

O USO DE IMAGENS DE SATÉLITE E DE GEOPROCESSAMENTO COMO FERRAMENTAS NA ANÁLISE MULTITEMPORAL DA DINÂMICA COSTEIRA DO LITORAL DE TUTOIA (MA)

Polyana Sá Menezes da Silvaⁱ

Mestre em Geografia – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
Doutoranda em Geografia Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Resumo

O presente trabalho apresenta a metodologia e os resultados da identificação das alterações que ocorreram na paisagem costeira do município de Tutoia do estado do Maranhão, associadas aos processos de erosão e progradação da linha de costa e a dinâmica de evolução do campo de dunas entre os anos de 1994 e 2017. Para o desenvolvimento da pesquisa foram analisadas imagens de satélite do período estudado e elaborado uma série temporal por meio de técnicas de geoprocessamento, como sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG). Os resultados implicam em um mapa da evolução multitemporal dos campos de dunas móveis e erosão da linha de costa que possibilitou identificar a significativa influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que quando submetida a anomalia Temperatura da Superfície do Mar (TMS) e ocorrência do El Niño interfere na região Nordeste do Brasil aumentando o período de escassez de chuvas e aumentando a intensidade dos ventos alísios, sendo estas as causas do aumento da velocidade de migrações de dunas nos períodos analisados. Dessa forma, o presente estudo configura como importante ferramenta para a aplicação de políticas públicas voltadas para o planejamento e gestão territorial no município de Tutoia (MA).

Palavras-chave: Dinâmica Costeira; Campo de dunas; Geoprocessamento; Sensoriamento remoto; Evolução multitemporal.

THE USE OF SATELLITE AND GEOPROCESSING IMAGES AS TOOLS IN THE MULTITEMPORAL ANALYSIS OF THE COASTAL DYNAMICS OF THE COAST OF TUTOIA (MA)

Abstract

This present work presents the methodology and the results of the identification of the changes that occurred in the coastal landscape of Tutoia, municipality of state of Maranhão, associated with the processes of erosion and progradation of the coastline and the dynamics of evolution of the dune field between 1994 and 2017. For this research development, satellite images from the studied

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

period were analyzed and a time series was elaborated using geoprocessing techniques, such as remote sensing and geographic information systems (GIS). The results imply a map of the multitemporal evolution of the moving dune fields and erosion of the coastline, which made it possible to identify the significant influence of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), which when submitted to the Sea Surface Temperature (SST) anomaly and occurrence of El Niño interferes in the Northeast region of Brazil, increasing the period of scarcity of rain and increasing the intensity of the Trade Winds, which are the root causes of the increase in the speed of dune migrations in the analyzed periods. Thus, the present study is an important tool for the application of public policies aimed at territorial planning and management in the municipality of Tutoia (MA).

Keywords: Coastal Dynamics; Dune field; Geoprocessing; Remote sensing; Multitemporal evolution.

Introdução

Os ambientes costeiros são regiões muito suscetíveis aos impactos tanto das pressões humanas quanto das naturais associadas principalmente as mudanças climáticas e variações do nível do mar (MUEHE, 2006). Por configurar áreas importantes economicamente, as zonas litorâneas concentram uma grande porção da população mundial, assim como no Brasil que passou por uma rápida expansão dos municípios costeiros e possui mais de 40 milhões de habitantes nessas áreas (SHORT e KLEIN, 2016).

No contexto local da área de estudo, a ocupação humana no litoral do município de Tutoia no Maranhão tem sido afetada ao longo do tempo pelas modificações da linha de costa, principalmente em função do movimento de dunas. Tais impactos resultam da falta de conhecimento dos moradores a respeito da própria dinâmica costeira local, o que leva a construção de residências em locais altamente dinâmicos, e da falta de atuação das instituições governamentais no gerenciamento do uso e ocupação desse espaço.

Localizando-se no Litoral Oriental do Maranhão que compreende a área entre o Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses e o Delta do Parnaíba, o litoral de Tutoia recebe a influência desses dois ambientes. A paisagem costeira presente na área de

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

estudo tem como um de seus elementos campos de dunas móveis compondo um ambiente dinâmico que expressa alterações significativas tanto espaciais quanto temporais. A paisagem do local apresenta feições eólicas relativamente próximas à linha de costa resultantes da ação conjugada de ondas, correntes costeiras, ação fluvial, variações do nível do mar e fatores climáticos que contribuíram para a configuração da atual paisagem costeira. Assim como os ambientes costeiros, em sua totalidade, são caracterizados como locais de forte dinamismo, coordenado pelas variações energéticas dos processos naturais de diferentes escalas espaciais e temporais.

O uso de geoprocessamento tem auxiliado muitos estudos com foco no mapeamento e no monitoramento de ambientes costeiros, principalmente naqueles com abordagem voltada análises de sua dinâmica. O fato de existir imagens de sensores remotos de diferentes épocas converte a análise multitemporal em uma excelente ferramenta para auxiliar estudos geomorfológicos costeiros, ao estender informações pontuais de uma área para um contexto geográfico, possibilitando o entendimento da história evolutiva desses sistemas. Essas características, tornam o uso do Geoprocessamento fundamental para a pesquisa, pois permite o conhecimento integrado da paisagem. A realização de pesquisas que possam subsidiar o planejamento da ocupação e uso do solo, recursos naturais e das estruturas humanas, apoiadas com uso do geoprocessamento que tende a ser um facilitador na observação e apuração de dados geográficos como os trabalhos de Santana (2015) e Silva (2013).

Delimitação da área de estudo foi realizada com base na importância ambiental do local, pela presença de vegetação de mangue e vegetação pioneira, relações ecológicas entre flora e fauna, e socioeconômica para a comunidade local que praticam o extrativismo (pesca) e atividades que exploram o ecoturismo. O Litoral do município de Tutoia, necessita de mais estudos acerca do comportamento dos ambientes que compõe a planície costeira com o objetivo de melhor conhecer os mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento dos processos modeladores da paisagem na área em referência. Impactos gerados pelo uso irracional dos recursos naturais e conhecimento de ambientes altamente dinâmicos tornam-se motivos de investigação, pois visam formas

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

de atenuar e adequar transformações impostas pelo (e ao) homem às potencialidades do meio.

Esse trecho do litoral do Maranhão possui uma carência de trabalhos voltados para os estudos de morfodinâmica da paisagem, no que se refere à interação dos agentes e processos modeladores da paisagem. Pesquisas e análises já existentes, possuem uma escala de abordagem que permite a compreensão razoável da dinâmica da paisagem e envolvem de uma forma geral litoral maranhense, haja vista que a intensidade da ação dos agentes responsáveis pelos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos determina rápidas transformações da paisagem costeira.

Neste contexto, o presente estudo busca apresentar alterações que ocorreram na paisagem costeira do município de Tutoia (MA), entre os anos de 1994 e 2017, com destaque para as alterações associadas aos processos de erosão e progradação da linha de costa e a dinâmica de evolução do campo de dunas, através da adoção de técnicas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e fotointerpretação. Espera-se com isso contribuir para o melhor conhecimento da dinâmica do Litoral Oriental maranhense fornecendo informações que sirvam de subsidio para futuros projetos de ordenamento do uso e ocupação da zona costeira. Para isso serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Mapear as alterações morfológicas ocorridas no litoral ao longo do intervalo de tempo estudado;
- Analisar os processos morfodinâmicos associados a erosão, progradação e migração das dunas e sua consequência para as atividades humanas;
- Avaliar a metodologia utilizada para o estudo da evolução da paisagem.

