

Dispersão de sedimentos e morfologia subsuperficial: avaliação a partir de imagens RapidEye na área de entorno do Terminal Portuário do Pecém, Ceará

Cynthia Romariz Duarte¹
Fernando Pellon de Miranda^{2,3}
Luiz Landau³
Michael Vandesteem Silva Souto⁴
José Antonio Beltrão Sabadia⁴

¹Laboratório de Geoprocessamento – GEOCE – Departamento de Geologia – Universidade Federal do Ceará – UFC – Campus Universitário do Pici, Bloco 912 – 60455-900 – Fortaleza – CE, Brasil.
Bolsista CNPq de Pós-doutorado Sênior – Laboratório de Sensoriamento Remoto por Radar Aplicado à Indústria do Petróleo – LabSAR/COPPE/UFRJ. cynthia.duarte@ufc.br

² Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras – CENPES – Av. Horácio Macedo, 950, Cidade Universitária, Ilha do Fundão – 21.941-915 – Rio de Janeiro – RJ, Brasil. fmiranda@petrobras.com.br

³ Laboratório de Sensoriamento Remoto por Radar Aplicado à Indústria do Petróleo – LabSAR/COPPE/UFRJ – CT, Bloco I-214, Cidade Universitária – 21.949-900 – Rio de Janeiro – RJ, Brasil. landau@lamce.coppe.ufrj.br

⁴ Departamento de Geologia – Universidade Federal do Ceará – UFC – Campus Universitário do Pici, Bloco 912 – 60455-900 – Fortaleza – CE, Brasil. michael.souto@ufc.br, beltrao.sabadia@gmail.com

Abstract. The investigation of seabed features and sediment dispersal are important factors in the mapping of morphological change in coastal areas, especially in areas that have anthropic interventions, such as those occurring in the region adjacent to the Pecém Port Terminal (TTP). In this sense, remote sensing products that allow the mapping of submerged features present as an effective and low cost method. The objective of this study is to map the submerged sedimentary features and sediment dispersion sectors, along the coastline, to the TTP undersea. The digital image processing allowed zoning of the study area based on the background morphology and the presence of sediments. Currently the TTP is in the process of expansion and a new access bridge has been built, which has been significantly modifying the natural coastal dynamics around the TTP.

Palavras-chave: RapidEye images, Coastal monitoring, Pecem Port Terminal,

1. Introdução

O conhecimento da área costeira é de grande importância, visto que muitas atividades humanas são desenvolvidas nestes ambientes. Levantamentos batimétricos são cruciais para a navegação em qualquer corpo aquoso, além de serem necessários para as modelagens hidrodinâmicas e acompanhamento de processos de erosão ou assoreamento. Os levantamentos batimétricos por ecobatímetro são lentos e de alto custo, uma vez que necessitam de embarcação e pessoal capacitado. Uma alternativa eficiente e de baixo custo para o mapeamento batimétrico e a interpretação de feições submersas em áreas costeiras é a extração destas informações a partir de imagens multiespectrais obtidas sensores remotos, técnica que vem se consolidando, nos últimos anos, como uma, conforme demonstram diversos autores, tais como Vianna *et al.* (1991), Testa e Bosence (1999), Andréfouët e Riegl (2004), Hamel e Andréfouët (2010), Duarte *et al.* (2016), Araújo e Amaral (2016), dentre outros. Entretanto, o uso de imagens de satélite para este tipo de investigação, mesmo em águas pouco profundas, é dificultado pela atenuação do sinal de reflexão das feições submersas, ao longo da coluna d'água, incluindo-se fatores tais como espalhamento e absorção por materiais dissolvidos e/ou em suspensão presentes na água e profundidade. Segundo Hernández e Armstrong (2016) estas dificuldades podem ser minimizadas ao se

empregar imagens multiespectrais de alta resolução espacial, que operem na região do visível (VIS) do espectro eletromagnético.

Atualmente o TTP está em processo de ampliação e uma nova ponte para acesso vem sendo construída, para dar acesso aos três novos berços de atracação a serem instalados no Terminal de Múltiplas Utilidades – TMUT, que devem atingir cerca de 18m de profundidade natural, permitindo a atracação de navios de carga de maior porte e os que se destinam a Companhia Siderúrgica do Pecém (CEARÁ, 2016). Esta ampliação vem modificando significativamente a dinâmica costeira no entorno do TTP, com a modificação das áreas de sedimentação e das correntes de deriva.

