

Monitoramento da linha de costa do Parque Nacional do Cabo Orange através da análise multi-temporal de imagens de sensores remotos.

Edmilson das Mercês Batista¹
Pedro Walfir Martins e Souza Filho^{1,2}
Odete Fátima Machado da Silveira²

¹ Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica - CG/ UFPA

² Laboratório de Análises de Imagens do Trópico Úmido – LAIT, CG/ UFPA
Caixa Postal 86075, CEP: 66075-110, Belém, Pará
{ebatista, walfir, silveira}@ufpa.br

Abstract. Multi-temporal optical and microwave (SAR) remote sensing images have allowed the mapping and changes of the shoreline. Landsat (MSS, TM and ETM+), JERS-1 SAR, RADARSAT-1 (Wide 1 Mode) and SRTM images acquired from 1980 to 2003 were digitally orthorectified and enhanced. These processed images were inserted in a geographic information system (GIS) to map and quantify the shoreline changes occurred during 23 years along the Cabo Orange National Park. The process of deposition was responsible for mangrove progradation, which accreted 55,85 km² in the period, while erosive process was responsible for shoreline retreat, and erosion of 31,69 km² of mangrove areas. Therefore, the mangrove areas increased around 24,16 km². This suggest that Orange and Cassipore mud capes work out as modern deposits of muds transported from the Amazon river mouth.

Palavras-chave: multi-temporal analysis, mangroves, mud capes, Amazon, análise multitemporal, manguezais, cabos lamosos, Amazônia.

1. Introdução

A zona costeira amapaense, devido sua localização adjacente à Foz do Rio Amazonas, constitui-se de um ambiente dinâmico, influenciado por enormes descargas de água doce e sedimentos, onde as modificações na linha de costa estão vinculadas a severos processos de sedimentação e erosão (Nittrouer et al., 1991). O Amazonas despeja aproximadamente 16% de toda a água doce descarregada nos oceanos (Oltman, 1968) e uma descarga de sedimentos estimada em $1,2 \times 10^8$ ton/ano (Meade et al., 1985). Do total de sólidos lançados anualmente no Oceano Atlântico, de 10-15% atinge o litoral amapaense e a Guiana Francesa na forma de planícies de maré lamosas (Allison et al., 1995). Estas planícies funcionam como verdadeiros depósitos de lamas amazônicas e são ocupadas, em grandes extensões, por florestas de manguezais (Schaeffer-Novelli et al., 2000).

Em estudos de monitoramento costeiro, a existência de imagens de sensores remotos de diferentes épocas, converte a análise multi-temporal 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 destes sistemas (Trebossen et al., 2005, Chu et al., 2006).

Na presente pesquisa, o geoindicador da linha de costa adotado foi o correspondente a vegetação de mangue, que permanece invariável independente da condição de maré (Souza Filo et al., 2006). Este indicador foi definido em virtude de sua capacidade para mensurar e avaliar processos e formas costeiras, considerando a alta reflectividade da vegetação de mangue em imagens de sensores remotos ópticos na região do infra-vermelho (Souza Filho & Paradella, 2003). De modo similar, em imagens SAR, este tipo de vegetação apresenta retroespalhamento devido variações em sua altura, na geometria de seu dossel e no conteúdo de umidade (Proisy et al., 2000).

O presente trabalho explora a possibilidade do uso de dados de sensores remotos no estudo do monitoramento das modificações costeiras de médio período, no trecho que

compreende os cabos Cassiporé e Orange, ambos localizados no extremo norte do Amapá, em ambiente tropical úmido amazônico.

2. Área de Estudo

A área investigada está localizada a 400 Km da foz do Rio Amazonas, entre as latitudes 3° e 5° Norte e 51° e 52° de Longitude Oeste, sendo representada pelo Parque Nacional do Cabo Orange, o qual é formado pelos Cabos Cassiporé e Orange (**Figura 1**).



Figura 1: Localização da Área de Estudo, mostrando distribuição das unidades morfoestruturais Planalto e Planície Costeira.