Área de estudo

O município de Tutoia (Figura 1) ocupa parte do extremo nordeste do Maranhão, possui área de 1.489,38 km² integrado à Área de Proteção Ambiental do Delta do Parnaíba que se caracteriza pela presença de campos de dunas móveis e lagoas formadas por água da chuva ou por elevação do lençol freático, onde é possível constatar, que a atividade dos agentes climáticos em vasto espaço exposto causa intensa evaporação e

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

aceleração dos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos superficiais (MMA/ZEE, 2002).

ÁREA DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE TUTÓIA - MA

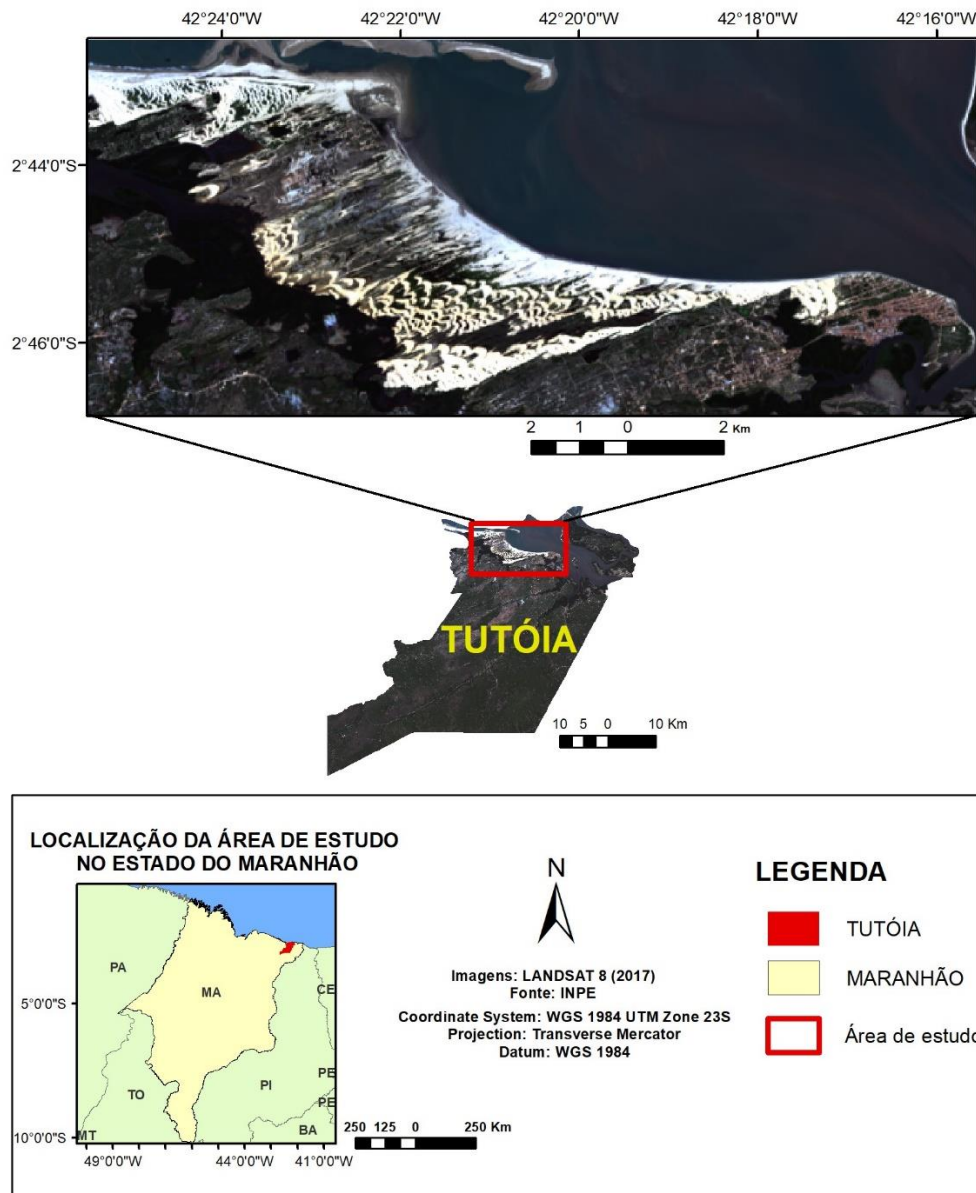


Figura 1: Localização da área de estudo no estado do Maranhão

A análise das características climáticas da região é de extrema necessidade para entender o presente estudo, já que seus fatores são importantes agentes transformadores

da paisagem. Dos sistemas meteorológicos existentes no Norte e Nordeste, e consequentemente sobre a zona costeira maranhense, que regulam os padrões de precipitação o principal é a **Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)**. O setor oriental do estado do Maranhão tem um clima tropical quente e semiúmido do tipo Aw, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, indicando um verão quente - úmido e um inverno mais seco. (PEREIRA *et al.* 2016; SANTOS, 2008).

Segundo Molion e Bernado (2002, p.1336) “a ZCIT é uma grande região de confluência dos ventos alísios de nordeste, e dos ventos alísios de sudeste”, constituída de nebulosidade e chuvas no sentido leste-oeste. Essa zona influência nas precipitações observadas sobre os continentes africano, americano e asiático, também tem grande contribuição para nordeste brasileiro, assim como o norte e centro do Maranhão e Piauí (PAULA, 2013).

Os transportes de sedimentos eólicos estão ligados aos fatores pluviométrico, pois dependendo da incidência de chuva o deslocamento pode ser maior ou menor. No caso da Região Nordeste por não apresentar as quatro estações climáticas bem definidas, a estação chuvosa apresenta uma pluviometria concentrada e irregular resultando num regime pluviométrico caracterizado por mínimos no inverno, agosto a dezembro e máximos no verão que vai de janeiro a julho, as chuvas se concentram no primeiro semestre do ano, contribuindo com o potencial pluviométrico. (CARVALHO e OYAMA, 2003; PAULA, 2013).

Na dinâmica da paisagem da área de estudo, o vento é o principal protagonista, pois exerce o papel de grande importância principalmente no que se refere ao transporte e deposição -dos sedimentos, na formação das ondas e na esculturação do relevo. Exerce um papel fundamental no litoral do nordeste haja vista a acumulação de dunas e praias arenosas desde o litoral norte do Rio Grande do Norte até o Golfão Maranhense (CHRISTOFOLETTI, 1980; MARANHÃO, 1998). Assim como o resto do norte brasileiro, a atividade eólica segue essencialmente a circulação de grande escala, com predominância de fluxo zonal de leste e atingindo uma velocidade média em torno de 5 m/s, tendo a predominância de NE . Variam no período chuvoso quando predominam ventos de calmaria e ventos suaves, intercalados por ventos fortes no período seco,

quando são mais recorrentes os ventos médios e fortes, com velocidades entre 22 e 35 km/h. (PEREIRA *et al.*, 2016)

A região ZCIT compreende a área de baixa pressão onde ocorre a interação entre a confluência dos ventos alísios, as áreas de máxima **Temperatura da Superfície do Mar (TSM)**, a região do cavado equatorial e de máxima convergência de massa e é marcada por aglomerados de nuvens convectivas (UVO, 1989 *apud* DIAS e DE BRITO, 2017). Menezes *et al.* (2008) e Chaves (2011) afirmam que a TSM afeta a aposição da ZCIT que consequentemente influencia na distribuição das chuvas sobre o Nordeste.