2. Área de estudo

O Terminal Portuário do Pecém está localizado em São Gonçalo do Amarante, distando aproximadamente 50 km de Fortaleza (CE), possuindo excelente localização geográfica, próximo às rotas marítimas para o hemisfério norte, e localmente não sujeita à variação de fortes marés, com calado profundo, possibilitando a atracação de navios de grande porte (Figura 1).



Figura1: Mapa de localização da área de estudo.

A concepção do terminal, com estrutura *offshore*, com calado de até 20 m, bem como a preocupação com a preservação das condições ambientais, fez com que as instalações para atracação de navios se localizassem a aproximadamente 1,5 km distância da costa, tendo sido necessária, portanto, a construção de uma ponte de interligação entre os píeres de atracação e instalações em terra. Por se tratar de um porto *offshore* artificialmente abrigado, foi construído um quebra-mar na forma de "L", cuja finalidade foi de criar uma baía artificial de águas calmas, onde estão situados os píeres de atracação.

A área de estudo está localizada no promontório do Pecém, formado por rochas pré-cambrianas do Grupo Ceará, circundado e soterrado por sedimentos de tabuleiros pré-litorâneos do Grupo Barreiras de idade cenozoica e dunas móveis recentes. Este promontório divide geologicamente a área em duas porções distintas: uma a SE, onde predominam processos de transporte e/ou erosão de sedimentos e a porção da pequena enseada do Pecém a NW, onde predominam processos de sedimentação (MAGINI *et al.*, 2013).

Geologicamente, a ponta do Pecém é formada, segundo os citados autores, por quartzitos e gnaisses, que ocorrem desde o pós-praia até uma profundidade de 20m, sendo o conhecimento de sua distribuição fisiográfica emersa e submersa importante para a determinação do posicionamento da ponte de acesso aos píeres e ao quebra-mar. Dispostos diretamente sobre o embasamento, ocorrem tabuleiros pré-litorâneos da Formação Barreiras, compostos por sedimentos areno-argilosos, com coloração variando entre cinza claro a

avermelhado, granulometria variando entre média a grosseira, ocorrendo como tabuleiros e ao longo do litoral, com suaves inclinações para o mar. Tal sequência é localmente representada por falésias mortas, falésias vivas mais a NW da área e recifes ferruginosos ao lado de rochas de praia. Sobrepostos aos tabuleiros, na área direta de influência do porto, ocorrem os sedimentos quaternários, representados pelos sedimentos litorâneos, constituídos de arenitos de praias, cordões litorâneos, paleodunas e dunas. As paleodunas, repousam sobre os sedimentos da Formação Barreiras, de forma discordante, tendo sido formadas pela ação dos ventos alísios e depois fixadas pela vegetação. As dunas formam frentes móveis e rampas de barlavento ativas, que cavalgam as paleodunas e a Formação Barreiras, cujos sedimentos provém da erosão eólica costeira.

3. Metodologia de Trabalho

3.1 Dados

Neste trabalho foi empregada uma imagem multiespectral RapidEye, ortorretificada, com 5m de resolução espacial, disponibilizada no banco de imagens Geocatálogo do Ministério de Meio Ambiente (<http://geocatologo.mma.gov.br/>).

A cena selecionada, ID 2437415, foi obtida sem cobertura de nuvens, em 18 junho de 2014, em condições de baixamar, com ventos estimados em 3 m.s^{-1} e umidade do ar na ordem de 60%. Séries históricas anuais de ventos obtidas pelo anemômetro na região portuária do Pecém apresentam valores mais baixos ao longo dos meses de janeiro a junho. Segundo Maia (1998) a velocidade média anual dos ventos na costa do Ceará oscila de $2,5 - 4,5 \text{ m.s}^{-1}$. A variação sazonal de ondas na região costeira do Ceará, está fortemente relacionada com a direção e intensidade dos ventos. A boia oceanográfica WaveWatch III, localizada na costa central cearense, coletou dados de altura significativa de ondas entre 1,92 e 2,15m e com direções variando entre 119 e 130°.