Estas duas feições segundo Allison et al., (1995), fazem parte dos 16 maiores cabos lamosos formados ao longo do Sistema de Dispersão Amazônica por cerca de 1.600 Km da costa nordeste da América do Sul, no trecho que compreende a foz do Rio Amazonas e o Rio Orenoco (Venezuela).

O embasamento regional do planalto costeiro é formado por rochas do Escudo Pré-cambriano das Guianas. Em menores proporções estão os depósitos Neógenos plio-plestocênicos - Grupo Barreiras (CPRM, 2004), manifestados na paisagem através de um relevo com suaves ondulações, cujas cotas topográficas variam de 30 a 200 metros.

Na zona costeira da área de estudo estão os sedimentos holocênicos de origem marinha e flúvio-estuarina, Está inserida em uma costa aberta dominada por mesomarsés (amplitudes de 2-3 metros; DHN, 2004).

O clima é do tipo Ami, segundo Köppen com temperatura média anual de 27°, umidade relativa do ar de 82% e precipitação pluvial anual superior a 3.000mm (ANA, 2004), com as chuvas distribuídas de dezembro a julho.

A vegetação da planície costeira na região é caracterizada pela ocorrência de campos herbáceos, arbustivos, vegetação de várzea e mangues. Para a vegetação de mangue os gêneros dominantes são *Rhizophora harrisonia*, *R. mangle*, *Avicennia gerrinans* e *Laguncularia racemosa* (Herz, 1991). No planalto, predomina a floresta ombrófila de terra firme, característica de toda região amazônica.

3. Materiais, técnicas e procedimentos metodológicos

Para constituir as séries temporais, foi selecionado um conjunto composto por imagens ópticas e imagens SAR (radar de abertura sintética), todas com data de geração entre os anos de 1980 e 2003 (Tabela 1).

Tabela 1: Características dos dados de sensoriamento remoto utilizados.

Sensor/ Plataforma	Data de Aquisição	Angulo de incidência	Resolução espacial (m)	Bandas Espectrais
MSS/Landsat 2	15/08/1980	nadir	79 x 79	5, 6,7
TM/Landsat 4	16/10/1992	nadir	30 x 30	3,4,5
SAR/JERS-1	Mai/1996	34°- 43°	90 x 90	L (23,5 cm)
ETM ⁺ /Landsat 7	11/09/2000	nadir	28,5 x 28,5	3,4,5
Modelo Digital de Elevação (SRTM)	Fevereiro/2000	17°- 65°	90 x 90	C (3,1 cm)
RADARSAT-1 Wide	08/01/2003	20°- 31°	35,5 x 27,0	C (5,6 cm)

No processamento digital dos dados utilizaram-se os softwares PCI Geomatics 9.1 e Global Mapper 5. Para composição do Banco de Dados Geográfico (SIG) e geração de mapas, valeu-se do software ArcView GIS 3.3.

Pré-processamento das imagens

Inicialmente, as imagens Landsat passaram por correções atmosféricas segundo o método de subtração do pixel escuro proposto por Chavez (1988). Após a correção radiométrica, procedeu-se a correção geométricas das imagens.

Correção geométrica dos dados de sensores remotos

Neste trabalho, duas metodologias para correção geométrica foram empregadas. Nas imagens TM/ETM-Landsat e SAR/RADARSAT, o método utilizado foi a correção geométrica de alta precisão ou ortorretificação, conforme modelo proposto por Toutin (1995). Nas imagens MSS/Landsat e JERS-1, valeu-se do uso do modelo matemático polinomial de primeira ordem, face a indisponibilidade dos dados de efemérides dos sensores.

As imagens Landsat (de 1992 e 2000) não foram corrigidas geometricamente, uma vez que estas já foram adquiridas ortorretificadas (Tucker et al., 2004). A utilização destes produtos garantiu a padronização do processo de georreferenciamento, permitindo a sobreposição de imagens e a comparação de dados pixel-a-pixel. Em todos os casos, as imagens foram corrigidas geometricamente para a projeção cartográfica geográfica e o elipsóide WGS 84.

Na ortorretificação da imagem RADARSAT-1, o DEM utilizado foi o modelo digital de elevação SRTM produzido pela NASA. A coleta de pontos de controle foi realizada pelo

método imagem-imagem. As imagens Landsat TM 4 e ETM 7, serviram como referência. Foram coletados 17 pontos de controle e o erro estabelecido (RMS) foi de 1,72 pixel.