À anomalia da TSM, estão relacionadas a escassez de chuvas e incidência maior de ventos são que por sua vez ocorrem junto aos eventos do El Niño, acompanhando também sua intensidade, bem como os eventos de La Niña e TSM positivas no Atlântico Sul com anos chuvosos no NE. Embora estes dois fenômenos tenham uma tendência a se alternar a cada 3 a 7 anos, pode ocorrer que de um evento ao seguinte o período de recorrência possa variar de 1 a 10 anos (MOLION e BERNADO, 2002; SANTOS, 2008).

A velocidade dos ventos também está relacionada à circulação local/regional aumentando com a proximidade do litoral, como quando a brisa do mar e os ventos alísios coincidem, na chegada da primavera e o início do verão, eles geraram os ventos de maior velocidade do leste-nordeste, que aumentam a altura da onda e o transporte de areia eólica. (ZCEM/MARANHÃO, 2003; PAULA, 2016).

Metodologia

Primeiramente foi definida a área de estudo buscando identificar as localidades com as maiores taxas de dinâmicas da paisagem aparente, levando em consideração as interferências ocorridas na vida da população. A fim de subsidiar as escolhas metodológicas e técnicas aplicadas, foi realizado um levantamento bibliográfico que serviram como modelo e base, nessa etapa buscou-se informações em artigos científicos, monografias, dissertações e teses e também dados digitais georreferenciados que foram utilizados para registros das imagens orbitais como arquivos no formato “shapefiles” usando como fontes principais o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE),

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Maranhão (SEMA), Serviço Geológico do Brasil (CPMR).

Foram realizados trabalhos de campo em duas etapas, a primeira em Julho de 2016 e a segunda em Janeiro de 2017, para a aplicação de entrevistas com a comunidade com o objetivo de realizar um reconhecimento da área e compreender a percepção da dinâmica ambiental segundo a ótica dos moradores. A etapa de investigação junto à comunidade subsidiou a elaboração do mapa de mobilidade da população. Pontos foram coletados com base na orientação dos próprios moradores locais com uso de GPS, dos locais onde houve soterramento de residências por conta do avanço das dunas, além do monitoramento de deslocamento de dunas e de pontos de erosão da costa, com datas de 2016 e 2017, realizadas com coletas de pontos de GPS e comparadas ao serem aplicadas às imagens de satélite de seus respectivos anos, com o propósito de verificar as mudanças ocorridas.

Na preparação da base cartográfica foram adquiridas imagens obtidas pelo sensor Mapeador Temático (TM) do satélite Landsat 5 e sensor Operational Land Imager (OLI) Landsat 8, referentes ao ponto 62 e a órbita 219 dos anos de 1994, 1998, 2001, 2005, 2009, 2012, 2016 e 2017 disponíveis gratuitamente junto à Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As imagens adquiridas foram processadas com o auxílio do Software ArcGIS 10.2.2, possuem uma resolução espacial aproximada de 30 metros, foram escolhidas para o presente trabalho pela qualidade das cenas oferecidas e por não demandar custos ao usuário.

Para analisar a evolução multitemporal das dunas foram selecionadas quatro cenas de imagens orbitais da série Landsat, três do sistema Landsat 5/TM (1994, 2001 e 2009) e uma do sistema Landsat 8/OLI (2017). Normalmente ao adquirir imagens de diferentes anos as mesmas apresentam pequenos pontos de incompatibilidades entre sistemas de projeção e essa etapa de Georreferenciamento é extremamente importante para corrigir distorções e eliminar erros devido a passagem do satélite e curvatura da Terra.

Na etapa de pré-processamento são realizados procedimentos e técnicas de geoprocessamento que preparam e corrigem as imagens antes que os dados possam ser

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

gerados para análise, como as imagens Landsat 8, que são disponibilizadas na projeção Geográfica WGS 1984 para o hemisfério Norte. Além da reprojeção das bandas da imagem no ArcGIS 10.2 para o hemisfério Sul utilizando o algoritmo “*Project Raster*” (Arc Toolbox > Projections and transformations> Raster> Project Raster) foi realizado o registo de todas as outras imagens utilizadas para Coordenadas UTM– Zona 24 S - Datum WGS84 através do Georreferenciamento utilizando pontos de controle que se coincidem em todas as imagens utilizando um arquivo Shapefile, de ruas, quadras e rodovias do município, de escala 1:50.000, disponibilizado pelo SEMA-MA. Para servir de plano de fundo dos mapas temáticos, foi adquirido Imagens do Google Earth com data de 29/06/20016 e georreferenciadas através de pontos de controle inseridos na imagem e shapefiles com Coordenadas UTM– Zona 24 S - Datum WGS84.

No processamento de imagens são realizadas análises e a manipulação de modo que facilite o entendimento e diferenciação por parte do receptor com a finalidade de extrair informações. Após testes de combinações de bandas, chegou-se na composição RGB 521 nas Imagens Landsat 5 e RGB 632 na Imagem Landasat 8. Que permitiu uma boa percepção da deriva litorânea e a mudança da linha costa, as dunas móveis foram destacadas em tonalidades de branco, que atendeu o propósito de realçar a visualização do campo de dunas móveis e posteriormente foram aplicadas as composições de Cores Naturais (RGB Landsat 5, 321/Landsat 8, 432) para diferenciar os outros elementos presentes na imagem.

A evolução de linha de costa teve como base em pontos específicos marcados na faixa litorânea, foram escolhidos com auxílio dos relatos dos moradores. Foi considerado como linha de costa a zona úmida deixada pelo espreamento máximo das ondas na praia ao longo de 4,84 km, no ambiente do software ArcGis 10.2.2, três shapefiles vetorizados e georreferenciados, através de pontos de controle coletados em campo. Os shapefiles resultantes foram sobrepostos à Imagem Google Earth (de maior resolução) que permitiu uma melhor visualização dos processos costeiros mapeados. Também foram realizadas medições para quantificar o deslocamento das linhas de costa através da comparação entre elas, com base no método utilizado por Santos (2006, p.30). Foram realizadas medições em 32 linhas traçadas no sentido N-S, perpendicular a orientação

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

da linha de costa (Figura 2) ao longo dos 4,85km estudados, com espaçamento de 150m entre as medições, permitindo obter o cálculo da área de cada polígono associado aos processos de erosão ou progradação observados. Os valores dos perímetros foram extraídos e submetidos às formulas utilizadas por Santos (2006) para encontrar as taxas médias de erosão e progradação, assim como a velocidade média dos processos, valor da área erodida é a soma de todos os 32 trechos de 150m dispostos ao longo da costa.