O intervalo espectral da banda azul das imagens RapidEye (440 a 510nm) inicia-se muito próximo ao comprimento de onda da banda azul costeiro (*coastal/aerossol band*) do sensor OLI do Landsat 8 (430 a 450 nm), potencializando assim as medições de radiância do fundo do mar (Monteys *et al.*, 2015). Além da banda azul, foram empregadas as bandas do verde (520 a 590nm) e a banda NIR (760 a 850 nm), que superou a banda *Red-edge* (690 a 730nm) na delimitação da interface continente-mar.

Bons trabalhos com dados de sensoriamento remoto ótico dependem das condições atmosféricas e ambientais, tais como a cobertura de nuvens, turbidez das águas, altura de ondas e refletância solar nas ondas no momento da aquisição da imagem. Entretanto, os ruídos imputados por estes fatores podem ser retirados e as correções da superfície do mar podem ser realizadas antes da derivação profundidade.

3.2 Pré-processamento

Refletância de um alvo pode ser definida pela a proporção entre a radiação que o atinge e a radiação por ele refletida, permitindo que diversos materiais possam ser identificados pelos seus espectros de refletância. Para isso, é comum corrigir uma imagem, de números digitais relativos (DNs) para radiância, a fim de localizar e/ou identificar características numa imagem.

As imagens RapidEye (ortho, 3A) tem resolução radiométrica de 12bits, entretanto, a partir de correções radiométricas aplicadas as imagens são dimensionadas para 16 bits. Esta escala converte DN's de pixels provenientes do sensor, em valores diretamente de radiância absoluta. O fator de escala é aplicado de modo que os valores de DN's individuais resultantes correspondem aos $1/100\text{th}$ de um $\text{W/m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$. Para converter os DN's em radiância é necessário multiplicar os valores de DN por um fator de escala radiométrica igual a 0,01 (Planet Lab, 2016).

A imagem, corrigida atmosféricamente, resulta numa imagem de reflectância da superfície, eliminando a influência da reflectância de topo de atmosfera (TOA), que inclui, além da reflectância da superfície, os valores de reflectância de nuvens, aerossóis atmosféricos e gases presentes na atmosfera terrestre.

Após a eliminação dos efeitos atmosféricos, a imagem de reflectância está pronta para ser usada para extrair informações qualitativas e quantitativas sobre características da superfície terrestre.

3.3. Processamento Digital

Técnicas de processamento digital de imagens de sensoriamento remoto foram aplicadas à cena que contém a área do Terminal Portuário do Pecém (TTP) e entorno, com a finalidade de interpretar as feições morfológicas de fundo e extrair a batimetria qualitativa da área, a partir da imagem empregada.

Para extração das feições morfológicas de fundo foram empregadas composições coloridas na região do visível do espectro eletromagnético (EEM), às quais também foram aplicadas filtragens direcionais e análise por principais componentes.

Os realces de contrastes aplicados aos histogramas da imagem, baseiam-se em métodos de transformações lineares e não-lineares na radiometria da imagem (Crósta, 1992) que permite melhor discriminar aos alvos presentes da mesma. Já a aplicação de filtros direcionais, tem como objetivo, realçar bordas numa determinada direção e, portanto, a interpretação dos dados após a aplicação da filtragem deve ser feita com atenção pois o mesmo pode bordas artificiais que confundem na hora da interpretação (CRÓSTA, 1992).

A alta correlação existente entre as bandas de um sensor pode ser minimizada através da aplicação da análise por principais componentes que, permite eliminar as redundâncias entre os dados presentes nas diversas bandas sem, no entanto, gerar perdas significativas na informação presente na imagem (CRÓSTA, 1992).

Para a estimativa da batimetria qualitativa e fluxo de sedimentos em suspensão no entorno do TTP foi aplicado o processamento NDWI (*Normalized Difference Water Index*) que possibilita a visualização e interpretação das feições presentes em corpos d'água.

4. Resultados e Discussão

Os processamentos aplicados à imagem Rapideye de 2014 permitiram a geração de novas imagens que, interpretadas, permitem uma melhor compreensão dos fenômenos que vem modificando a dinâmica costeira no entorno do TTP.

