Costeira do Ceará. Diagnóstico para Gestão Integrada**. Fortaleza: Associação de Pesquisa e Preservação de Ecossistemas Aquáticos – AQUASIS, 2003. cap 2. p.28-82.

MORAIS, J.; FREIRE, G.; PINHEIRO, L.; SOUZA, M.; CARVALHO, A.; PESSOA, P.; OLIVEIRA, S. Ceará. *In*: Muehe, Dieter (org). **Erosão e programação o litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. 476 p.

MOREIRA, Adriana; FERNANDES, Fernando; NERY, Cesar. Aplicação do Algoritmo Support Vector Machine na Análise Espaço-temporal do Uso e Ocupação do Solo na Bacia do Rio Vieira. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia v. 15, n. 50 Jun/2014 p. 152–163. 2014.

MOREIRA, E. et al. Comparação e desempenho de algoritmos paramétricos na classificação supervisionada de áreas naturalmente heterogêneas e dinâmicas. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 68/3, p. 581-594. 2016.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Viçosa: Editora UFV, 2005. 320 p.

MORENO, Gaspar. **Análisis Del Cambio De Uso Y Cobertura Del Suelo Y Su Impacto En Los Servicios Ambientales En El Bosque Pachoche En El Cantón Manta De La Provincia De Manabí** " 2017. (Trabajo de titulación). Maestria en Cambio Climático. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2017.

MORO, M. et al. Vegetação, unidades fitoecológicas e diversidade paisagística do Estado do Ceará. **Rodriguésia**. v. 66, n.3, p. 717-743. 2015. DOI: 10.1590/2175-7860201566305

MUNIZ, L.; PEREIRA, J.; XIMENES, C.; STUDAR, T. Classificação climática para o estado do Ceará utilizando distintos sistemas de caracterização. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Florianópolis 2017 – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/abrh/Eventos/Trabalhos/60/PAP022393.pdf>

MUÑOZ-MARÍ, Jordi et al. Multi-temporal image classification with kernels. *In*: CAMPS-VALLS, G; BRUZZONE, L. **Kernel Methods for Remote Sensing Data Analysis**. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd. 2009. p. 444.

LÍQUIDA, Maria. Evolução geomorfológica da foz do rio Jaguaribe / Ceará. **Mercator** - Revista de Geografia da UFC, ano 06, n. 11, 2007. p.128.

NELSON, Stacy; KHORRAM, Siamak. **Image processing na data Analysis with Erdas Imagine**. Boca Raton, Florida: CRC press. Taylor & Francis Group, 2019.

NIELSEN, A. A.; CONRADSEN, K.; SIMPSON, J. J. Multivariate alteration detection (MAD) and MAF post-processing in multispectral, bitemporal image data: New approaches to change detection studies. **Remote Sensing of Environment**. v. 64, p. 1–19, 1998.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 28. ed. Rio de Janeiro: ZBGE. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 421 p.

NÓBREGA, M. **Detecção da expansão da soja no bioma pampa a partir de atributo espectro-temporal e classificação orientada a objeto**. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

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.

OJALA, T., PIETIKAINEN, M., MAENPAA, T., 2002. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, n. 24, p. 971–987.

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.

OLIVEIRA, Thiago; GALVINCIO; Josicleda. Uso e cobertura do solo em áreas semiáridas do nordeste do Brasil. **Revista de Geografia (UFPE)** v. 28, n. 1, 2011.

PAILLOU, Philippe. Mapping Palaeohydrography in Deserts: Contribution from Space-Borne Imaging Radar. **Water**. n. 9, p. 194; 2017. doi:10.3390/w9030194

PAISLEY, Elizabeth C. I.; LANCASTER, Nicholas; GADDIS, Lisa R.; GREELEY, Ronald. Discrimination of Active and Inactive Sand from Remote Sensing: Kelso Dunes, Mojave Desert, California. **REMOTE SENS. ENVIRON**. n 37, p. 153-166. 1991.