Erosão:

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} A_i}{N_p}$$

Onde:

A_i = valor de cada trecho medido

E_m = erosão média

N_p = número de pontos

Σ = somatório

Velocidade:

$$V_{Em} = \frac{E_m}{T}$$

Onde:

V_{Em} = velocidade da taxa de erosão média

E_m = erosão média

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

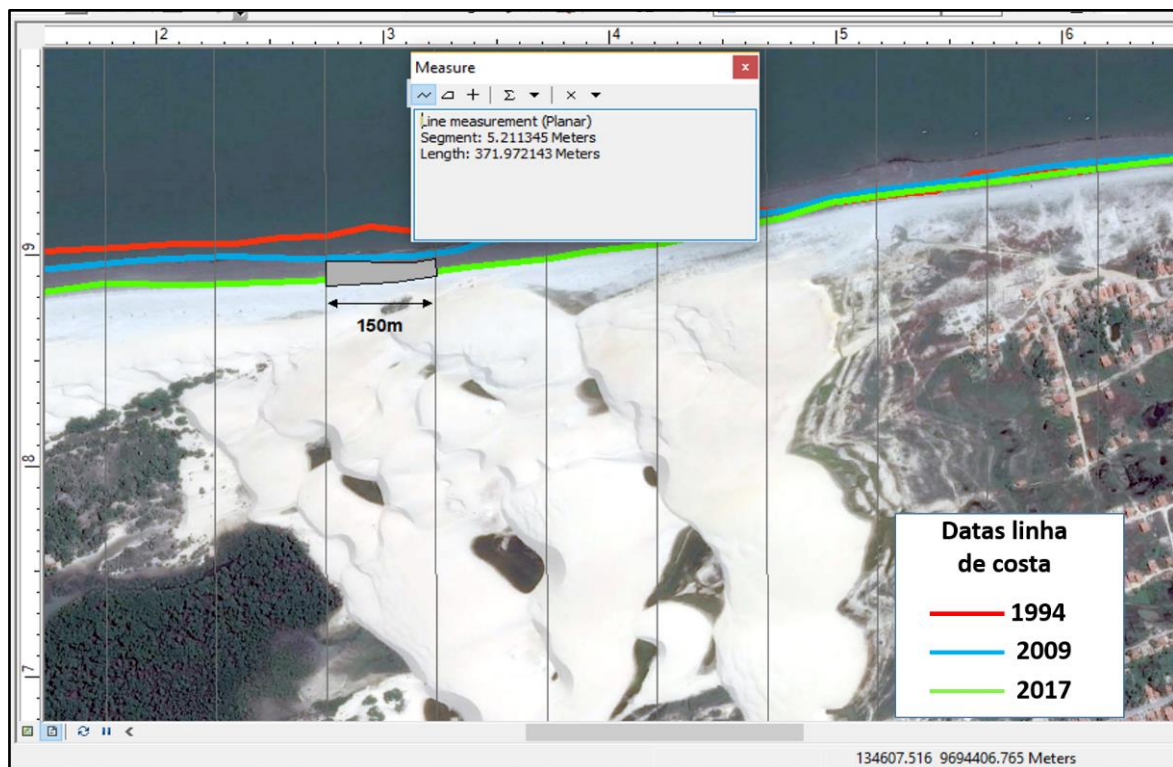


Figura 2: Área de trabalho ArcGis 10.2.2 com as 32 linhas traçadas no sentido N-S, com espaçamento de 150m entre elas, permitindo obter o cálculo da área de cada polígono.

O processo predominante na maior parte da costa estudada foi o de erosão (Figura 3), associado a retrogradação da linha de costa. Apenas no ponto Monumento Barco de São Pedro o processo de progradação foi observado, processo este relacionado a intervenções de origem antrópica. O trecho em questão foi aterrado no ano de 1996 para a construção de ruas para facilitar o acesso de veículos à praia e apresenta apenas uma variação de área no decorrer dos períodos trabalhados, mantendo-se estável desde então.

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

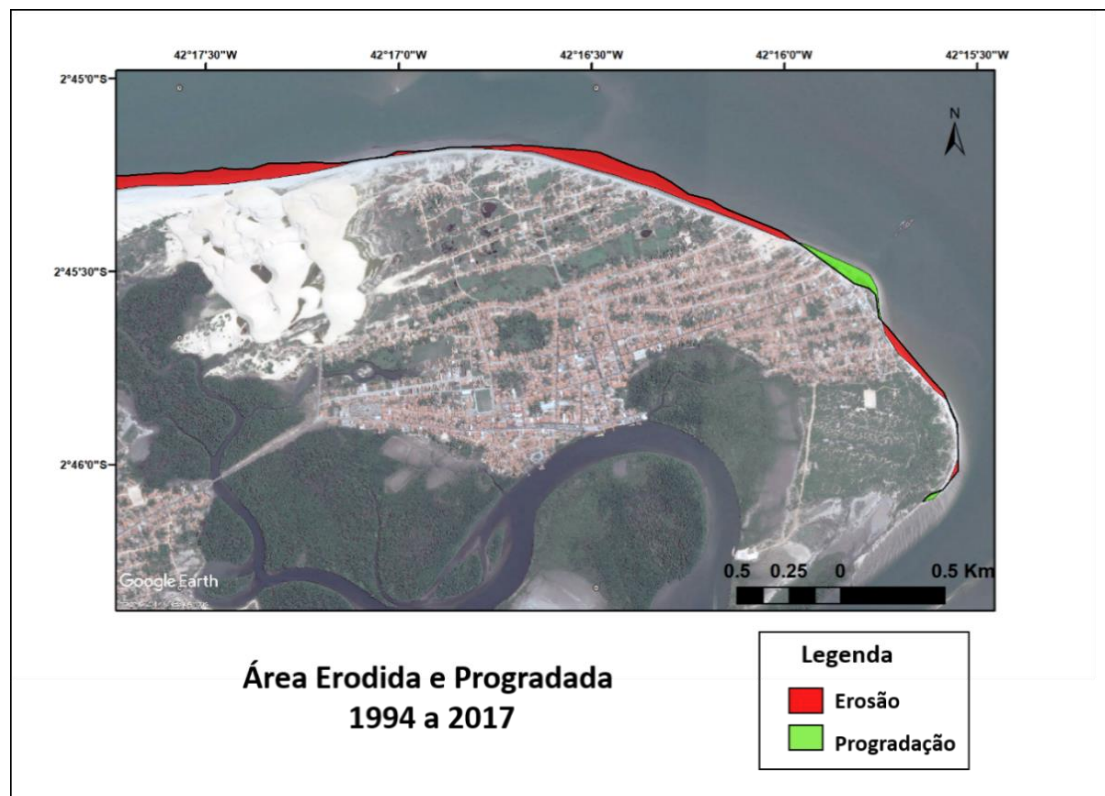


Figura 3: Área erodida e progradada entre os anos de 1994 e 2017, onde é visível a predominância de erosão no período estudado.

No período de 1994 a 2009 a área erodia foi de $163,9\text{m}^2$ apresentando a velocidade de $10,9\text{m}^2/\text{a}$, enquanto período de 2009 a 2017 a área erodida foi de $187,3\text{m}^2$ e apesar das taxas não serem tão discrepantes uma da outra é possível perceber que o processo erosivo teve uma maior intensidade no período de 2009 a 2017, onde apresentou a velocidade média de $23,3\text{m}^2/\text{a}$ já que teve a maior área erodida em menor tempo. (Tabela 1)

Tabela 1: Valores das áreas erodidas e progradadas, média de erosão e velocidade média para os períodos estudados.

PROGRADAÇÃO			
PONTO		1994- 2009	2009-2017
Monumento Barco de São Pedro		833 m ²	-----
EROSÃO			
Período	Área erodida (m ²)	Média de erosão (m ²)	Velocidade média (m ² /ano)
1994-2009	5.245m ²	163,9m ²	10,9
2009-2017	5.996m ²	187,3m ²	23,3

A erosão aqui verificada pode ser considerada uma erosão natural, por estar associada à causa naturais, não foi verificada nenhuma interferência nos rios que possa explicar a deficiência de sedimentação, atividades de agricultura, dragagem e mineração perto da praia ou atividades dentro d'água perto da praia. A região do Delta do Parnaíba tem os valores mais altos de maré na estação seca que estão relacionados às velocidades dos ventos. Em caso de interferência climática, esses ventos ocasionam correntes costeiras mais fortes trazendo como consequência erosão e baixa deposição, conforme Paula (2013).