4.1. Composições coloridas

A composição RGB 321 (*true color*) clássica e costumeiramente empregada para investigações da morfologia subsuperficial não apresentou bons resultados, tendo sido necessária a aplicação de uma equalização do contraste para que sua interpretação pudesse ser efetuada (Figura 2). Outra composição colorida empregada para o reconhecimento das feições de subsuperfície e dispersão dos sedimentos foi a composição RGB 125 a qual foi aplicado um realce gaussiano de contraste (Figura 3).

4.2. Filtragem direcional

À banda 2 (verde) foi aplicado um filtro direcional buscando realçar as feições morfológicas de fundo presentes na área. A partir deste processamento e sua correlação com outras cenas geradas foi possível interpretar que a dinâmica da dispersão do material em suspensão também é influenciada pelas feições submersas. A figura 4a apresenta a imagem da banda 2 a qual foi aplicado o filtro direcional e a figura 4b apresenta um *zoom* da área, onde é

possível se observar algumas das feições subsuperficiais, como dunas transversais à linha de costa, que modificam visivelmente a dispersão dos sedimentos em suspensão.

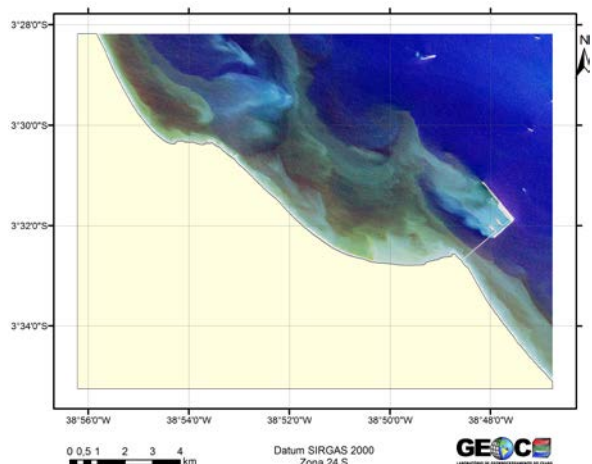


Figura 2: Composição *true color* com contraste equalizado.

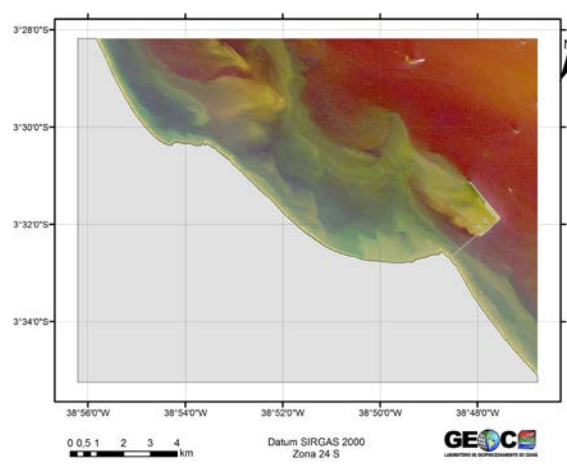


Figura 3: Composição RGB 125

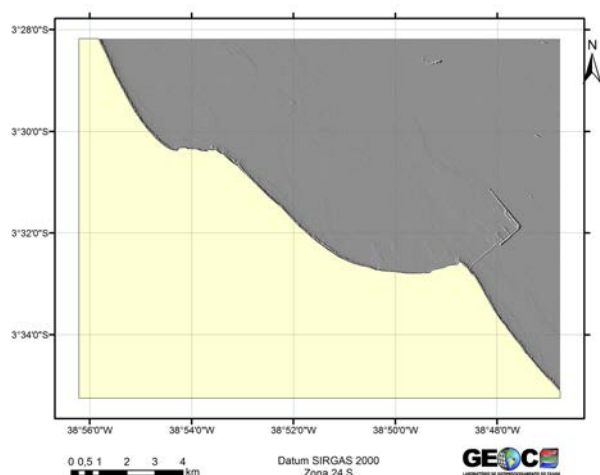


Figura 4a: Banda 2 com filtro direcional

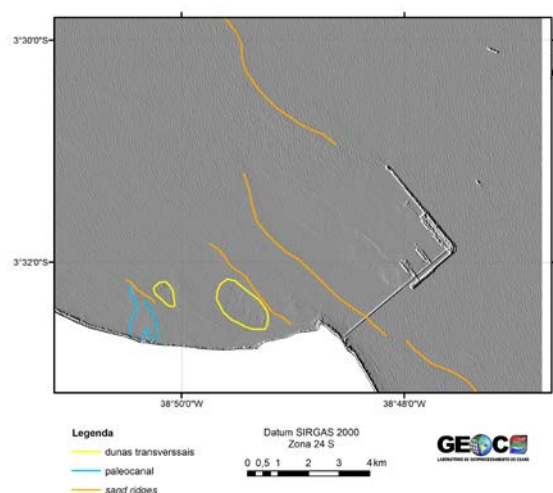


Figura 4b: Detalhe da banda 2 com feições submersas interpretadas.

