



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Mapeamento multitemporal do uso e cobertura da terra da planície costeira do estado do Piauí¹

Roneide dos Santos Sousa², Gustavo Souza Valladares³, Giovana Mira de Espindola⁴

¹Resultado da pesquisa de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Piauí (UFPI).

²Doutoranda em Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Ceará (UFC), Autor correspondente: roneide_2@hotmail.com. ³Doutor, Pesquisador, Professor, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Piauí (UFPI), valladares@ufpi.edu.br. ⁴Doutora, Pesquisadora, Professora, Coordenadora do Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Federal do Piauí (UFPI), giovanamira@ufpi.edu.br.

Artigo recebido em 12/07/2016 e aceito em 10/08/2016

RESUMO

A planície costeira piauiense é caracterizada por uma diversidade natural de ecossistemas que vêm sendo transformados como resultado de diferentes tipos de processos antrópicos. Neste contexto, o objetivo deste artigo é analisar a dinâmica do uso e cobertura da terra do litoral do Piauí, mapeando os principais alvos do sistema costeiro a partir de imagens Landsat de 1999 e 2013. Os mapas temáticos foram gerados pelo método supervisionado de classificação de imagens, tendo-se com referência doze classes temáticas de interesse. Os resultados mostram quantitativamente: perda de cobertura natural, perda de corpos hídricos naturais e o surgimento de novos corpos hídricos (artificiais), crescimento da mancha urbana, principalmente nas cidades de Parnaíba e Luís Correia, e mostram também o aumento significativo da carcinicultura em áreas próximas a manguezais, bem como o deslocamento natural de dunas móveis em áreas específicas da planície costeira piauiense. Por fim, perfis temporais do *Enhanced Vegetation Index* (EVI) foram construídos para amostras de dunas móveis estabilizadas e dunas móveis recentes com o objetivo de descrever temporalmente o processo de movimentação dunária.

Palavras-chave: ambiente costeiro, dinâmica temporal, sensoriamento remoto, Landsat.

Multitemporal mapping of land use and land cover of the coastal plain of the state of Piauí

ABSTRACT

The coastal plain of the state of Piauí is characterized by a natural diversity of ecosystems that have been transformed as a result of different types of anthropic processes. In this context, the goal of this paper is to analyze the dynamics of land use and land cover in the coast of Piauí, mapping the main targets of the coastal system from Landsat images taken in 1999 and 2013. The thematic maps were generated using the method of supervised image classification, having as reference twelve thematic classes of interest. The results show quantitatively: loss of natural cover, loss of natural water bodies and the emergence of new water bodies (artificial), growth of urban sprawl, especially in the cities of Parnaíba and Luís Correia, and also show the significant increase in shrimp farming in areas near to mangroves, as well as the natural displacement of moving sand dunes in specific areas of the coastal plain of the Piauí state. Finally, temporal profiles of the *Enhanced Vegetation Index* (EVI) were built for samples of stabilized moving sand dunes and recent moving sand dunes in order to describe the moving sand dunes process temporally.

Keywords: coastal environment, temporal dynamics, remote sensing, Landsat.

Introdução

Os termos *zona costeira* e *ambiente costeiro* são comumente usados na literatura das ciências ambientais e resultam em uma variedade de interpretações. Em termos gerais, pode-se dizer que as zonas costeiras são sistemas ambientais complexos formados nas áreas de interação direta

entre componentes da geosfera (continente), hidrosfera (oceanos e águas doces) e atmosfera, estendendo-se desde a planície costeira até a borda da plataforma continental (Marroni et al., 2005; Asmus et al., 2006).

As zonas costeiras são consideradas as áreas mais críticas aos impactos das mudanças

climáticas globais, sendo regiões diretamente atingidas pelo aumento do nível do mar, pela exposição a eventos extremos, pela elevação de temperatura e acidificação dos oceanos (Klein e Nicholls, 1999; Spalding et al., 2014).

Em escala global, os ecossistemas costeiros ocupam apenas uma pequena área se comparados a porção total do globo, mas é neles que se concentra a maior parte da população e a maioria das atividades econômicas. No Brasil, a planície costeira, sob seus aspectos físicos, é uma zona de comprimento aproximado de 8.000 km e largura variável, que ao longo de toda a sua extensão perpassa diferentes ambientes climáticos, geológicos e geomorfológicos.

Em termos morfológicos, a planície costeira brasileira apresenta uma superfície caracterizada por cordões litorâneos e rochas praias, com os deltas e estuários de alguns dos principais rios e lagunas do Brasil (Caldas et al., 2006).

Historicamente, grande parte da costa brasileira vem sofrendo processos antrópicos, principalmente em áreas urbanizadas. Em geral, conflitos socioeconômicos e ambientais dos diversos tipos de uso da zona costeira brasileira são inevitáveis, e toda esta região enfrenta uma gama crescente e desordenada de pressões com características naturais e humanas.

Assim, os sistemas ambientais litorâneos apresentam-se como áreas de elevada complexidade, devido as trocas de matéria e energia existentes nos processos de interação entre mar e continente. As atividades antrópicas desenvolvidas nestas zonas sobrecarregam a capacidade dos sistemas, criando um cenário de elevada fragilidade ambiental, e tornando de grande relevância o conhecimento sobre o uso e cobertura da terra nestes ambientes (da Silva Seabra e Cruz, 2013; Travalini e da Cunha, 2016).

Para Fernandes e Amaral (2013), a noção exata da distribuição e da área ocupada por uma duna, pela vegetação natural, por áreas urbanas, pela agricultura ou pelo solo exposto, bem como informações sobre suas mudanças, se tornam cada vez mais necessárias aos tomadores de decisões a nível municipal, estadual e federal.

No nordeste brasileiro setentrional, e mais especificamente na costa litorânea do estado do Piauí, que se estende do Delta do Parnaíba ao limite do estado do Ceará, a zona litorânea constitui-se de ambientes diversos, que podem ser agrupados em duas grandes regiões: a região do Delta do Parnaíba, onde se concentra grande parte da população litorânea do Piauí; e a região na qual a feição local característica é o grande acúmulo arenoso que o arrasto das correntes marítimas deposita em toda esta parte setentrional do nordeste brasileiro.

Estas duas regiões do litoral piauiense encontram-se em processo de transformação, em parte por apresentarem grande potencial turístico, e por serem alvos de uma recente e intensa ocupação desordenada, derivada de especulação imobiliária, agropecuária, entre outros.

Desta forma, este artigo tem por objetivo analisar a dinâmica do uso e cobertura da terra da planície costeira do estado do Piauí entre 1999 e 2013, utilizando dados multitemporais dos sensores orbitais ETM⁺ e OLI, e buscando a caracterização do processo de mudança temporal desta porção do litoral brasileiro. Para a caracterização do processo da movimentação dunária foram usadas amostras de perfis temporais do *Enhanced Vegetation Index* (EVI) para Dunas Móveis estabilizadas e Dunas Móveis recentes.

Material e métodos

Área de estudo

A planície costeira do estado do Piauí está localizada na porção norte do litoral piauiense e no nordeste setentrional do Brasil. Apresenta uma linha de costa de 66 km no sentido leste-oeste, que vai desde a baía das Canárias no Delta do Parnaíba até o limite com Ceará, na baía formada na foz dos rios Ubatuba e Timonha. Incluídos nesta área encontram-se os municípios litorâneos de Parnaíba, Luís Correia, Cajueiro da Praia e Ilha Grande de Santa Isabel. No sentido sul-norte, localiza-se entre o Grupo Barreiras e o Oceano Atlântico (Figura 1).

Neste artigo foi utilizado o recorte da área referente as folhas topográficas SUDENE/DSG Parnaíba (SA-24-Y-A-IV) e Bitupitá (SA-24-Y-A – V), ambas na escala 1:100.000. A área de estudo integra ainda parte da Área de Proteção Ambiental (APA) do Delta do Parnaíba, criada em 1996, e formada por grandes extensões de praias arenosas que formam diferentes paisagens de importância socioeconômica e ambiental.