Após análise das características naturais da área de estudo, que ocorreu pode ser considerado produto da interação entre processos costeiros e condições meteorológicas e oceanográficas, que foram intensificados devido a maior incidência de ventos alísios devidos aos eventos de El Niño em 2009-10 (moderado) e 2015-16 (muito forte). Entende-se a necessidade de verificar mais a fundo essa ocorrência, a análise multitemporal das imagens de satélite permitiram a identificação do evento, mas ainda é necessário investigar suas causas mais detalhadamente correlacionando dados climáticos e oceanográficos.

O mapa de mobilidade do campo de dunas seguiu a mesma metodologia de coleta de pontos guiados pelos moradores, levando em consideração construções soterradas e/as ameaçadas. Como modelo para o campo de dunas em geral, foi dado ênfase a três dunas específicas, por conter uma quantidade maior de informações pretéritas (Figura 4). As imagens escolhidas foram as mesmas utilizadas para a criação do mapa da dinâmica de linha de costa. O objetivo dos mapas temáticos criados era permitir a visualização da modificação da paisagem ao longo dos anos.

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

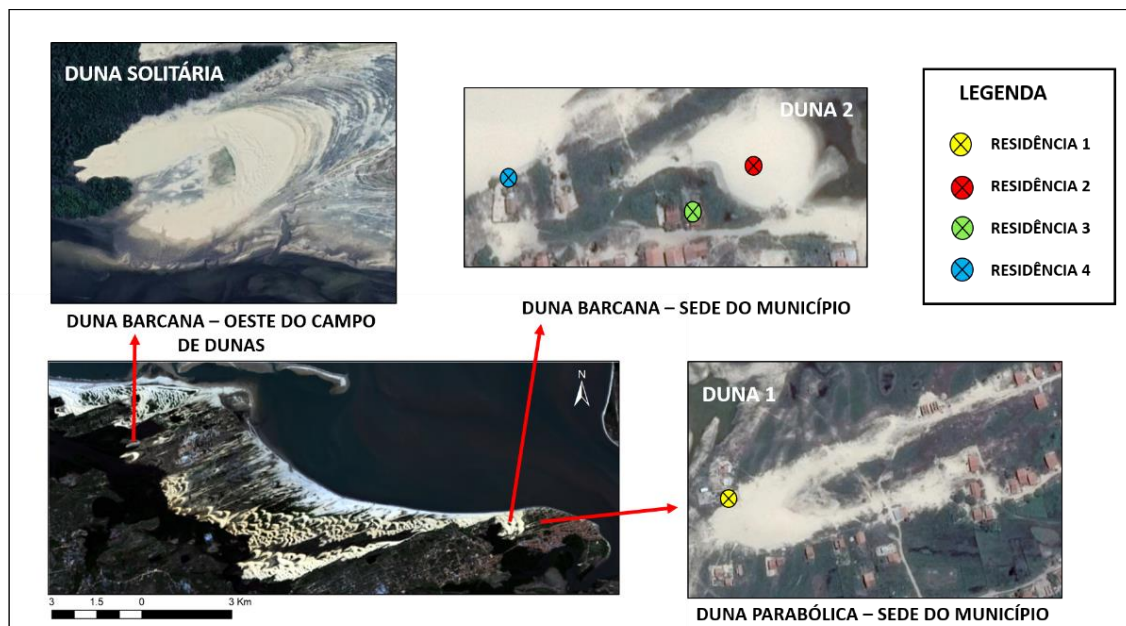


Figura 4: Detalhamento dos pontos coletados em campo e sua localização na área de estudo.

Uma forma de compreender melhor a transformação da paisagem em campos de dunas é analisando o comportamento eólico atuante na área. Para o campo de dunas de Tutoia buscou-se informações da dinâmica pretérita, se baseando principalmente nos trabalhos de Santos (2008) e Gonçalves (2003) voltados para os Lençóis Maranhenses e Paula (2013) que possui boas contribuições para o litoral do Piauí. A metodologia aplicada para medir em metros a migração das dunas foi seguir a direção de deslocamento dos sedimentos em relação a direção predominante dos ventos (ventos de NE). Foram identificadas as faces de deslizamento das dunas e traçadas retas ligando-as os vetores gerados de cada ano estudado. Posteriormente, para medir a velocidade de migração foi aplicada a fórmula de velocidade universal a seguir, a exemplo de Meireles (2011):

Onde:

$$V_{m/a} = \frac{E_m}{T_a}$$

V= velocidade em metros por ano.

E= espaço percorrido por duna em metros.

T= intervalo de tempo em ano

Resultados e discussões

O litoral da área de estudo tem como característica principal a presença de feições eólicas altamente dinâmicas. No entanto, não existem trabalhos que descrevam este processo dinâmico e sua área de ocorrência. Neste sentido, uma análise multitemporal foi utilizada para medições indiretas de sua mobilidade. Foi possível descrever a dinâmica do campo de dunas móveis e a velocidade em que a migração ocorre, bem como as interações entre elementos dentro da paisagem e como estes mudaram ao longo do tempo.

A análise multitemporal das imagens Landsat permitiu delimitar o campo de dunas através da vetorização, é possível perceber visualmente a migração no sentido ENE-WSW, verifica-se que os tipos de dunas predominantes são as Dunas Barcanas e Dunas transversais. As dunas Barcanas são formadas por ação de vento de apenas uma direção, como de fato ocorre na área de trabalho onde predomina a entrada de ventos de NE. Estes ventos se formam próximo às praias e se deslocam para o interior, tendo um deslocamento relativamente rápido. Já as dunas Transversais possuem menor taxa de deslocamento anual, são formadas pela ligação lateral de barcanas em lugares com maior volume de areia disponível. No geral, a área apresentou uma significativa progressão das formas Barcanas para formação de dunas Transversais no período de 1994 a 2017, tanto por conta da dinâmica natural costeira e como também por influência de alterações na ZCIT.

A área em questão apresenta uma concentração de residências onde muitos moradores já sofreram alguma perda ligada diretamente à mobilidade natural das dunas. Contudo, observa-se também que outros mais se encontram nesta zona de deslocamento, o que pode provocar no futuro novos prejuízos. A partir deste mapeamento foi possível extrair outras informações como velocidade média de deslocamento do campo de dunas e direção do deslocamento

A **duna Solitária** (Figura 5) se encontra na porção oeste do campo de dunas, numa área onde há poucos obstáculos e baixo aporte de sedimentos, o que explica sua forma barcana, e a torna um importante modelo para aplicação da metodologia utilizada no presente trabalho.

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

A sazonalidade acaba por controlar o deslocamento das dunas. A mobilidade deste tipo de dunas no litoral do Maranhão, de acordo com os estudos de Gonçalves (2003) e Santos (2008), ocorre devido aos aspectos climáticos da região, que durante o primeiro semestre do ano, a estação chuvosa permite a fixação das dunas fazendo com que haja pouca mobilidade. Já no período de estiagem que ocorre no segundo semestre, por conta do rebaixamento do lençol freático e do clima mais seco as dunas voltam a migrar. Tal característica climática favorece ainda a formação de Esteiras de dunas, que são arcos parabólicos definidos na superfície do terreno, deixando registrado os ressaltos ou cavas que fornece uma simples leitura sobre o intervalo de tempo de migração das dunas (GONÇALVES, 2003).