4.3 Análise por principais componentes

A análise por principais componentes (ACP), foi efetuada apenas para as bandas do visível da imagem e para a parte costeira, com uso de uma máscara na parte *on shore* da imagem, a fim de eliminar a influência dos alvos continentais na análise (Figura 5). Esse processamento permitiu constatar como a presença dos píers de atracação do TTP atuam na dispersão natural do material particulado em suspensão, ao longo da costa a oeste do porto, em sua relação com a linha de costa, direção de correntes e com a deriva litorânea. A Tabela 1 apresenta a matriz de autovalores e autovetores gerada na ACP executada.

A Figura 6 apresenta um *zoom* da composição RGB 321, onde também é possível observar como o quebra-mar construído para abrigar o porto atua na modificação da dispersão dos sedimentos.

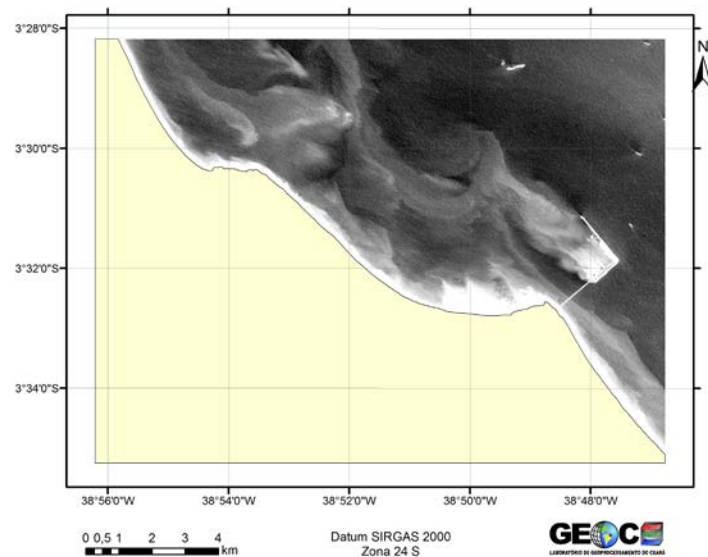


Figura 5: PC1 da análise por principais componentes aplicada às bandas do visível da imagem RapidEye empregada.

Tabela 1: Autovetores e autovalores obtidos para a ACP aplicada a imagem da área.

Autovetor	PC 1	PC 2	PC 3
Banda 1	0.441622	0.671724	0.594774
Banda 2	0.893441	-0.268621	-0.360009
Banda 3	0.082058	-0.690384	0.718775
Autovalor	2303288.7	139866.9	62024.05
	4	9	
Variância explicada (%)	91,94	5,58	2,48
Variância explicada acumulada (%)	91,94	97,52	100