Na planície costeira piauiense predominam sedimentos recentes do período Terciário e Quaternário. Ocorrem os sedimentos Terciários do Grupo Barreiras e os sedimentos Quaternário representados pelos depósitos praias, eólicos, marinhos e lagunares, bem como depósitos colúvio-aluvionares.

As unidades geomorfológicas que compõem a área em estudo compreendem os relevos de agradação, onde predominam os processos deposicionais, que por sua vez podem ser do tipo continental (planície fluvial) ou litorâneo (planície costeira, as planícies flúvio-marinha, planícies colúvios-alúvio-marinhas, e as planícies flúvio-lagunares), e os relevos de degradação (Tabuleiros Litorâneos), onde predominam os processos erosivos.

As classes de solos que podem ser encontradas na área de estudo, são por exemplo os Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Flúvicos, Cambissolos Háplicos, Vertissolos, Gleissolos Háplicos, Gleissolos Sálícos, os Planossolos Nátricos, os Planossolos Háplicos, os Latossolos Amarelos, os Argissolos Am Nearelos e os Espodossolos.

A planície costeira do Piauí possui índices elevados de precipitação pluviométrica, porém, com valores que variam bastante ao longo do ano. A distribuição das chuvas na região se divide em dois períodos distintos: o período chuvoso, que se inicia em dezembro e se prolonga até abril ou maio, com precipitações de grande intensidade, com máxima

de 298,40 mm no mês de março; e o período seco, que corresponde aos meses de junho até novembro, quando as precipitações são esparsas, alcançando a mínima de 1,10 mm no mês de setembro.

Quanto às unidades de vegetação, estas desenvolvem-se em praia, dunas, manguezal, ao longo dos cursos de água e nos tabuleiros, apresentando diferenciações decorrentes das variações na composição edáfica e da profundidade do lençol freático. Ocorrem espécies pioneiras de estrato herbáceo (gramíneas), vegetação litorânea de porte arbóreo arbustivo e herbáceo arbustivo, vegetação de mangue altamente especializada e elevado nível de salinidade, e vegetação ciliar característica.

LOCALIZAÇÃO DA PLANÍCIE COSTEIRA DO ESTADO DO PIAUÍ

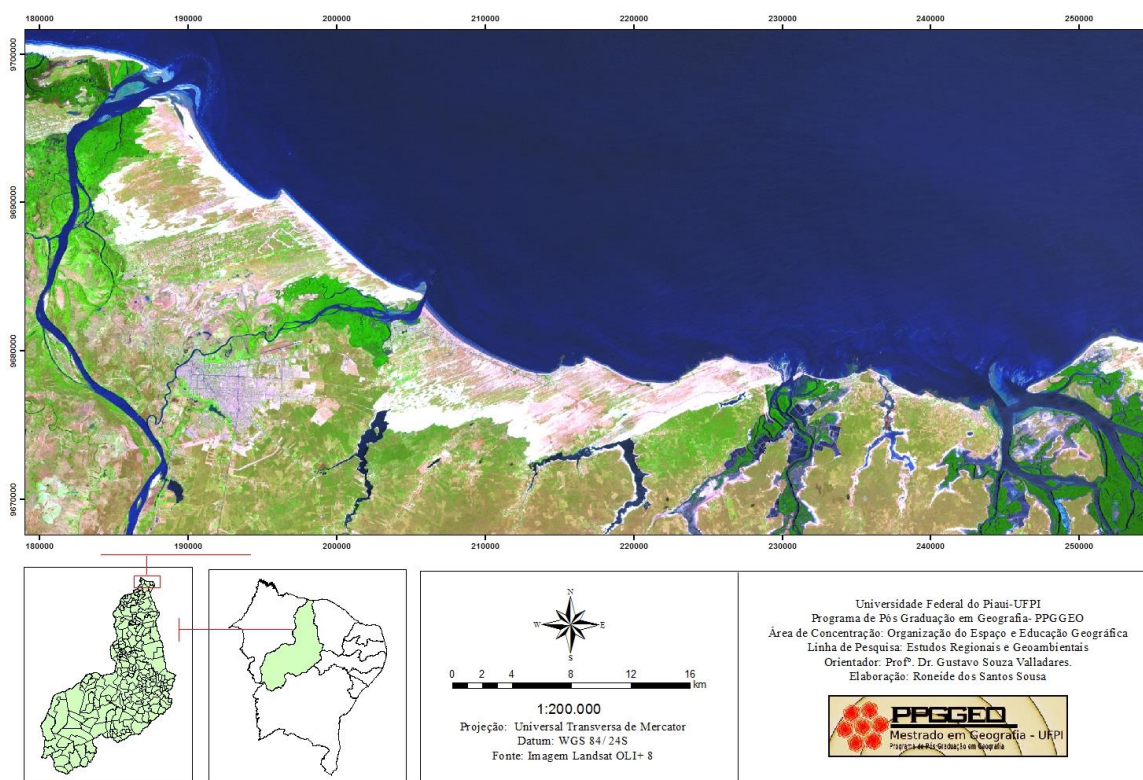


Figura 1 – Mapa de localização da planície costeira do estado do Piauí.

Mapeamento do uso e cobertura da terra

De acordo com Florenzano (2008), as características das imagens de sensoriamento remoto, como resolução espacial, resolução espectral, composição colorida e data, devem ser selecionadas considerando-se os alvos de interesse e as características da área de estudo, representadas, por exemplo, pela textura topográfica, pelo clima, e pelos tipos de uso e cobertura da terra.

Desta forma, como os ambientes da superfície terrestre são dinâmicos, a data da imagem é uma informação extremamente importante, pois a imagem é uma representação estática de uma porção

da superfície da terra no momento da passagem do satélite, e sua escolha depende do tipo de aplicação (Jensen, 2007; Richards, 2012).

Neste artigo foram utilizadas imagens ortorretificadas dos satélites Landsat-7 e Landsat-8, com resolução espacial de 30 m, obtidas gratuitamente pelo site do U. S. Geological Survey (USGS) (Loveland e Dwyer, 2012).

O Landsat-7 é considerado um satélite da classe multiespectral e de média resolução espacial, com revisita da mesma área a cada 16 dias. O satélite Landsat-7 traz a bordo o sensor ETM⁺ que coleta imagens que cobrem no terreno uma área

projetada de 185 km x 185 km, com resolução radiométrica de 8 bits.

O Landsat-8 entrou em operação em 2013 com vistas a substituir seus antecessores, e passou a disponibilizar imagens gratuitas a partir do segundo semestre deste mesmo ano. O sensor OLI, a bordo do satélite Landsat-8, coleta imagens com características semelhantes ao ETM⁺, e com resolução radiométrica de 12 bits (Wulder et al., 2008; Wulder et al., 2012; Markham et al., 2015).

Assim, todas as imagens utilizadas apresentam resolução espacial de 30 m nas bandas multiespectrais que cobrem o intervalo espectral do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio. Para este artigo foram selecionadas imagens com a menor cobertura de nuvens disponíveis no período de seca. Foi selecionada a cena de 02/08/1999 do sensor ETM⁺ do satélite Landsat-7, e a cena de 03/10/2013 do sensor OLI do satélite Landsat-8, ambas da órbita-ponto 219/62.

A primeira etapa metodológica consistiu na criação do recorte das imagens das diferentes datas de acordo com a área de estudo estabelecida (Figura 1). Em seguida, foram realizadas as etapas de definição dos alvos de interesse e posterior

classificação das imagens pelo método supervisionado. Assim, partiu-se do mapeamento dos usos da terra como forma de representação cartográfica do território costeiro.