Para o georreferenciamento do mosaico JERS-1 foi utilizada a imagem Landsat ETM⁺ 7. No registro coletaram-se 34 pontos de controle, obtendo-se erro (RMS) menor que um pixel, com reamostragem pelo método do vizinho mais próximo.

Por fim, a cena Landsat MSS, foi corrigida a partir da imagem Landsat de 2000, selecionando-se 18 pontos de controle, obtendo-se erros (RMS) de 0,81 pixel (63,99m).

Avaliação do cálculo de erros a partir dos pontos de controle

Considerando o erro obtido durante esta etapa, a partir dos pontos de controle e mediante regra de três simples, estabeleceu-se a margem de erro geométrico para cada imagem e o erro geométrico máximo ou cumulativo para cada período analisado (**Tabela 2**).

Tabela 2. Margem do erro geométrico de cada imagem e cumulativo para o período analisado.

Ano de aquisição da imagem	Erro geométrico individual			Intervalo de tempo	Erro geométrico cumulativo	
	Por área (Km ²)	Linear (m)	RMS (por pixel)		Por área (Km ²)	Linear (m)
1980	0,0050	63,99	0,81	1980/1992	0,0055	42,87
1992	0,0005	18,32	0,61	1992/1996	0,0054	71,42
1996	0,0049	53,10	0,59	1996/2000	0,0054	69,99
2000	0,0005	16,89	0,56	2000/2003	0,0008	38,39
2003	0,0003	21,50	1,72			

Esta técnica permite excluir das quantificações os erros inerentes à correção geométrica das imagens, evitando interpretações equivocadas sobre a erosão e sedimentação costeira. Por exemplo, na interpretação das cenas geradas no período de 1980 a 1992, pode-se afirmar que alterações na linha de costa, ocorridas em áreas com até 0,0055km² ou de até 42,87m de distâncias lineares são desconsideradas em função de estarem dentro do erro RMS. Conseqüentemente, regiões que apresentarem modificações no período com esta magnitude são consideradas como estáveis.

Análise dos dados em Sistemas de Informações Geográficas

Após as etapas de processamento dos dados orbitais, foram traçados vetores marcando a posição da linha de costa em todas as imagens analisadas, com o uso do software ArcView 3.3. Em seguida, realizou-se a edição de polígonos, a sobreposição dos vetores, classificação e quantificação das áreas onde ocorreram mudanças.

4. Resultados

Através da superposição de imagens no banco de dados geográfico (SIG) foram encontradas modificações substanciais nos limites da planície costeira no período analisado. Tais alterações foram evidenciadas morfológicamente pelo deslocamento da linha de costa em direção ao mar (progradação) ou recuo desta para o continente (retrogradação). Com base nesse comportamento a área de estudo foi subdivida em três setores (**Figura 2**). O Setor 1 possui cerca de 90 Km de extensão e compreende desde a Ponta do Mosquito (foz do Rio Uaçá) até a desembocadura do rio Cassiporé. O Setor 2 equivale a foz do Rio Cassiporé (~20 Km) e o Setor 3 representa o Cabo Cassiporé, que apresenta uma extensão de 50 km.