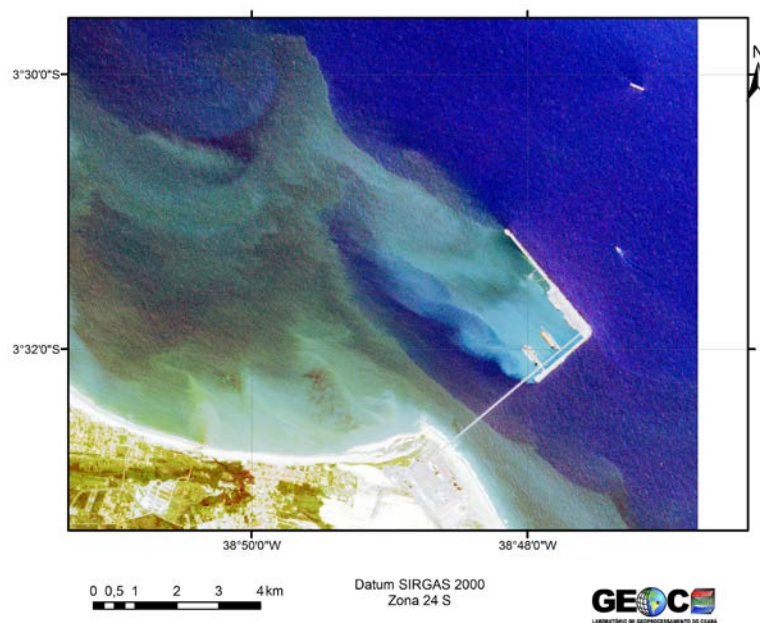


Figura 6: Influência do quebramar na dispersão dos sedimentos no entorno do TTP (composição RGB 321).

4.4. NDWI - Índice de diferença normalizada da água

Emprega-se o NDWI para maximizar a reflectância típica de feições presentes na água, nos comprimentos de onda do verde, tais como plumas de sedimentos em suspensão, minimizando a baixa reflectância dos alvos *off shore* nos comprimentos de onda do infravermelho próximo (NIR), valorizando também a alta reflectância de feições *on shore* neste comprimento de onda.

A figura 7 ilustra claramente a dispersão dos sedimentos, seguindo seu movimento natural de dispersão ao longo da linha de costa, na altura da ponte que interliga o quebramar que contém os píeres de atracação, bem como a área afetada pela presença deste muro, gerando uma modificação no padrão natural de modificação da linha de costa.

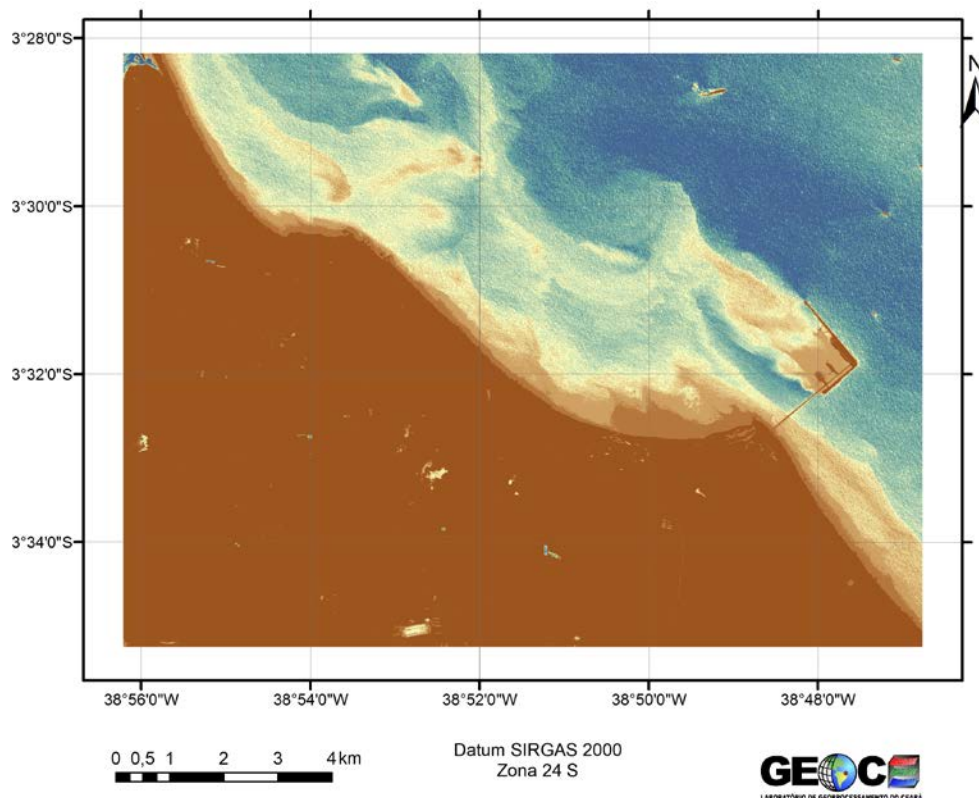


Figura 7: NDWI aplicado a área de estudo, onde as áreas em castanho são as mais rasas e as áreas em tons de azul as mais profundas.

5. Conclusões

A aplicação de imagens orbitais de sensoriamento remoto se caracteriza como uma importante ferramenta disponível para estudos nas mais diversas áreas do conhecimento humano. Novas fontes de dados, bem como a disponibilidade desses dados em portais para aquisição gratuita, vem permitindo que estudos e monitoramentos sejam feitos com maior frequência.