Com base na seleção das imagens foram realizadas duas inspeções de campo, nas quais percorreu-se toda a extensão existente entre os municípios de Ilha Grande de Santa Isabel e Cajueiro da Praia. Nestas visitas foi utilizado um receptor GPS a fim de identificar alvos de interesse e facilitar a localização dos mesmos. O primeiro campo objetivou o conhecimento da área de estudo, bem como a coleta de amostras de alvos de interesse selecionados a partir da interpretação visual preliminar das imagens Landsat. Já a segunda inspeção objetivou a validação dos alvos já mapeados.

Com base na interpretação visual da composição colorida falsa-cor 6(R)5(G)4(B) do sensor ETM⁺ foram identificadas as classes temáticas de interesse para a análise da dinâmica de uso e cobertura da terra do litoral piauiense, conforme descrito na Tabela 1 (Bartholomé et al., 2002; Bartholomé e Belward, 2005).

Tabela 1 – Descrição das classes de uso e cobertura da terra definidas para a área de estudo.

Classes de Uso e Cobertura	Descrição	Exemplo de Alvos
Área Urbana	São áreas em que a vegetação natural foi modificada pelo homem, para diversos usos, principalmente construção e edificação.	
Corpo D'água	Compreende os principais cursos d'água da região, tais como o rio Parnaíba e as lagoas.	
Área Úmida	Compreende áreas que durante o tempo de cheia permanecem inundadas.	
Cordão Arenoso	Compreende uma grande faixa de areia alongada próximo a linha de praia.	

Dunas Móveis	Compreende a grandes massas individuais de areias em movimento, constituídas de dunas eólicas simples e/ou compostas.	
Vegetação de Mangue	Compreende a área próxima ao litoral com o predomínio de manguezais. Essas áreas possuem vegetação arbórea composta por espécies que são típicas para estes locais.	
Pasto Limpo	Compreende áreas de campos naturais abertos, utilizado principalmente pela pecuária extensiva.	
Pasto Sujo	Correspondem às áreas com presença de gramíneas, além de outras espécies de vegetação herbácea e, ainda, proporções variadas de alguns arbustos, com predominância de vegetação secundária.	
Solo Exposto	Esta classe corresponde às áreas em que toda a cobertura vegetal do solo foi removida, principalmente pelo uso antrópico.	
Vegetação de Várzea Associada a Carnaúbas	Compreende aos tipos de vegetação próximas às margens dos rios, sendo muitas vezes associadas a carnaubais.	
Vegetação Arbustiva Densa	Representam as áreas em que permanece a vegetação nativa do local, ou seja, são áreas em que não houve modificação antrópica.	
Vegetação de Caatinga Aberta	Esta classe corresponde às áreas em que se encontra uma composição mista de vários tipos de vegetação em pequenas áreas, como cajueiro em vários estádios de desenvolvimento.	

O mapeamento de tais classes temáticas foi realizado por classificação digital supervisionada

pelo algoritmo de Máxima Verossimilhança (MAXVER) implementado no software ENVI

(Câmara e Davis, 2001; Novo, 2002). O princípio de classificação supervisionada é baseado no uso de algoritmos para se determinar os pixels que representam valores de reflectância característicos para uma determinada classe. A classificação supervisionada é a mais utilizada na análise quantitativa dos dados de sensoriamento remoto (Jensen, 2007; Florenzano, 2008).

O algoritmo MAXVER é recomendado para um processo de classificação de imagens baseado em pixels, com vistas a medir a ponderação das distâncias entre médias dos níveis de cinza das classes consideradas, utilizando-se para tanto parâmetros estatísticos (Câmara e Davis, 2001; Jensen, 2007; Florenzano, 2008; Richards, 2012).

O algoritmo requer também a interação do usuário por meio do treinamento e seleção de amostras das classes temáticas de interesse. Após a classificação, foi executado um processo de pós-classificação com a finalidade de se eliminar possíveis ruídos na imagem, agregando pixels soltos. Os pixels soltos são extraídos em função de um peso e limiar fornecidos pelo usuário.

O resultado do algoritmo MAXVER é melhor quanto maior o número de pixels numa amostra de treinamento para implementá-los na matriz de covariância. Se o tamanho das amostras de treinamento para as classes é limitado, recomenda-se um método de classificação mais simples e rápido, que não estime probabilidades com base na matriz de covariância. Nas classificações em que se usa o algoritmo MAXVER cada classe é determinada por um modelo de classes normal e multivariado (Richards, 2012).

Os resultados das classificações foram avaliados por meio da matriz de confusão e do coeficiente Kappa. A matriz de confusão compara os dados da verdade de campo com os da classificação, agrupando-os. Um subproduto da matriz de confusão que auxilia na avaliação do classificador é o coeficiente Kappa. Este, por sua vez, incorpora a informação dos pixels mal classificados e não apenas a dos bem classificados, como é feito na exatidão global.

A análise do Kappa é uma técnica multivariada discreta usada na avaliação da precisão temática que utiliza todos os elementos da matriz de confusão no seu cálculo. Assim, o coeficiente Kappa é uma medida da concordância real (indicado pelos elementos diagonais da matriz de confusão) menos a concordância por chance (indicado pelo produto total da linha e coluna, que não inclui entradas não reconhecidas), ou seja, é uma medida do quanto a classificação está de acordo com os dados de referência. É importante ressaltar que a medida que se muda a verdade de campo os resultados poderão mudar consideravelmente (Cruz

et al., 2008).

Séries temporais de índices de vegetação

Os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais que realçam o comportamento espectral da vegetação. Dentre estes índices, destaca-se o *Enhanced Vegetation Index* (EVI) que foi aprimorado com o objetivo de detectar vegetação em regiões com maiores densidades de biomassa, reduzindo a influência do solo e da atmosfera (Huete et al., 1999; Jiang et al., 2008).

Dada a facilidade de aquisição, índices de vegetação como o EVI do sensor MODIS têm sido usados para caracterizar a dinâmica temporal da vegetação, tanto em ecossistemas estáveis, para o mapeamento de eventos sazonais; como em ecossistemas em processo de transformação, como os sistemas costeiros em geral, para o mapeamento destas transformações (Maus et al., 2016).

Tal mapeamento se dá pela construção de séries temporais de índices de vegetação com base no registro frequente de dados da superfície terrestre, sendo que a análise destas séries temporais permite o reconhecimento de padrões de mudança que são mais difíceis de serem identificados em análises baseadas apenas no espaço cartesiano das imagens. A dimensão temporal permite a detecção da alteração da cobertura da terra por meio do acompanhamento deste processo de mudança (Martínez e Gilabert, 2009; Zhao et al., 2009).

Assim, com vistas a caracterizar temporalmente a movimentação dunária, foram utilizados dados do índice de vegetação EVI do sensor MODIS – produto MOD13Q1 com 250 m de resolução espacial (Lacruz e Sousa Júnior, 2007; Victoria et al., 2009; Johann et al., 2012) – a fim de se comparar o comportamento espectral de áreas de dunas estabilizadas antigas e áreas de dunas móveis recentes.

O produto índice de vegetação MOD13Q1 tem como base os dados gerados pela reflectância diária de superfície, os quais são corrigidas dos efeitos de espalhamento molecular, absorção de ozônio e aerossóis (Huete et al., 2002). Este produto é gerado a partir da combinação dos melhores pixels das imagens adquiridas em um período de 16 dias (Wang e D'Sa, 2009; Maus et al., 2016).

Para mapear e caracterizar a movimentação dunária no litoral piauiense foram usados dados de EVI do MODIS para o período de 2000 a 2014. A partir da análise do EVI de pixels característicos, foi possível modelar a dinâmica da perda da cobertura vegetal e sua substituição por dunas móveis. Neste contexto, o aumento ou diminuição do índice de vegetação indica períodos sazonais com o avanço dunário até a completa substituição da vegetação.

Resultados e discussão

Dinâmica temporal

Ao longo dos anos de 1999 a 2013, o litoral do Piauí apresentou consideráveis mudanças de uso e cobertura da terra, conforme é possível observar pelas Figuras 2 e 3, e Tabela 2. Os valores de Kappa encontrados foram: 86% para o mapa de 1999 e 88% para o mapa de 2013 (Tabela 2).