PALUBINSKAS, Gintautas; MAKARAU, Aliaksei; REINARTZ, Peter. Multi-sensor remote sensing information fusion for urban area classification and change detection. Architectures, Algorithms, and Applications. **Proc. of SPIE**. v. 8064, 80640F. 2011. doi: 10.1117/12.883767

- 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.
- PANIZZA, Andrea; FONSECA, Fernanda. Técnicas de interpretação visual de imagens. **GEOUSP – espaço e tempo**, São Paulo – SP, n. 30, p. 30-43, 2011.
- PANTZE, Andreas; SANTORO, Maurizio; FRANSSON, Johan. Change detection of boreal forest using bi-temporal ALOS PALSAR backscatter data. **Remote Sensing of Environment**, n. 155, p. 120–128. 2014.
- PAULA, Jorge. **Dinâmica morfológica da planície costeira do Estado do Piauí: evolução, comportamento dos processos costeiros e a variação da linha de costa**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Topicais). Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- PEDRAZA, Javier. **Geomorfología: Principios, Métodos y Aplicaciones**. Madrid: Editorial Rueda, S.L., 1996.
- PEDROSA, Adriana. **A geodinâmica e morfogênese das dunas eólicas no Município de Canoa Quebrada, Aracati, Ceará, Brasil**. 2016. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- PEÑAS, J. et al. Habitat fragmentation in arid zones: a case study of *Linaria nigricans* under land use changes (SE Spain). **Environ Manage**. 48:168–176. 2011.
- PEREIRA, G.; MORAES, E. C.; ARAI, E.; OLIVEIRA, L. G. L. Estudo preliminar da comparação entre a reflectância obtida in situ e a estimada pelo satélite MODIS/Terra. *In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis. Anais [...]. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.*
- PEREIRA, R. C. SILVA, E.V. Solos e Vegetação do Ceará: características gerais. *In: Silva, J.B; CAVALCANTE, T. DANTAS, E.W. C (Org). Ceará, um novo olhar geográfico*. Fortaleza; Edições Demócrito Rocha, 2005.
- PINHEIRO, M. V. A; SALES, M. C. L. Determinação do balanço hídrico como subsídio para o estudo da dinâmica costeira cearense. *In: Anais [...]. XII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Natal, UFRN, 8 a 13 de julho de 2007.*
- PONTIUS JR., Robert G.; SHUSAS, Emily; MCEACHERN, Menzie. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. **Agric. Ecosyst. Environ**. v. 101, n. 2–3, p. 251–268, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>. Acesso em: 05 jul. 2019.
- PONTIUS JR., Robert Gilmore; SANTACRUZ, Alí. Quantity, Exchange and shift components of difference in a square contingency table. **Int. J. Remote Sens**. v. 35, n. 21, p. 7543–7554. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.969814>. Acesso em: 09 jul. 2019.

- PONZONI, F.; SHIMABUKURO, Y.; KUPLICH, T. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160 p.
- PONZONI, F. et al. **Calibração de sensores orbitais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- PYE, K.; TSOAR, H. **Aeolian Sand and Sand Dunes**. Berlin Heidelberg: Ed. Springer-Verlag, 2009.
- QIU, Shi; ZHU, Zhe; HE, Binbin. Fmask 4.0: Improved cloud and cloud shadow detection in Landsats 4–8 and Sentinel-2 imagery. **Remote Sensing of Environment**. n. 231. 111205. 2019.
- 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**, n. 13, p. 415-425. 1992.
- QUINTANA, Gabriela et al. Detección de cambios incoherente con imágenes SAR. Caso: sur del Tocuyo, Venezuela. **Anais [...]**. II Congreso Venezolano De Tecnología Espacial. Caracas. 2017.
- RAHMAN, Shoumik; MESEV, Victor. Change Vector Analysis, Tasseled Cap, and NDVI-NDMI for Measuring Land Use/Cover Changes Caused by a Sudden Short-Term Severe Drought: 2011 Texas Event. **Remote Sens**. v. 11, n. 19, p. 2217. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11192217>
- RAY, Terrill W.; MURRAY, Bruce C. Nonlinear Spectral Mixing in Desert Vegetation. **Remote Sensing of Environment**. n. 55, p. 59 - 64. 2019.
- RIAÑO, Orlando. Consideraciones y métodos para la detección de cambios empleando imágenes de satélite en el Municipio de Paipa. **Colombia Forestal**. v. 7, n. 15, p. 41-62. 2002.
- RIBEIRO, Rômulo; BAPTISTA, Gustavo; BIAS, Edílson. Comparação dos métodos de classificação supervisionada de imagem Máxima Verossimilhança e Redes Neurais em ambiente urbano. *In*: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 5471-5478.
- RICHARDS, John; JIA, Xiuping. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. An Introduction. 4. ed. Berlin Heidelberg: Ed. Springer-Verlag, 2006
- RIGNOT, E.; van ZYL, J. Change detection techniques for ERS-1 SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 31, n. 4, p. 896–906. 1993.
- ROBAINA, L.; TRENTIN, R.; LAURENT, F. Compartimentação do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, através do uso de geomorphons obtidos em classificação topográfica automatizada. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 17, n. 2, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i2.857>. Acesso em: 18 set. 2018.