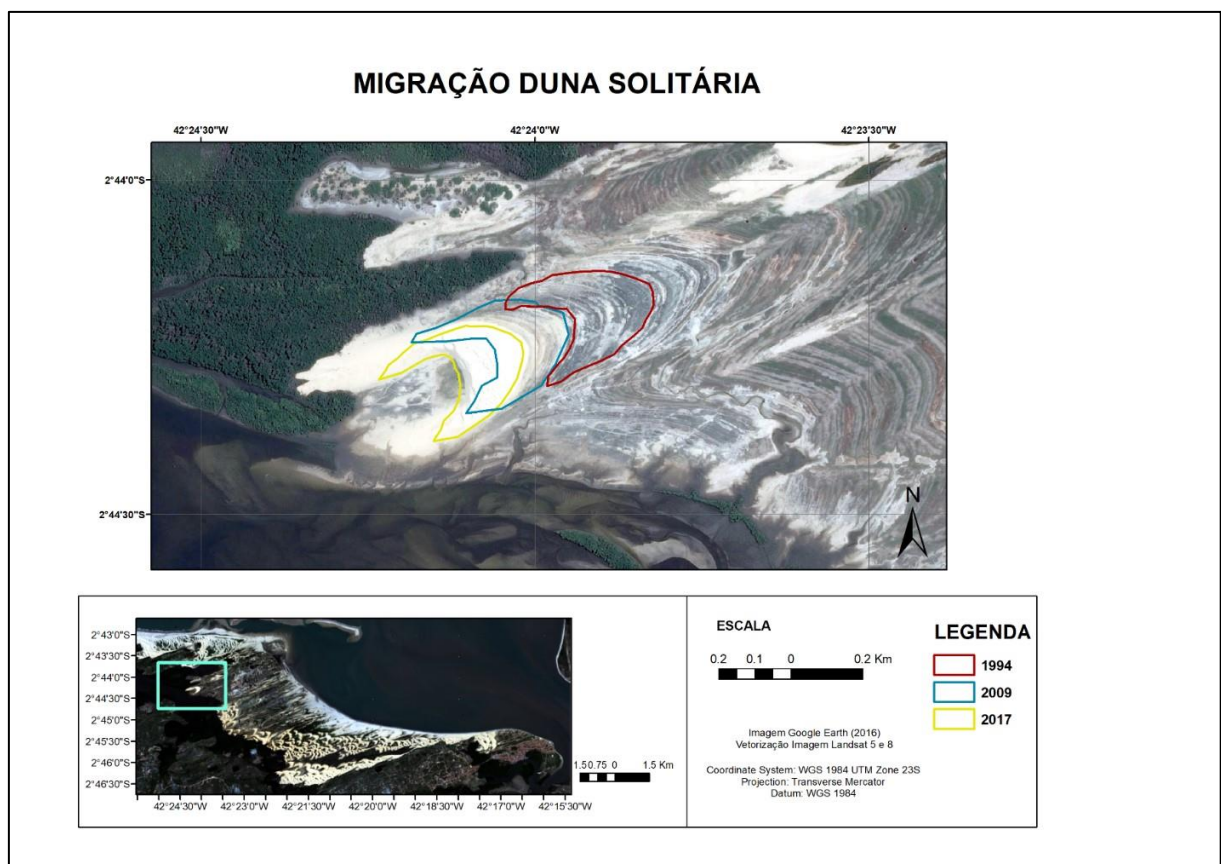


Figura 5: Deslocamento da Duna Solitária por período estudado

Ao aplicar a metodologia proposta chegamos nos valores de deslocamento por período e a velocidade de deslocamento por ano (Tabela 2) onde, o período de 2001 a

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

2009 apresentou o maior deslocamento e maior velocidade chegando a 18,8m/ano. O fato da duna ter se deslocado mais entre os anos 2001- 2009 pode ser explicado pela anomalia TSM que causa a escassez de chuvas e incidência maior de ventos na região NE. Essa anomalia ocorre junto aos eventos do El Niño, que nesse caso teve dois eventos moderados, um entre 2002-03 e outro entre 2009- 10, intercaladas com dois eventos de intensidade fraca, 2004-05 e 2006-07, enquanto no período de 1994-2001 houve apenas um registro desse evento de intensidade moderada, 1994-95, o que pode explicar o menor deslocamento dos períodos estudados. Nessas condições a escassez de chuva facilita a evaporação deixando os grãos mais secos, e a maior incidência de ventos favorece o transporte dos sedimentos.

Tabela 2: Valores de deslocamento e velocidade por período estudado.

Duna Solitária				
Período	1994-2001	2001-2009	2009-2017	1994-2017
Deslocamento em Metros	81,8m	150,7m	117,4m	349,9m
Velocidade (metros /ano)	11,6m/a	18,8m/a	14,6m/a	15m/a

No bairro Cajueiro, encontra-se uma duna classificada como Parabólica que ao contrário das Barcanas, possui a cauda da duna voltada contra o vento (Figura 6). A presença de Dunas Parabólicas nessa região se justifica pela presença de um ambiente úmido e com vegetação, o que facilita a fixação na parte inferior, diminuindo o movimento da areia nas caudas. Ao analisar os vetores para cada período e calcular o deslocamento, é possível verificar que a velocidade de deslocamento aumenta gradativamente tendo se deslocado 380,8m em 23 anos (Tabela 3).

Tabela 3: Valores de deslocamento e velocidade por período estudado.

Duna 1				
Período	1994-2001	2001-2009	2009-2017	1994-2017
Deslocamento em Metros	60,5m	146m	174,3m	380,8m
Velocidade (metros /ano)	8,6m/a	18,2m/a	21,7m/a	16,5m/a

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

Mesmo sendo perceptível a velocidade de deslocamento da duna, nos últimos 5 anos algumas residências (Figura 7) foram construídas bem próximas a ela e já apresentam sinais de comprometimento de suas estruturas mesmo não estando no caminho direto do deslocamento. Como exemplo temos a Residência 1 (Figura 8) que tem data de construção no ano de 2010 e que ficava a 118m de distância da duna e que hoje encontra-se comprometida, por conta de soterramento, por ter sido construída na rota de deslocamento da duna que segue a direção ENE-WSW.