Constata-se que neste período houve uma elevada expansão urbana na região, motivada principalmente pelo crescimento econômico da cidade de Parnaíba e pela intensificação do turismo na cidade de Luís Correia. Os resultados do trabalho permitem descrever como se deu esta evolução, partindo-se de 1999 quando a classe temática da Área Urbana representava 1,3% (1.528,37 ha) da área de estudo, até 2013, quando passou a representar 3,8% (4.467,55 ha) da área total.

A dinâmica do crescimento urbano, influenciado principalmente pelo crescimento da população e da economia, indicam uma expansão urbana bem acentuada entre os anos de 1999 e 2013. A população também apresentou um crescimento bastante acentuado. Somando-se a população de

Parnaíba, Luís Correia, Cajueiro da Praia e Ilha Grande de Santa Isabel em 2000 e 2010, percebe-se que os valores passam de 170.547 habitantes em 2000 para 190.188 habitantes em 2010, sendo que a maior concentração populacional se localiza no município de Parnaíba, conforme é possível constatar pela Tabela 3 (IBGE, 2013; IBGE, 2014).

Em decorrência da expansão urbana, percebe-se também um aumento das áreas de Solo Exposto, principalmente em torno das áreas urbanizadas, sendo que esta classe temática passou de 2,4% da área de estudo em 1999 para 5,3% em 2013. É observada também a presença de Vegetação de Várzea, aparentemente conservada nas áreas próximas ao leito do rio Parnaíba. Os valores desta classe temática passaram de 4,5% da área em 1999 para 3,9% em 2013.

Na porção norte da planície costeira, correspondente as áreas de planície eólica, ocorrem o predomínio de Pasto Limpo (16% da área de estudo em 2013), sendo caracterizado como campos abertos, onde é desenvolvida a atividade de pecuária extensiva, bem como outros tipos de criação, associados a agriculturas de subsistência.

USO E COBERTURA DAS TERRAS DA PLANÍCIE COSTEIRA PIAUIENSE - 1999

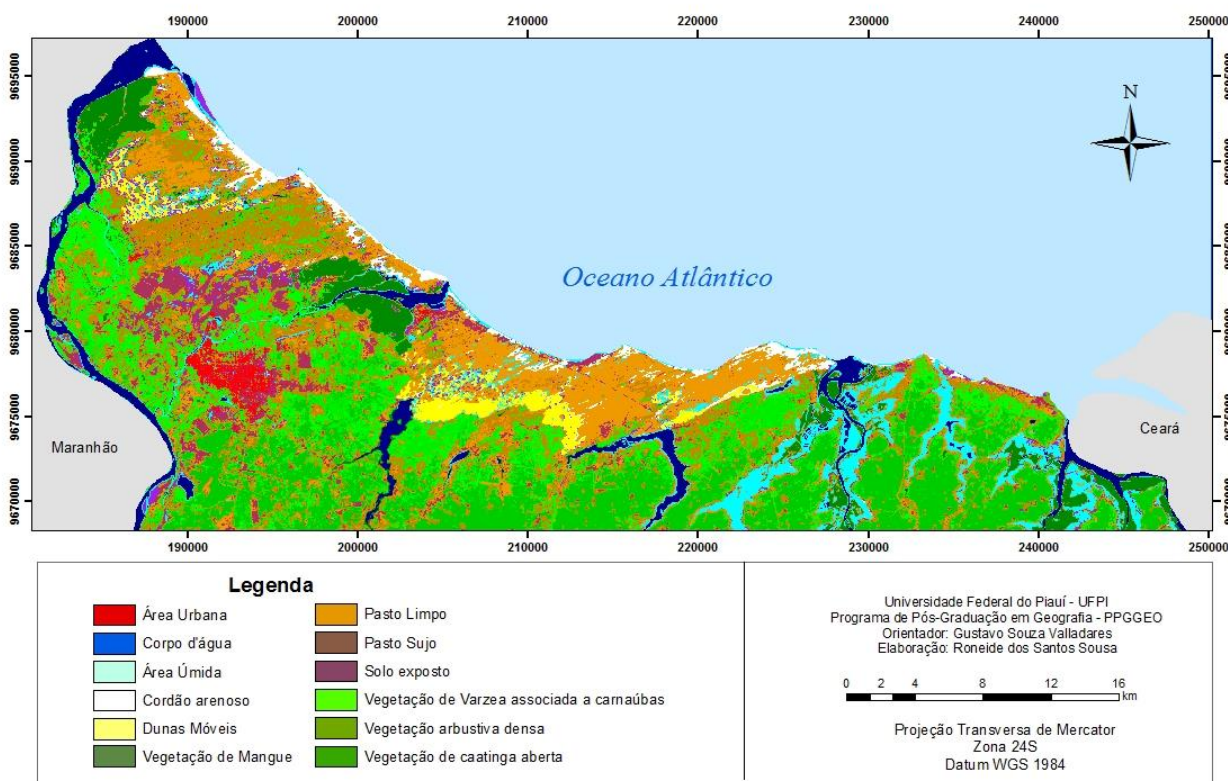


Figura 2 – Mapa de uso e cobertura da terra da planície costeira do estado do Piauí, 1999.

USO E COBERTURA DAS TERRAS DA PLANÍCIE COSTEIRA PIAUIENSE - 2013

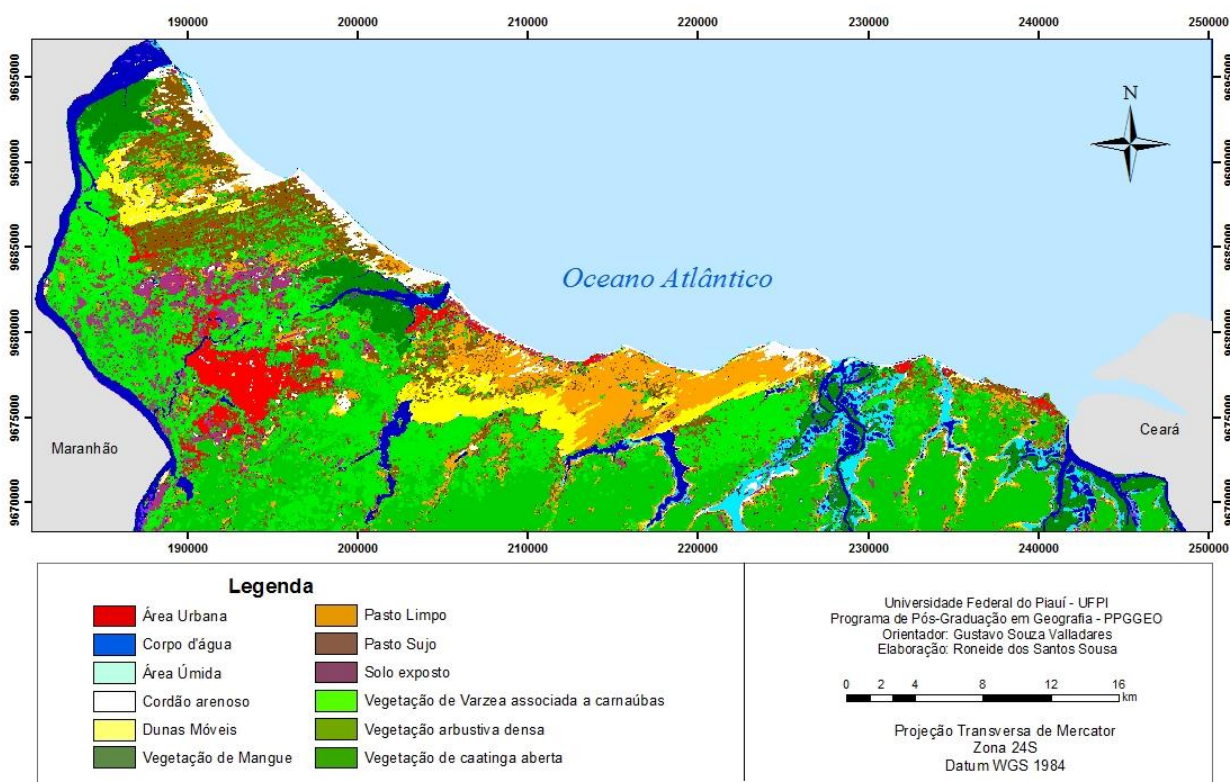


Figura 3 – Mapa de uso e cobertura da terra da planície costeira do estado do Piauí, 2013.