ROSENQVIST, A.; SHIMADA, M.; WATANABE, M. ALOS PALSAR: Technical outline and mission concepts. *In: 4th International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*, 2004, Innsbruck. **Anais** [...]. Austria, November 16-19, 2004.

ROUSE, J.W.; HASS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *In: Earth Resources Technology Satellite - 1 Symposium*, 3., 1973, Washington: Proceedings. NASA, 1974. p.309-317.

SANO, E.; SANTOS, E.; MENESES, P. Análise de imagens do satélite alos palsar para o mapeamento de uso e cobertura da terra do distrito federal. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 28, n. 4, p. 441-451, 2009.

SANTANA, L. M.a; SALAS, J. Análisis de Cambios en la Ocupación del Suelo Ocurredos en Sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, Usando Imágenes Landsat. **GeoFocus**, nº 7, p. 281-313. 2007.

SANT'ANNA, Sidnei. **Curso Introdução ao sensoriamento remoto por RADAR**. Santa Maria: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais. 2009.

SANTOS, Alice. **A Energia Eólica no litoral do NE no Brasil. Desconstruindo a "sustentabilidade" para promover "justiça ambiental"**. Tübingen/Rio de Janeiro. Em: Heinrich-Böll-Stiftung. 2014. Disponível em: <http://br.boell.org>. Acesso em 14 de julho de 2017.

SANTOS Reginaldo J. **Cadeias de Markov**. Departamento de Matemática-ICEx, 22 de março de 2006. Disponível em: <http://www.mat.ufmg.br/~regi/gaalt/markov.pdf>. Acesso em 14 de junho de 2019.

SAMARAWICKRAMA, Udaranga; PIYARATNE, Dimuthu; RANAGALAGE, Manjula. Relationship between NDVI with Tasseled cap Indices: A Remote Sensing based Analysis. **International Journal of Innovative Research in Technology**. Volume 3 Issue 12. May 2017.

SALAS, Javier; AGUILERA, Francisco. **Seguimiento y modelación de procesos dinámicos I y II**. Análisis temporal y detección de cambios en Teledetección. Master en Tecnologías de la Información. 15-23 de abr. de 2019. 120 p. Notas de Aula.

SCARAMUZZA, Pat; MICIJEVIC, Esad; CHANDER, Gyanesh. **SLC Gap-Filled Products Phase One Methodology**. USGS, 2004. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-7-slc-gap-filled-products-phase-one-methodology>. Acesso em: 15 feb. 2019.

SCCOTI, Anderson. **Estudo e zoneamento geoambiental com auxílio de sig na bacia hidrográfica do rio Santa Maria: sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul**. 2017. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SCHABER, G.; MCCAULEY, J. F.; BREED, C. S.; OLHOEFT, G. R. Shuttle imaging radar: Physical controls on signal penetration and subsurface scattering in the Eastern Sahara. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing**. vol. GE-24, pp. 603–623, 1986.

SCHEUCL, B., T. ULLMANN AND F. KOUDOGBO. Change Detection using High Resolution TerraSAR-X Data Preliminary Results. The international archives of the photogrammetry remote sensing and spatial information sciences. **Anais [...]**. Proceedings. xxxviii. 6 p. 2009.

SETTLE, J. J.; DRAKE, N. A. Linear mixing and the estimation of ground cover proportions. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 6, p. 1159-1177, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431169308904402>. Acesso em 14 de junho de 2019.

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

SHIMABUKURO, Yosio Edemir; NOVO, Evelyn 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

SCHMIDT, J.; HEWITT, A. Fuzzy Land Element Classification from DTMs Based on Geometry and Terrain Position. **Geoderma**. v. 121, p. 243–256. 2004.

SCHOTT, John R. **Remote Sensing The Image Chain Approach**. 2. ed. New York: Ed. Oxford University Press, Inc., 2007.

SCHOTT, J. R., C. SALVAGGIO AND W. J. VOLCHOK. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. n. 26, p. 1-16. 1988.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing**. 3. ed. USA: Elsevier Inc., 2007.