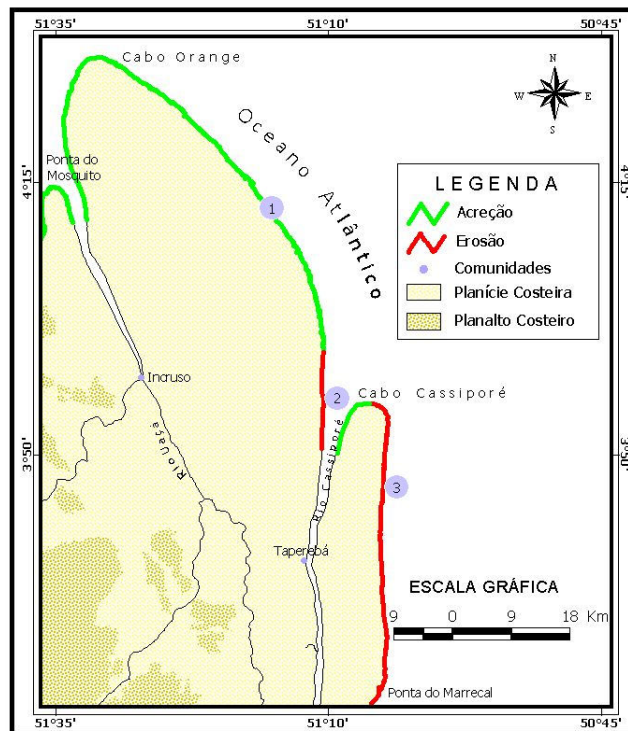


Figura 2 : Áreas de erosão e acreção ao longo da linha de costa do Parque Nacional do Cabo Orange. Junto ao litoral, os números representam a setorização da área conforme o processo dominante (erosão ou acreção).

Setores Progradantes

Considerando a análise do comportamento da vegetação costeira (mangue), em cada série temporal, é possível observar que em todo o período analisado a região que compreende o Cabo Orange sofreu acreção de sedimentos com diferentes taxas de acumulação (**Figura 3**).

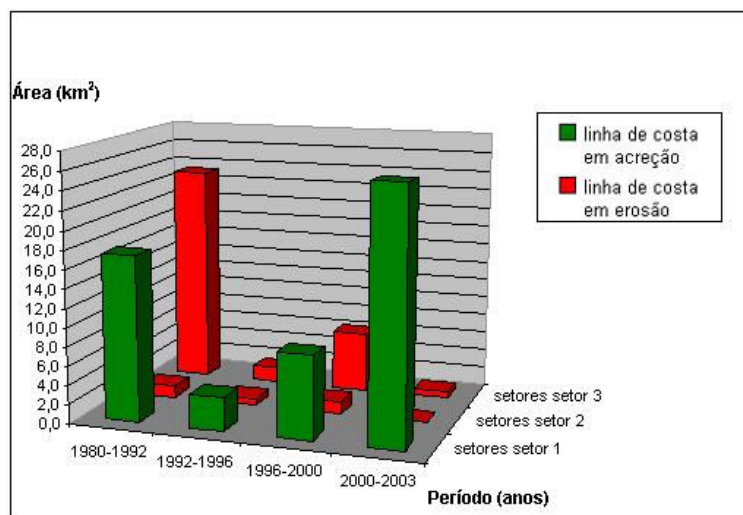


Figura 3 : Taxas de acumulação/erosão quantificadas na área de estudo.

Neste setor os pulsos de variação da linha de costa, registrados com o crescimento da vegetação de mangue, quando quantificados, foram estimados em 55,85 km² de sedimentos anexados a zona costeira no período de vinte e três anos.

Na **Tabela 3** são quantificadas por setor trabalhado, as mudanças ocorridas em termos de erosão (-) ou sedimentação (+) a partir de polígonos da vegetação costeira, apresentando, ao final, um balanço sedimentar dos três setores envolvidos.

Tabela 3: Modificações ocorridas na linha de costa: acreção (+) e erosão (-) costeira no período de 1980-2003.

Período (anos)	Setor 1: Cabo Orange		Setor 2: Foz do Rio Cassiporé		Setor 3: Cabo Cassiporé	
	Área (km ²)	Distância linear (m)	Área (km ²)	Distância linear (m)	Área (km ²)	Distância linear (m)
1980-1992	+17,48	194,2	-1,21	60,5	-23,19	463,8
1992-1996	+3,53	39,2	-0,75	33,0	-1,56	31,2
1996-2000	+8,71	96,7	-1,34	67,2	-6,28	125,6
2000-2003	+26,13	236,1	-0,13	7,2	-0,66	13,2
Balanço sedimentar por área (1980-2003)	+55,85	566,2	-3,43	167,9	-31,69	633,8

Nas imagens de radar tomadas em baixa-mar, podem ser observados, ao longo do litoral do Cabo Orange a presença de bancos lamosos em tons escuros (**Figura 4.A**), devido o mecanismo de espalhamento especular que causa um contraste com a vegetação de mangue que espalha de forma difusa (tons de cinza; **Figura 4.B**). A floresta de mangues no limite dos bancos lamosos são observados em tons de cinza claro em função do mecanismo de *double-bounce* que ocorre no tronco da árvore (**Figura 4.B**).