Tabela 2 – Quantificação das classes temáticas em 1999 e 2013.

Classes de Uso e Cobertura	1999 (Kappa 86%)	2013 (Kappa 88%)
Área Urbana	1,3%	3,8%
Corpo D'água	9,5%	14,8%
Área Úmida	5,4%	3,0%
Cordão Arenoso	2,8%	6,0%
Dunas Móveis	7,0%	9,1%
Vegetação de Mangue	14,2%	13,2%
Pasto Limpo	14,5%	16,0%
Pasto Sujo	13,4%	10,6%
Solo Exposto	2,4%	5,3%
Vegetação de Várzea Associada a Carnaúbas	4,5%	3,9%
Vegetação Arbustiva Densa	8,1%	6,1%
Vegetação de Caatinga Aberta	16,9%	8,3%

Tabela 3 – População total nos municípios litorâneos do Piauí.

Município	2000	2010
Cajueiro da Praia	6.122	7.163
Ilha Grande de Santa Isabel	7.890	8.914
Luís Correia	24.253	28.406
Parnaíba	132.282	145.705
Total	170.547	190.188

Na porção norte do litoral piauiense têm ocorrido ainda importantes processos antrópicos, decorrentes da instalação da Usina Eólica da Pedra do Sal, que conta atualmente com vinte aerogeradores instalados em área litorânea (Guzzi et al., 2015). A discussão sobre os impactos ambientais da instalação de usinas eólicas deste porte são extremamente importantes, visto que energia renovável não significa necessariamente uma energia sustentável (Lund, 2007). Por exemplo, a energia eólica por si só, bem mais limpa que outras fontes, necessita ser avaliada no que se refere a sua conexão com a rede elétrica quando não utilizada isoladamente (Ribeiro et al., 2012).

Neste contexto, o estado do Piauí tem se destacado no cenário nacional como potencial líder na geração de energia eólica. A região conta com uma potência instalada de 293 MW, e a energia eólica tem ganhado destaque principalmente pela ampliação das possibilidades de instalação de novos parques. O estado foi o que mais teve projetos contratados no leilão realizado em 2014 pelo Ministério de Minas e Energias para fontes alternativas de energia.

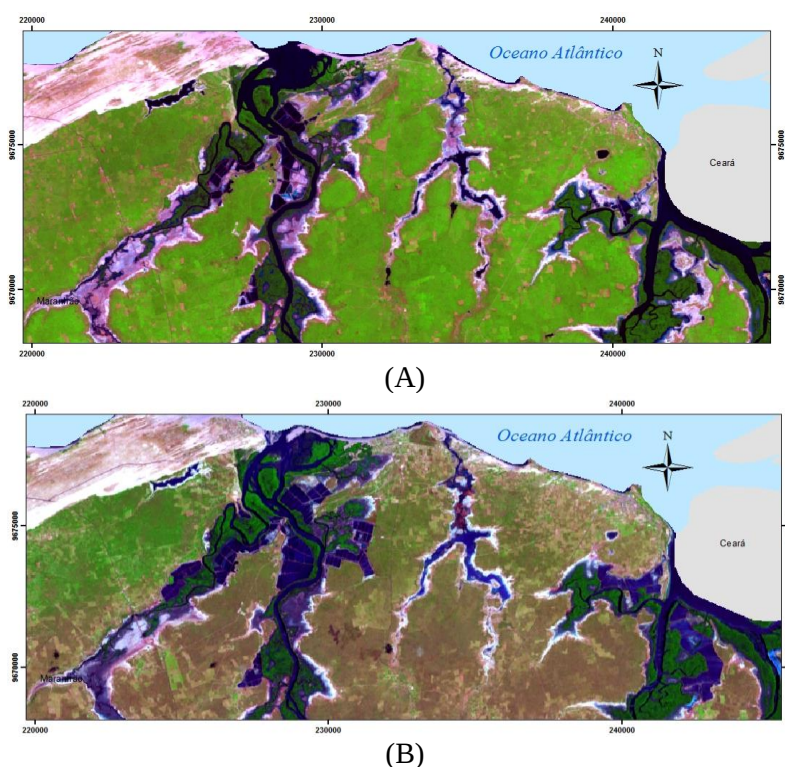
Estima-se que a produção de energia eólica no estado deve chegar a 1900 MW em 2019 (de Oliveira Filho e Lira, 2013). Desta forma, é de relevante importância considerar os impactos cumulativos causados pela presença de vários parques eólicos numa mesma região, e também os impactos oriundos da perda da cobertura natural decorrente da implantação das estradas de acesso e linhas de transmissão (Saidur et al., 2011; Guzzi et

al., 2015).

Retomando-se a análise temporal dos mapas de uso e cobertura da terra, é possível notar a perda de parte da Vegetação de Mangue entre os anos de 1999 e 2013, que passou de 16.694,51 ha (14,2%) para 15.518,84 ha (13,2%). Grande parte desta vegetação foi substituída pelo cultivo de arroz (rizicultura). Além disto, os resultados dos mapas de uso e cobertura da terra permitem ainda identificar e comparar a dinâmica sofrida pelo leito do rio Parnaíba nestes 14 anos. Nota-se que o mesmo vem abandonando seus meandros e dando lugar a cursos quase que retilíneos.

Sobre a classe temática Corpo D'água, percebe-se um aumento global desta classe (9,5% em 1999 e 14,8% em 2013), no entanto, pela interpretação visual dos resultados e com base nas visitas em campo, pode-se constatar que de fato está ocorrendo uma diminuição da área de corpos hídricos naturais e o surgimento de novos corpos hídricos artificiais, principalmente com o aumento significativo da carcinicultura em áreas próximas a manguezais, e mais especificamente próximo aos rios Camurupim, Cardoso e Carpina na planície costeira piauiense.

No Piauí, as áreas de carcinicultura estão ocupando os espaços arenosos em torno dos manguezais (região denominada de vegetação apicum), que é entendida como parte da sucessão natural do manguezal para outras comunidades vegetais, sendo resultado da deposição de areias finas por ocasião da preamar (Figura 4) (Crepani e Medeiros, 2003; Araripe et al., 2006).





(C)

Figura 4 – Análise da evolução da atividade de carcinicultura no litoral piauiense: (A) imagem ETM⁺ de 1999; (B) imagem OLI de 2013; (C) tanque de carcinicultura próximo aos rios Camurupim e Cardoso.

Movimentação dunária e diminuição da cobertura vegetal

A classe temática Cordão Arenoso corresponde a uma unidade de paisagem plana, resultante de acumulação marinha, podendo comportar praias, canais de maré, cristas de praia, restingas e ilhas barreira. Trata-se de estreitos e alongados depósitos arenosos em contato direto com a faixa de praia, sendo considerado o depósito continental mais próximo do mar, com cotas que não excedem os 3 m.

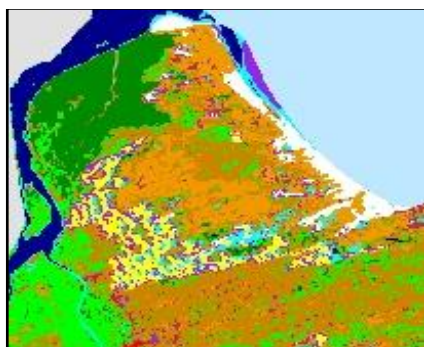
No litoral piauiense, esta classe tem aumentado ao longo dos anos, passando de 2,8% da área de estudo em 1999, para 6,0% em 2013, ocorrendo principalmente ao norte da planície costeira e próximo à linha de costa, onde recebe sedimentos marinhos e eólicos, e geralmente localizada às margens dos campos de dunas (Figura 5C).