SCHULTZ, Bruno et al. Classificação orientada a objetos em imagens multitemporais Landsat aplicada na identificação de cana-de-açúcar e soja. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 68, n. 1, p. 131-143. 2016.

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**. Fortaleza: Secretaria da Infra-Estrutura do Governo do Estado do Ceará. 2004.

SEMACE – Superintendência Estadual do Meio Ambiente; GEOAMBIENTE.

Relatório 04413_SEMACE: Reestruturação e Atualização do Mapeamento do Projeto Zoneamento Ecológico Econômico Do Ceará – Zona Costeira e Unidades de Conservação Costeiras. Fortaleza: SEMACE, 2015.

SEMACE – Superintendência Estadual do Meio Ambiente. **Reestruturação e atualização do mapeamento do projeto Zoneamento Ecológico-Econômico do Ceará –zona costeira e unidades de conservação costeiras-Relatório final de caracterização ambiental e dos mapeamentos**. Superintendência Estadual do Meio Ambiente; Fortaleza: GEOAMBIENTE – SEMACE, 2016.

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**. n. 27, p. 28–41, 2007.
doi:10.1016/j.apgeog.2006.09.004

SINGH, Ashbindu. Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **Int. J. Remote Sensing**. v. 10, n. 6, 989-1003. 1989.
doi=10.1080/01431168908903939

SILVA, E.V. **Geocologia da paisagem do litoral cearense: uma abordagem ao nível de escala regional e tipológica**. 1998. Tese (Professor titular). Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geografia, Fortaleza, 1998.

SILVA, Wildes. **Aplicação da técnica de modelo linear de mistura espectral (MLME) para o mapeamento de diferentes tipos de água no rio Solimões e no Lago de Coari utilizando imagens Landsat-5 TM**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, C.; FISCH, G. Análise do comportamento da precipitação em Taubaté - SP na escala de tempo diária em comparação com os eventos de El Niño e La Niña. **Rev. Ambient. Água**. Taubaté, v. 8 (suplemento), p. 253-268, 2013.

SILVA SCHWEITZER, Andrea Marcela; RUBIO FARINELLI, María Laura. Análisis de cambios de uso del suelo en la Delegación Municipal de Ingeniero White (Buenos Aires, Argentina): aplicación de geotecnologías. **Cuadernos de Geografía. Revista Colombiana de Geografía**. v. 23, n. 1, ene.-jun. del 2014.

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

SOUZA, M.J.N. Contribuição ao estudo das unidades-morfoestruturais do Estado do Ceará. **Revista de geologia**, v. 1, p. 73-91, Edições Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1988.

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

Souza, M. J. N. de & Carvalho, G. M. B. S. **Compartimentação geoambiental do Estado do Ceará**. Fortaleza: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2009.

SUGUIO, K. Tópicos de geociências para o desenvolvimento sustentável: as regiões litorâneas. **Geologia USP, Série Didática**, São Paulo, v. 2, n. 1, 40 p. 2003.

SZUSTER, Brian; CHEN, Qi; BORGER, Michael. A comparison of classification techniques to support land cover and land use analysis in tropical coastal zones. **Applied Geography**. n. 31, p. 525-532. 2011.

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

THAKKAR, Ameer K.; DESAI, Venkappayya R.; PATEL, Ajay; POTDAR, Madhukar B. An effective hybrid classification approach using tasseled cap transformation (TCT) for improving classification of land use/land cover (LU/LC) in semi-arid region: a case study of Morva-Hadaf watershed, Gujarat, India. **Arab J Geosci**. n. 9, p. 180. 2016. DOI 10.1007/s12517-015-2267-8

TROPPEMAIR, Helmut; GALINA, Marcia. Geossistemas. **Mercator** - Revista de Geografia da UFC, Fortaleza, ano 05, n. 10, 2006.

TSO, Brandt; MATHER, Paul. **Classification methods for remotely sensed data**. 2. ed. Boca Raton: Ed. CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, 2009.

UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat 4-7 Surface Reflectance (LEDAPS) Product Guide**. Version 2.0. USGS. May 2019a. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-4-7-surface-reflectance-code-ledaps-product-guide>. Acesso em: 20 jun. 2019.

UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat 8 Surface Reflectance Code (LASRC) Product Guide**. Version 2.0. USGS. May 2019b. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/files/land-surface-reflectance-code-lasrc-product-guide>. Acesso em: 20 jun. 2019

UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **SLC-off Gap-Filled Products Gap-Fill Algorithm Methodology. Phase 2 Gap-Fill Algorithm**. USGS. 2004. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/L7SLCGapFilledMethod.pdf>. Acesso em: 21 fev 2019.