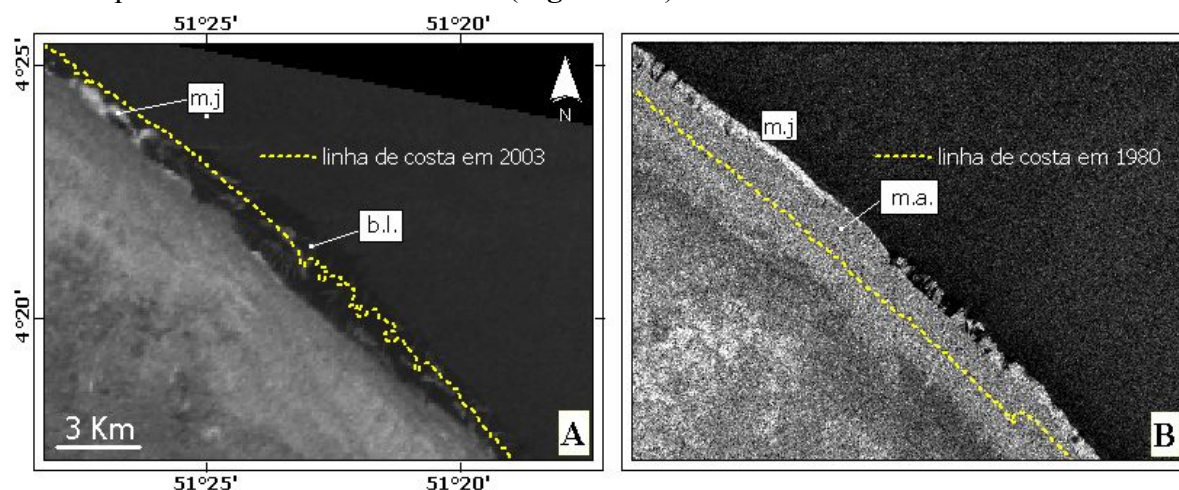


Figura 4 : Evolução da linha de costa ao longo do Cabo Orange: A) imagem JERS-1 obtida em 1996 superposta por um vetor da linha de costa em 2003. B) imagem Radarsat-1 obtida em 2003 superposta por um vetor da linha de costa em 1980. Observar as feições e ambientes morfológicos: m.j = mangue jovem; m.a. = mangue adulto, b.l. = bancos lamosos.

Setores Retrogradantes

Considerando o período entre 1980 e 2003 é possível perceber que, a partir da ponta norte do Cabo Cassiporé até o extremo sul deste cabo lamoso, o litoral apresenta comportamento predominantemente erosivo. A transição para áreas progradantes acontece, aparentemente, a partir da foz do Rio Cassiporé (**Figura 2**). No período analisado, o trecho que corresponde ao Cabo Cassiporé apresentou uma diminuição na vegetação em linha reta de aproximadamente 633,8 m, o que representa uma taxa de recuo da linha de costa de 27,5 m por ano (**Tabela 3**).

A quantificação da extensão da área afetada pela erosão foi estimada em 31,69 km² no período.

A erosão no local determinou uma configuração irregular ao litoral, como do tipo “denteada”, em resposta à forma inclinada com que as ondas costeiras chegam à linha de costa (Figura 5).