O sistema dunário do litoral piauiense apresentou durante os 14 anos analisados comportamento tanto de avanço quanto de retração ao longo da linha da costa. De forma global, a classe temática de Dunas Móveis passou de 7,0% da área em 1999, para 9,1% em 2013. Esta classe temática de paisagem corresponde a depósitos arenosos paralelos à linha de costa, com cotas variando de 5 a 40 m. São constituídos de material quartzoso, de

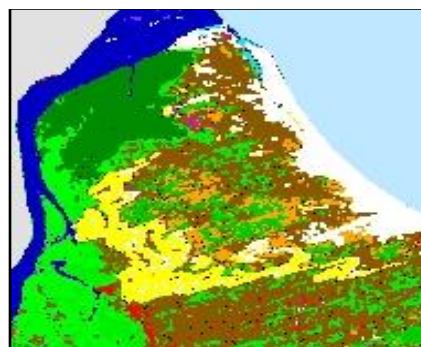
granulometria média a grossa, ora maturo ora imaturo texturalmente, de coloração predominantemente branca, caracterizando o solo como neossolo quartzarênico. Esta unidade é produzida pelo transporte e deposição de partículas pelo vento, e sua assimetria é justificada pela inclinação maior no lado sotavento que no lado barlavento. O conceito de duna possui um significado quanto à hierarquia de tamanho de formas de leito eólicas. No Piauí, encontra-se as dunas do tipo barcanas.

Com base na interpretação visual dos resultados, pode-se observar que o deslocamento dunário foi orientado do litoral em direção ao interior do continente, no sentido nordeste-sudoeste, conforme também constatado por outros trabalhos realizados em localizações próximas, e de forma coerente com a característica predominante dos ventos alísios da região (Araujo e da Fonseca, 2016).

Assim, as Figuras 5A e 5B apresentam como exemplo o avanço das Dunas Móveis na porção norte do litoral piauiense, comparando-se o mapeamento desta classe nos anos de 1999 e 2013. As Figuras 5C e 5D apresentam exemplos de paisagem de Cordão Arenoso e Dunas Móveis, respectivamente, ambos localizados no litoral do Piauí.



(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 5 – Análise da evolução das dunas: (A) mapeamento em 1999; (B) mapeamento em 2013; (C) exemplo de Cordão Arenoso; (D) exemplo de Dunas Móveis.

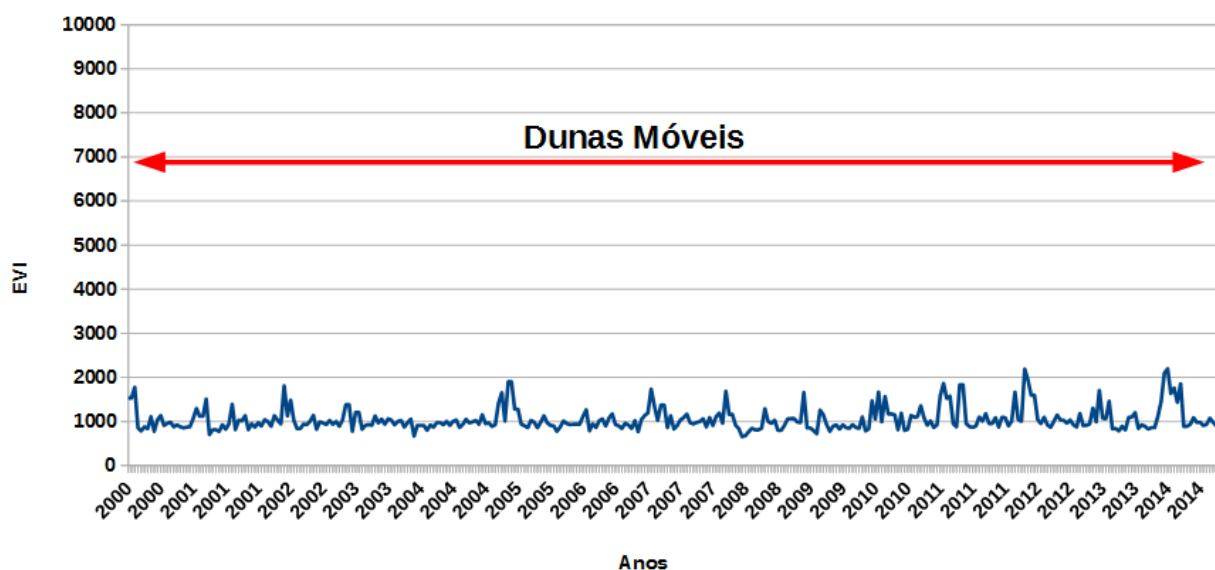
Foram feitas medições, para duas áreas selecionadas, da variação temporal do EVI nos últimos 14 anos (2000-2014). Tais áreas foram selecionadas com base na interpretação visual dos mapas de uso e cobertura da terra, sendo que a primeira área foi selecionada como sendo representativa da classe temática Dunas Móveis tanto na classificação de 1999 como na classificação de 2013; e a segunda área como sendo representativa da classe temática Vegetação Caatinga (Figura 6C) em 1999 e Dunas Móveis em 2013. A primeira área foi nomeada como amostra de Dunas Móveis estabilizadas, e a segunda área como Dunas Móveis recentes.

As Figuras 6A e 6B mostram o perfil temporal do EVI para a amostra de Dunas Móveis estabilizadas e Dunas Móveis recentes, respectivamente. Pela análise da Figura 6A, percebe-se que as Dunas Móveis estáveis apresentam baixa amplitude do EVI ao longo do

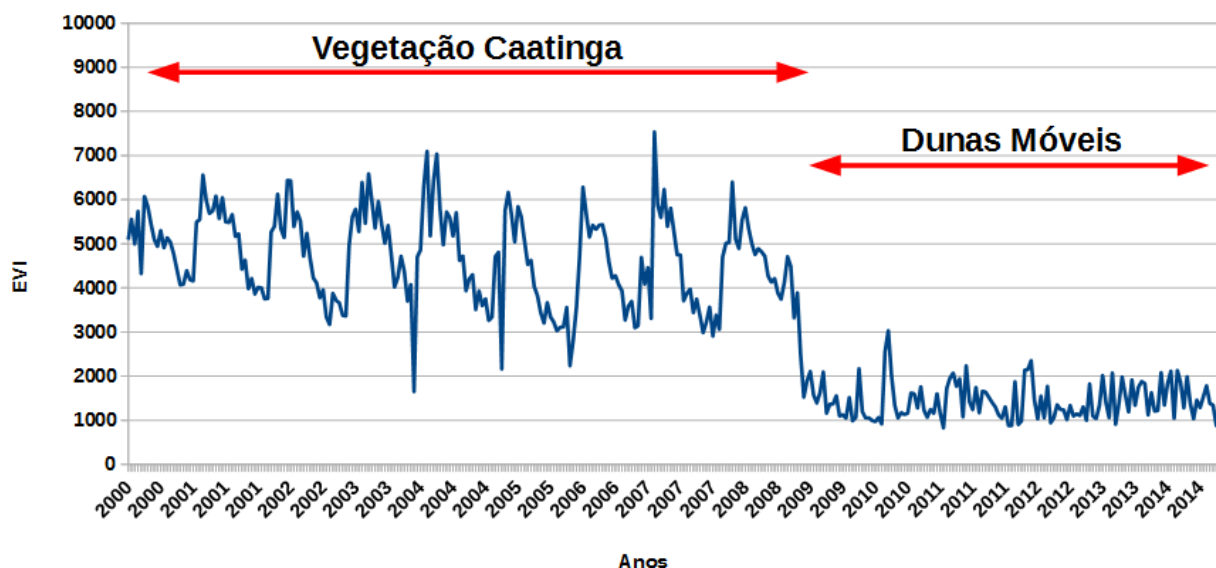
período analisado, com valores médios baixos, ou seja, com baixa concentração de biomassa, e variação sazonal perceptível. Pela análise da curva, percebe-se ainda que este índice mantém um padrão temporal estável, que está associado ao aparecimento de pequenas gramíneas em épocas de maiores índices pluviométricos e à variabilidade das condições meteorológicas no período.