Dentre os processamentos aplicados à imagem RapidEye empregada neste estudo, os que geraram os melhores resultados foram a análise por principais componentes e o NDWI, que permitiram mapear a dispersão dos sedimentos em suspensão ao longo da linha de costa, nas proximidades do porto. Já para o mapeamento das feições submersas, principalmente em função da alta concentração de sedimentos em suspensão presentes, a melhor imagem encontrada foi a banda 2 a qual foi aplicado o filtro direcional.

Em função da construção do novo acesso, da ampliação do porto e rapidez com a qual o entorno vem se modificando, tanto pelas forças de dinâmica natural, quanto pela ação

antrópica, os autores sugerem a continuidade do monitoramento da linha de costa, da dispersão de sedimentos em suspensão e da avaliação dos ambientes no entorno do terminal a fim de gerar um diagnóstico atual sobre a área.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ministério do Meio Ambiente, a disponibilização da imagem RapidEye empregada neste trabalho e ao CNPq pela bolsa PDS.

Referências

- Andréfouët, S., Riegl, B. 2004. Remote sensing: a key tool for interdisciplinary assessment of coral reef processes. **Coral Reefs**, 23(1):1-4. doi: 10.1007/s00338-003-0360-z
- Araújo, P.V.N., Amaral, R.F. 2016. Mapping of coral reefs in the continental shelf of Brazilian Northeast through remote sensing. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 16, n. 1, p. 5-20. doi: 10.5894/rgci629
- Ceará. Expansão Porto do Pecém - INPH e Marinha realizam batimetria. Disponível em: <http://www.ceara.gov.br/sala-de-imprensa/noticias/18566-expansao-porto-do-pecem-inph-e-marinha-realizam-batimetria>. Acesso em 12/11/2016.
- Crósta, A.P. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas: Editora Unicamp. 1992. 170 p.
- Duarte, C.R., Cordeiro, E.F., Araujo Da Costa, J.H.B., Sabadia, J.A.B., Salgueiro, A.R., Souto, M.V.S., Silva Filho, W.F. 2016. Principal component analysis and morphostructural characterization of a portion of the eastern continental shelf of Ceará, Brazil, using Landsat 5-TM images. **Journal of Sedimentary Environments**, 1(3): 324-333. doi: 10.12957/jse.2016.25905
- Hamel, M.A., Andréfouët, S. 2010. Using very high resolution remote sensing for the management of coral reef fisheries: Review and perspectives. **Marine Pollution Bulletin**, 60 (9): 1397 – 1405. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.07.002
- Maia, L.P. 1998. Procesos Costeros y Balance Sedimentario a lo Largo de Fortaleza (NE-Brasil): Implicaciones Para Una Gestión Adecuada de la Zona Litoral. Barcelona, 1998. 260f. Tese (Doutorado em Ecologia) - Departamento de Ecologia. Universidade de Barcelona.
- Magini, C.; Martins, A.H.O.; Pitombeira, E.S. 2013. A infraestrutura portuária e suas Influências na sedimentação costeira na Vila do Pecém, Ceará, Brasil. **Geociências**, UNESP, São Paulo, v. 32, n.3, p.532-546, 2013.
- Monteys, X., Harris, P., Caloca, S., Cahalane, C. 2015. Spatial Prediction of Coastal Bathymetry Based on Multispectral Satellite Imagery and Multibeam Data. **Remote Sens**. 2015, 7, 13782-13806. doi: 10.3390/rs71013782
- Planet Lab. 2016. Satellite Imagery Product Specifications. Disponível em: <https://assets.planet.com/docs/1601.RapidEye.Image.Product.Specs_Jan16_V6.1_ENG.pdf> Acesso em: 18.ago.2016.
- Testa, V., Bosence, D.W.J. 1999. Physical and Biological controls on the formation of carbonate and siliclastic bedforms on the north-east Brazilian shelf. **Sedimentology**, 46(2):279-302.
- Vianna, M. L., Solewicz, R., Cabral, A. P. 1991. Sandstream on the Northeast Brazilian Shelf. **Continental Shelf Research**, v.11, n. 6, p. 509-524.