VALDEZ, Jaime. **Imágenes de satélite y su escala de producción (precisión vs escala)**. Imagery, GIS & Development. 2012. Disponível em: <https://jvaldezch.wordpress.com/curriculum/>. Acesso em: 23 nov. 2017

VALENÇA, Lúcia et al. **Eolianitos de Fernando de Noronha: uma análise integrada de estudos petrográficos e geoquímicos**. 2005. Disponível em: www.abequa.org. Acesso em: 23 set. 2017.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.3, p.539-546, 2003.

VAPNIK, V. N. **The Nature of Statistical Learning Theory**. 2. ed. New York: Ed. Springer Verlag, 2000.

VOISIN, Aurélie et al. Supervised Classification of Multisensor and Multiresolution Remote Sensing Images With a Hierarchical Copula-Based Approach. **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, v. 52, n. 6. p. 3346-3358. 2014.

VOUSDOUKAS, M.I; VELEGRAKIS, A.F; PLOMARITI, T.A. Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts. **Earth-Science Reviews**, v. 85, p. 23-46, 2007.

WANG, Fugui; XU; Y. Jun. Comparison of remote sensing change detection techniques for assessing hurricane damage to forests. **Environ Monit Assess**. n. 162, p. 311–326. 2010. DOI 10.1007/s10661-009-0798-8

WANG, Le; SILVÁN-CÁRDENAS, José L., YANG, Jun; FRAZIER, Amy E. Invasive Saltcedar (*Tamarisk* spp.) Distribution Mapping Using Multiresolution Remote Sensing Imagery, **The Professional Geographer**, v. 65, n. 1, p. 1-15. 2013. DOI: 10.1080/00330124.2012.679440

WASKE, Björn; BRAUN, Matthias. Classifier ensembles for land cover mapping using multitemporal SAR imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** n. 64, p. 450-457. 2009.

WHITE, J. C.; WULDER, M. A.; HOBART, G.W.; LUTHER, J.E.; HERMOSILLA, T.; GRIFFITHS, P.; COOPS, N. C.; HALL, R. J.; HOSTERT, P.; DYK, A. & GUINDON, L. Pixel-Based Image Compositing for Large-Area Dense Time Series Applications and Science. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 40, n.3, p. 192-212, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07038992.2014.945827>. Acesso em: 23 mar. 2019.

XIA, J.; DONG, P. A GIS add-in for automated measurement of sand dune migration using LiDAR-derived multitemporal and high-resolution digital elevation models: **Geosphere**. v. 12, n. 4, p. 1316–1322, 2016. doi:10.1130/GES01329.1.

XIONG, Boli et al. A Threshold Selection Method Using Two SAR Change Detection Measures Based on the Markov Random Field Model. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**. v. 9, n. 2. 2012.

YAO, Z. Y. et al. Migration of Sand Dunes on the Northern Alxa Plateau, Inner Mongolia, China. **Journal of Arid Environments**. n. 70, p. 80–93. 2007. doi:10.1016/j.jaridenv.2006.12.012.

ZANELLA, Maria Elisa. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. **Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente**, n. 36, Volume Especial, p. 126-142, 2014.

ZANOTTA, D.; HAERTEL, V. Gradual Land Cover Change Detection based on Multitemporal Fraction Images. **Pattern Recognition**, v. 45, p. 2927-2937, 2012.

ZHOU, Qiming; LI, Baolin; CHEN, Yumin (2011). Remote Sensing Change Detection and Process Analysis of Long-Term Land Use Change and Human Impacts. **AMBIO**. n. 40, p. 807–818. 2011. DOI 10.1007/s13280-011-0157-1

ZHU, Zhe; WOODCOCK, Curtis E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**. n. 118, p. 83–94. 2012.

ZHU, Zhe; WANG, Shixiong; WOODCOCK, Curtis E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images. **Remote Sensing of Environment**. n. 159, p. 269–277. 2015.

ZHUO, Rongming; XU, Linlin; PENG, Junhuan; CHE, Yuanpeng. Spectral Unmixing Analysis Of Time Séries Landsat 8 Images. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, **Anais** [...]. Volume XLII-3, 7–10 May. 2018. Disponível em: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-3/2609/2018/isprs-archives-XLII-3-2609-2018.pdf>. Acesso em: 23 set. 2019.