A análise dos valores de EVI da Figura 6B permitiu caracterizar o processo de movimentação dunária pela substituição da Vegetação de Caatinga por Dunas Móveis recentes.

Percebe-se que a primeira porção do gráfico (2000-2005) é caracterizada por um comportamento sazonal com maiores valores de amplitude do EVI, o que se deve ao comportamento espectral sazonal deste tipo de cobertura vegetal, em que periodicamente as partes aéreas ficam secas, provocando uma redução nos valores deste índice.



(A)



(B)



(C)

Figura 6 – Análise da perda de cobertura vegetal pela movimentação dunária: (A) evolução temporal do EVI para área representativa de Dunas Móveis antigas e estáveis; (B) evolução temporal do EVI para área representativa de Dunas Móveis recentes, em substituição a Vegetação de Caatinga; (C) exemplo de Vegetação de Caatinga.

Ainda nesta porção do gráfico, valores muito baixos de EVI, como no ano de 2004, ocorrem em consonância com os anos de influência de fenômenos como El Niño, que acarretam o aumento da estiagem pluviométrica na região. Ao contrário do El Niño (2004-2005), a La Niña (2005-2006), que também exerce grande impacto nas condições meteorológicas da região, notadamente precipitação pluvial e temperatura do ar, aumenta a presença hídrica no ambiente dunário, ocasionando uma maior taxa de deslocamento das dunas na região de estudo (Hugenholtz et al., 2012; Araujo e da Fonseca, 2016), pois é no período seco que os ventos atuam de forma mais intensa.

Pela análise da segunda porção da curva da Figura 6B (2006-2009), pode-se perceber o início do processo de substituição de cobertura da terra, com os valores de EVI em menores amplitudes, até a substituição completa da vegetação. A última porção do gráfico (2009-2014) é já caracterizada por padrões de amplitude de EVI bem próximos ao

padrão da Figura 6A.

Por fim, pela análise da Tabela 2, percebe-se que todos os outros três tipos de cobertura vegetal sofreram redução em suas áreas nos 14 anos analisados neste artigo. A classe temática Vegetação de Várzea foi a que menos sofre com os processos antrópicos da região, passando de 4,5% da área em 1999, para 3,9% em 2013. A classe Vegetação Arbustiva passou de 8,1% em 1999 para 6,1% em 2013.

Já a classe temática Vegetação Caatinga foi a de maior redução em área, passando de 16,9% da área em 1999 para 8,3% em 2013. Uma pequena parte desta cobertura vegetal foi substituída por Dunas Móveis pelo processo natural de deslocamento dos sedimentos dunários em direção a vegetação, acarretando inclusive o soterramento de alguns corpos hídricos. Entretanto, a maior perda se deve principalmente a processos de desflorestamento para a expansão urbana, ou para a expansão de novas áreas agrícolas ou de pastagens.

Conclusões

A partir da classificação supervisionada de imagens dos satélites Landsat-7 e Landsat-8 de 1999 e 2013, respectivamente, foi possível mapear a dinâmica de uso e cobertura da terra, contribuindo com o melhor conhecimento da área de estudo, localizada na planície costeira piauiense.

A classificação supervisionada de imagens de sensoriamento remoto viabilizou a identificação das principais classes temáticas de uso e cobertura da terra existentes na região costeira do Piauí, bem como o mapeamento da expansão ou contração destas classes ao longo do período analisado.

A variação temporal destas classes temáticas permitiu uma análise mais profunda dos processos naturais e antrópicos que têm contribuído com a alteração das paisagens existentes na planície costeira piauiense.

As séries temporais do *Enhanced Vegetation Index* mostraram-se úteis na caracterização da dinâmica de movimentação dunária pelo processo de substituição da cobertura vegetal por Dunas Móveis. As tipologias consideradas no artigo apresentaram comportamento espectral e sazonal bem definidos, com períodos de maior ou menor influência de fenômenos climáticos como o El Niño e a La Niña.

No entanto, são necessários estudos adicionais para uma melhor caracterização do processo de movimentação dunária pela análise de séries temporais de índices de vegetação.

Em termos das contribuições dos resultados do artigo, observou-se o crescimento considerável da Área Urbana das cidades de Parnaíba e Luís Correia, vinculado também ao aumento das áreas de Solo Exposto ao redor destas manchas urbanas.

A atividade turística tem contribuído com a nova configuração territorial da região, onde a ação de grandes proprietários e empresários vêm gerando impactos negativos ao ambiente. Assim, é de fundamental importância uma avaliação permanente do planejamento e gestão urbana neste ambiente costeiro, de forma a garantir uma melhor preservação ambiental com foco em novos modelos de urbanização e políticas de desenvolvimento urbano.

Observou-se ainda o aumento significativo da atividade de criação de camarão nas margens dos rios Camurupim e Cardoso. Por estarem localizadas na Área de Preservação Permanente (APA) da planície flúvio-marinha do Delta do Parnaíba, estas áreas devem ser frequentemente monitoradas pelo IBAMA, e devem adotar processos de licenciamento ambiental e de Estudos de Impactos Ambientais (EIA).

A Vegetação de Mangue sofreu uma redução em sua flora, visto que atividades como a

rizicultura favoreceram essa redução. As áreas de Dunas Móveis, devido a dinâmica natural da zona costeira, tiveram um aumento absoluto em sua área, ficando bem mais concentradas, tanto em Ilha Grande de Santa Isabel quanto em Luís Correia. No entanto, percebe-se que localmente existem também áreas de contração dunária.

Em síntese, foi constatada uma expansão considerável de diferentes tipos de uso e cobertura da terra na planície costeira piauiense, enquanto que as classes de cobertura vegetal sofreram retrações também significativas, principalmente as classes correspondentes a Vegetação de Mangue e Vegetação de Caatinga. A perda de áreas de vegetação é preocupante, pois afeta diretamente os diferentes sistemas ecológicos da região.

Em geral, as classes como Área Urbana, atividade de carcinicultura, Dunas Móveis, bem como o Solo Exposto, tiveram um crescimento significativo, o que justifica o intenso uso da terra pelas ações antrópicas, bem como a dinâmica natural da planície costeira que são responsáveis diretamente pela migração das Dunas Móveis.

A partir da análise holística e sistêmica dos componentes da paisagem da zona costeira piauiense, pode-se mapear suas principais classes temáticas, possibilitando proposições de alternativas de uso desses sistemas. Nestes ambientes é onde existe maior preocupação por parte do uso e ocupação da terra, não só pelo interesse em área que tende a ser intensamente ocupada, mas também pela instabilidade e fragilidade do meio em que os agentes modeladores atuam com intensidade.

Assim, pode-se afirmar que o uso de produtos do sensoriamento remoto, combinados as técnicas de processamento digital de imagens, pode ajudar na caracterização do território costeiro, possibilitando não só a distinção entre sistemas, mas também o reconhecimento de variações dentro de um mesmo sistema, como resposta da sua dinâmica de expansão e contração. Além disso, estas ferramentas tornam-se cada vez mais imprescindíveis para o monitoramento da evolução da dinâmica costeira, por meio da comparação de séries de imagens temporais.

Agradecimentos

Este artigo está vinculado à dissertação para a obtenção do título de Mestre em Geografia do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Piauí (UFPI). Esta pesquisa foi desenvolvida com o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI).