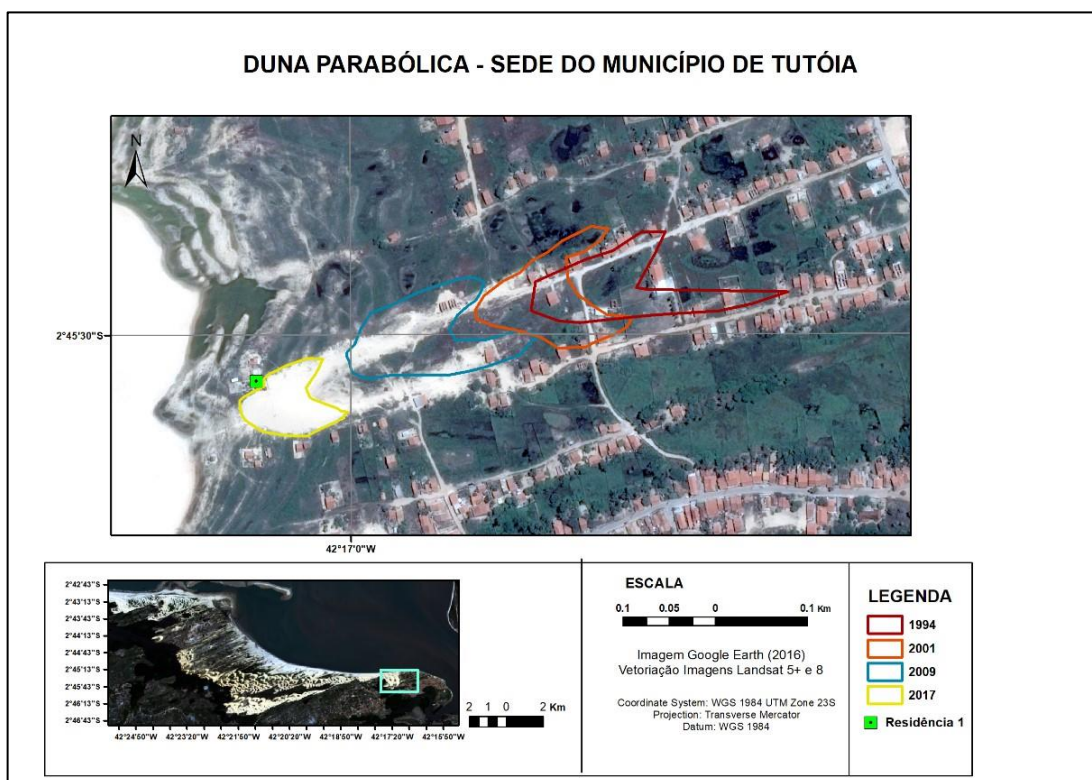


Figura 6: Deslocamento de Duna Parabólica (Duna 1) na sede do município



Figura 7: Residência construída nos últimos 4 anos que já apresenta interferências causadas pelo deslocamento da Duna Parabólica – Janeiro de 2017



Figura 8: Residência comprometida pelo avanço da Duna Parabólica - Janeiro de 2017

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

Além dos fatores climáticos, o aumento constante da velocidade de deslocamento da referida duna se deve à diminuição da vegetação da área. A restinga, os arbustos e pequenas árvores típicas da região diminuíram na última década, de acordo com os próprios moradores. O aumento do número de residências no local levou a retirada da vegetação tanto para a construção quanto para abertura de ruas, deixando o solo exposto e livre de qualquer barreira que impedisse ou diminuísse a migração da duna.

A **duna do bairro Cajueiro** pode ser classificada como Barcana em formação, por ter forma aproximada de “meia lua” e se encontrar isolada. Através da análise dos períodos de tempo é possível perceber que a mesma foi desmembrada naturalmente de dunas Transversais no período de 2009 a 2017 (Figura 9).

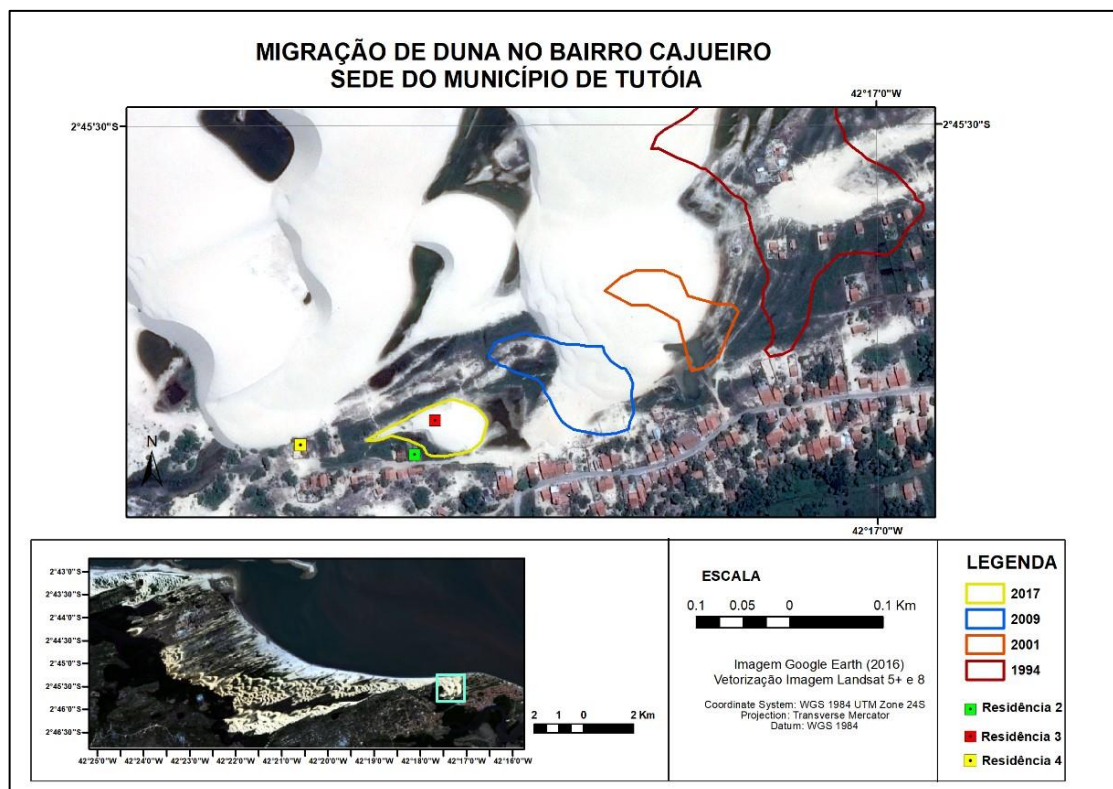


Figura 9: Migração de duna no bairro Cajueiro

A velocidade média de deslocamento no período de 1994 a 2001 era de 14,7m/ano, observou-se uma queda no período seguinte de 2001 a 2009 para 10,6m/ano por conta do desmembramento da duna, mas que voltou a subir no período posterior com uma média ainda maior que a primeira de 18,2m/ano (Tabela 4).

GeoPUC, Rio de Janeiro, v. 13, n. 25 - Dossiê, p. 433-457, set. 2020

O uso de imagens de satélite e de geoprocessamento como ferramentas na análise multitemporal da dinâmica costeira do litoral de Tutoia (MA)

Polyana Sá M. da Silva

Tabela 6: Valores de deslocamento e velocidade por período estudado.

Duna bairro Cajueiro				
Período	1994-2001	2001-2009	2009-2017	1994-2017
Deslocamento em Metros	103,3m	85.1m	146m	334,4m
Velocidade (metros /ano)	14,7m/a	10,6m/a	18,2m/a	14,5m/a

Através da pesquisa de campo foram identificadas residências já comprometidas, como a Residência 2 (Figura 10) que em 2005 ficava aproximadamente 200m distante da duna e que no mês de Janeiro de 2017 ficava a menos de 1m. Outra informação obtida em campo é que essa duna, que foi desmembrada, se encontra exatamente onde existia a Residência 3 que foi totalmente encoberta no ano de 2014. O desmembramento pode estar associado aos obstáculos (árvores) encontrados por grande parte da duna, que fez com que somente uma parcela migrasse e se depositasse mais à frente sobre a Residência 3, onde se aglutinou aumentando sua altitude rapidamente entre os anos de 2016 e 2017 conforme ao que foi visto em campo durante as pesquisas. A Residência 4 (Figura 11) está sendo comprometida pela parte dos fundos, e ainda não sofreu danos maiores por conta da construção de cercas para diminuir a velocidade, mas se encontra exatamente no eixo de deslocamento ENE-WSW.