Referências

- Araripe, H. G. A., Lopes, J. B., Bastos, M. E. G., 2006. Aspectos do licenciamento ambiental da carcinicultura na APA do Delta do Parnaíba. *Ambiente & Sociedade* 9, 2-31.
- Araujo, T. D., da Fonseca, E. L., 2016. Análise multitemporal dos Lençóis Maranhenses entre 1984 a 2014 utilizando sensoriamento remoto orbital. *Revista Brasileira de Geografia Física* 9, 280-295.
- Asmus, M. L., Kitzmann, D. I. S., Laydner, C., Tagliani, C. R. A., 2006. Gestão costeira no Brasil: instrumentos, fragilidades e potencialidades. *Revista de Gestão Costeira Integrada* 5, 52-57.
- Bartholomé, E., Belward, A., 2005. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from earth observation data. *International Journal of Remote Sensing* 26, 1959-1977.
- Bartholomé, E., Belward, A., Achard, F., Bartalev, S., Carmona-Moreno, C., Eva, H., Fritz, S., Grégoire, J., Mayaux, P., Stibig, H., 2002. GLC 2000: global land cover mapping for the year 2000. Project status November 2002. Disponível: http://www.glcn.org/index_en.jsp. Acesso: 23 jan 2014.
- Caldas, L. H. O., Stattegger, K., Vital, H., 2006. Holocene sea-level history: evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. *Marine Geology* 228, 39-53.
- Câmara, G., Davis, C., 2001. Introdução ao geoprocessamento, in: Câmara, G. (Org.), *Fundamentos de Geoprocessamento*. 1 ed. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, pp. 1-5.
- Crepani, E., Medeiros, J. S., 2003. Carcinicultura em apicum no litoral do Piauí: uma análise com sensoriamento remoto e geoprocessamento. *Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 1541-1548.
- Cruz, E. S., Carvalho, D. F., Varella, C. A., Silva, L. D., Souza, W. J., Pinto, F. A., 2008. Comparação de classificadores de imagens digitais na determinação da cobertura do solo. *Engenharia Agrícola* 28, 237-244.
- da Silva Seabra, V., Cruz, C. M., 2013. Mapeamento da dinâmica da cobertura e uso da terra na bacia hidrográfica do Rio São João, RJ. *Sociedade & Natureza* 25, 411-426.
- de Oliveira Filho, J. I., Lira, M. A. T., 2013. Caracterização do regime de ventos no estado do Piauí. *Anais do II EITEC – Ciências e Inovação: Tecnologias Sustentáveis para preservação do Meio Ambiente* 2, 49-51.
- Fernandes, L. R., Amaral, R. F., 2013. Paisagem costeira do litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte (Brasil): evolução temporal e padrões espaciais dos campos de dunas móveis. *Revista de Gestão Costeira Integrada* 13, 45-49.
- Florenzano, T. G., 2008. Sensoriamento Remoto para geomorfologia, in Florenzano, T. G. (Org.), *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. 1 ed. Oficina de Textos, São Paulo, pp. 12-35.
- Guzzi, A., Gomes, D. N., dos Santos, A. G. S., Favretto, M. A., Soares, L. M., Carvalho, R. A., 2015. Composição e dinâmica da avifauna da usina eólica da praia da Pedra do Sal, Delta do Parnaíba, Piauí, Brasil. *Iheringia Série Zoologia* 105, 164-173.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., Ferreira, L. G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83, 195-213.
- Huete, A., Justice, C., Van Leeuwen, W., 1999. MODIS vegetation index (MOD13). Algorithm theoretical basis document 3, 213-217.
- Hughenoltz, C. H., Levin, N., Barchyn, T. E., Baddock, M. C., 2012. Remote sensing and spatial analysis of aeolian sand dunes: a review and outlook. *Earth-Science Reviews* 111, 319-334.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e estatística, 2013. Censo Demográfico 2010 - Síntese de Indicadores. Rio de Janeiro.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e estatística, 2014. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios PNAD 2013 - Síntese de Indicadores. Rio de Janeiro.
- Jensen, J. R. 2007. Remote sensing of the environment: an earth resource perspective, 1 ed. Pearson Prentice Hall, New York.
- Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., Miura, T., 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment* 112, 3833-3845.
- Johann, J. A., Rocha, J. V., Duft, D. G., Lamparelli, R. A. C., 2012. Estimativa de áreas com culturas de verão no Paraná, por meio de imagens multitemporais EVI/Modis. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 47, 1295-1306.
- Klein, R. J., Nicholls, R. J., 1999. Assessment of coastal vulnerability to climate change. *Ambio* 28, 182-187.
- Lacruz, M. S. P., Sousa Júnior, M. D. A., 2007. Uso de séries temporais EVI/MODIS e análise harmônica para o estudo da bacia do rio Taquari. *Revista Brasileira de Cartografia* 59, 9-15.
- Loveland, T. R., Dwyer, J. L., 2012. Landsat: Building a strong future. *Remote Sensing of Environment* 122, 22-29.
- Lund, H., 2007. Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy* 32, 912-919.

- Markham, B., Storey, J., Morfitt, R., 2015. Landsat-8 sensor characterization and calibration. *Remote Sensing* 7, 2279-2282.
- Marroni, E. V., Asmus, M. L., 2005. Gerenciamento costeiro: uma proposta para o fortalecimento comunitário na gestão ambiental, 1 ed. Editora da União Sul-Americana de Estudos da Biodiversidade, Pelotas.
- Martínez, B., Gilabert, M. A., 2009. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. *Remote Sensing of Environment* 113, 1823-1842.
- Maus, V., Camara, G., Cartaxo, R., Sanchez, A., Ramos, F., Queiroz, G., 2016. A time-weighted dynamic time warping method for land-use and land-cover mapping. *IEEE Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing* 99, 1-11.
- Novo, E. M. L., 2002. Sensoriamento Remoto, Princípios e Aplicações, 2 ed. Edgar Blucher Ltda, São Paulo.
- Ribeiro, H. C. M., Pierot, R. M., Corrêa, R., 2012. Projeto de mecanismo de desenvolvimento limpo: um estudo de caso na empresa de energia eólica do estado do Piauí. *REUNIR: Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade* 2, 61-75.
- Richards, J. A., 2012. Remote sensing digital image analysis: an introduction, 1 ed. Springer, New York.
- Saidur, R., Rahim, N., Islam, M., Solangi, K., 2011. Environmental impact of wind energy. *Renewable and sustainable energy reviews* 15, 2423-2430.
- Spalding, M. D., Ruffo, S., Lacambra, C., Meliane, I., Hale, L. Z., Shepard, C. C., Beck, M. W., 2014. The role of ecosystems in coastal protection: adapting to climate change and coastal hazards. *Ocean & Coastal Management* 90, 50-57.
- Travalini, V., da Cunha, C. M. L., 2016. Análise da dinâmica do uso da terra no município de Bertioga/SP. *Revista Geonorte* 3, 506-517.
- Victoria, D., Andrade, R., Paz, A., 2009. Série temporal de imagens EVI/MODIS para discriminação de formações vegetais do Pantanal. *Geografia* 34, 721-729.
- Wang, F., D'Sa, C. M. L., 2009. Potential of MODIS EVI in identifying hurricane disturbance to coastal vegetation in the northern Gulf of Mexico. *Remote Sensing* 2, 1-18.
- Wulder, M. A., Masek, J. Z., Cohen, W. B., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., 2012. Opening the archive: how free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment* 122, 2-10.
- Wulder, M. A., White, J. C., Goward, S. N., Masek, J. C., Irons, J. R., Herold, M., Cohen, W. B., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., 2008. Landsat continuity: issues and opportunities for land cover monitoring. *Remote Sensing of Environment* 112, 955-969.
- Zhao, B., Yan, Y., Guo, H., He, M., Gu, Y., Li, B., 2009. Monitoring rapid vegetation succession in estuarine wetland using time series MODIS-based indicators: an application in the Yangtze River Delta area. *Ecological Indicators* 9, 346-356.