Figura 10: Residência 2 já comprometida pelo avanço da duna



Figura 11: Residência 4, sofrendo influência pelos fundos da residência.

Partindo do pressuposto da velocidade do último período (18,2m/a) ser mantida, as residências que se encontram a oeste (Figura 9) que estão a 152m de distância das dunas estarão todas afetadas em cerca de 8 anos. Isso mostra que apesar das Imagens Landsat não apresentarem alta resolução, são eficientes em análises multitemporais, assim como na caracterização de processos naturais e determinação de estimativas de evolução da paisagem. O salto na velocidade de migração no último período pode ter relação com o evento do El Niño do período de 2015-16 que se influencia diretamente nas anomalias da TSM, ao elevar a temperatura da superfície do mar fazendo com que haja escassez de chuvas e incidência ventos com intensidade maior no segundo semestre (MENEZES *et al.*, 2008; CHAVES, 2011). Segundo os autores a predominância dos ventos na região é de sentido NE-SW, possuindo algumas variações ao longo do ano por conta da influência da ZCIT que ao se encontrar no Hemisfério Norte, no período de Maio a Junho, ocasionando os ventos direção E-W. A ZCIT começa a regressar em Julho para o Hemisfério Sul, dando início ao período de estiagem chegando em a sua posição máxima nesse hemisfério no mês de Outubro. Nesse período é que ocorre a maior incidência de ventos fortes de ENE-WSW na área de estudo e o aumento do transporte eólico.

Considerações finais

Estudos e pesquisas que envolvem o uso de técnicas de geoprocessamento são capazes de reunir e vincular objetos gráficos a estruturas de banco de dado. Permitem a realização de complexas análises espaciais, e associados ao conhecimento das características ambientais associado, configuram um excelente conjunto para a análise da evolução morfodinâmica costeira.

Na área de estudo em questão, permitiu identificar os processos erosão da costa, mesmo que em velocidade pequena, além de permitir identificar aspectos importantes sobre a dinâmica do campo de dunas. Os procedimentos de processamento de imagens digitais dos elementos multiespectrais da família Landsat, foram empregadas eficientemente para evidenciar pequenos contrastes na característica de cada elemento da paisagem. As imagens multiespectrais Landsat 5TM e 8 se mostraram eficientes e bastante úteis para análises em séries temporais,

principalmente por possibilitar a sobreposição de imagens e o cruzamento dos polígonos dos diferentes anos e sem custos pois sua disponibilização é gratuita, mesmo possuindo resolução espacial máxima de 30m. Além de apresentar elevado potencial para mapeamentos, tornam as pesquisas mais baratas por ter sua disponibilidade de forma gratuita.

Os resultados alcançados auxiliaram na compreensão da dinâmica costeira do município de Tutoia e permitiram caracterizar os processos dominantes ao longo da linha de costa identificando áreas de erosão e progradação, bem como permitiram espacializar a mobilidade dos campos de dunas, principalmente por se tratar de uma região com que sofre com a ausência de dados ambientais mais específicas. Além disso, evidenciam a necessidade de ampliar a investigação e o monitoramento sistemático dessas feições, produzindo novos dados afim de associar à dinâmica regional e global dos componentes meteorológicos, enfocando possíveis interferências das mudanças climáticas na dinâmica e evolução da paisagem costeira.

Somados a novos levantamentos, os resultados poderão subsidiar futuros projetos de planejamento ambiental e urbano na tentativa de minimizar o impacto sobre a população residente na área de estudo. E é de extrema importância dar continuidade na investigação, pesquisa, e monitoramento da dinâmica costeira e seus processos para que as tomadas de decisões sejam norteadas para manutenção do equilíbrio entre as exigências naturais e ecológicas com as demandas socioculturais e econômicas.

Referências

- CARVALHO, M. A. V. OYAMA, M. D. **Variabilidade da Largura e Intensidade da Zona de Convergência Intertropical Atlântica: Aspectos Observacionais.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.28, n.3, 305 - 316, 2013.
- CHAVES, R. R. **Conexões entre a TSM do Atlântico Sul e a convecção de verão sobre a América do Sul: análise observacional.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 29, n. 1, p. 5-20, 2011.

DIAS, J. L.; DE BRITO, J. I. B. **Posições do Cavado Equatorial e da Faixa de Máxima Tsm no Atlântico Tropical**. In: Anais III Workshop Internacional sobre água no Semiárido Brasileiro. Volume 1, 2017

GONÇALVES, R.A et al. **CLASSIFICAÇÃO DAS FEIÇÕES EÓLICAS DOS LENÇÓIS MARANHENSES-MARANHÃO-BRASIL**. Revista Mercator, v. 2, n. 3, 2003.

MARANHÃO. **Zoneamento Costeiro do Estado do Maranhão**. Fundação Sousândrade de Apoio e Desenvolvimento da Universidade Federal do Maranhão. /IICA/ GEAGRO/LABOHIDRO. 242p. 2003.

MEIRELES, A. J. A. **Geodinâmica dos campos de dunas móveis de Jericoacoara/CE-BR**. Mercator-Revista de Geografia da UFC, v. 10, n. 22, 2011.

MENEZES, H. E. A.; DE BRITO, J. I. B.; DOS SANTOS C. A. C.; DA SILVA, L. L. **A relação entre a temperatura da superfície dos oceanos tropicais e a duração dos veranicos no Estado da Paraíba**. In: Revista brasileira de meteorologia. vol.23. nº2. São Paulo, 2008.

MOLION, Luiz Carlos Baldicero; BERNARDO, S. de O. **Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 17, n. 1, p. 1334-1342, 2002.

MUEHE, D. C. E. H. et al. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, v. 1, p. 475, 2006.

SANTANA, W. S. C. **Análise-multitemporal da paisagem, potencialidades e fragilidades sob a ótica do uso e ocupação: destaque para as terras da Alta Bacia do Rio Taboco-MS**. Tese de Doutorado- Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2015.

SANTOS, R.A. **Processos de Erosão e Progradação entre as praias de Atafona e Grussaí – RJ**. 48p. Monografia – UFF, Niterói –RJ, 2006.

SANTOS, J. H. S. **Lençóis Maranhenses Atuais e Pretéritos: um tratamento espacial**. 250 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Geografia – UERJ, Rio de Janeiro, 2008.

SHORT, A. D. **Maranhão Beach Systems, Including the Human Impact on São Luís Beaches**. In: Brazilian Beach Systems. Springer, 125-152 p. 2016.

SILVA, C. V. F. **Planejamento do uso e ocupação do solo urbano integrado ao mapeamento de áreas com risco de inundação**. 166p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2013

PAULA, J.E.A. **Dinâmica Morfológica da Planície Costeira do estado Do Piauí: Evolução, Comportamento dos Processos Costeiros e a Variação da Linha De Costa**. 243p. Tese de Doutorado – UFC, Fortaleza – CE, 2013.

PEREIRA, L. C. C.; TRINDADE, W. N.; DA SILVA, I. R.; VILA-CONCEJO, A. e SHORT, A. D. **Maranhão Beach Systems, Including the Human Impact on São Luís Beaches**. In: *Brazilian Beach Systems*. Springer, 125-152 p. 2016.

Recebido em 23 ago. 2020;
aceito em 20 ago. 2020.