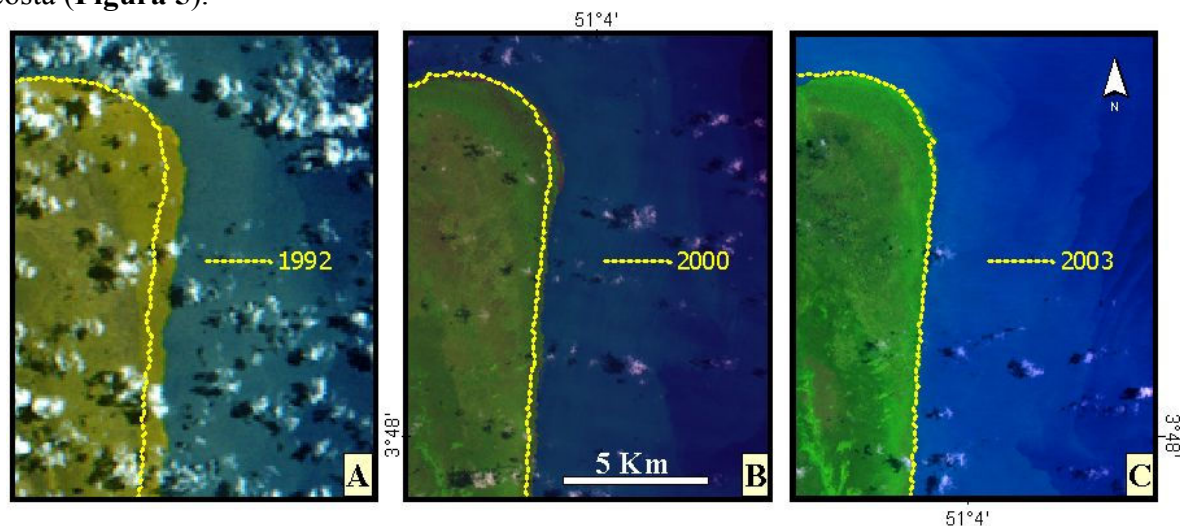


Figura 5: Modificação da linha de costa ao longo do Cabo Cassiporé: A) imagem Landsat MSS-2 obtida em 1980 superposta por um vetor da linha de costa em 1992. B) imagem Landsat TM-4 obtida em 1992 superposta por um vetor da linha de costa em 2000. C) imagem Landsat ETM-7 obtida 2000 superposta por um vetor da linha de costa em 2003.

No estuário do rio Cassiporé, entre os Cabos Cassiporé e Orange (Setor 2), a superposição das imagens de sensores remotos demonstrou que ao longo dos 23 anos analisados, a desembocadura deste rio vem sendo erodida em sua margem esquerda com uma taxa de aproximadamente 7 m/ano. Segundo Silveira (1998), na foz deste rio, as correntes de maré chegam de forma inclinada, incidindo diretamente sobre a margem esquerda, provocando a erosão. Como consequência, os sedimentos erodidos estão sendo depositados na margem direita em sistemas de barras fluviais. Estas barras, por sua vez, estão sendo colonizadas por bosques jovens de *Avicennia germinans* (Siriúba).

5. Conclusões

A abordagem utilizada baseada na sobreposição espacial de vetores extraídos de imagens de sensores remotos permitiu o mapeamento das áreas com incremento e diminuição dos manguezais, apresentando produtos que quantificaram, em termos de área, as alterações ocorridas na linha de costa em médio período.

O emprego de dados orbitais, devidamente processados, tornou possível mensurar, de modo geral, qualitativa e quantitativamente, diferentes formas progracionais e retrogradacionais, possibilitando o conhecimento e disposição da morfologia costeira em detalhe, ao expor informações ligadas a direção, intensidade e abrangência dos fenômenos.

No que se refere a quantificação com acurácia de fenômenos erosivos e deposicionais mediante o uso de dados de sensores remotos ópticos, ficou demonstrado que estes apresentam limitações referentes ao tamanho do pixel das imagens Landsat (30 m), limitações espectrais, em função da intensa cobertura de nuvens tão comuns nas regiões tropicais, com é o caso da amazônica brasileira. Neste sentido, o emprego de dados SAR (Radar de Abertura Sintética) a partir dos sistemas sensores Radarsat-1, JERS-1 e SRTM permitiram o imageamento com melhor precisão, considerando a versatilidade da faixa das microondas em

ambientes tropicais por não apresentarem interferência causada por fatores de ordem atmosférica.

A zona de deposição a partir do Cabo Orange marca o início da área de acreção dos cabos lamosos, que migram do norte do Brasil em direção às Guianas, até chegarem no delta do Orinoco, formando o maior sistema de migração de bancos lamosos do planeta.

Referências

- ANA - Agência Nacional de Águas. Totais pluviométricos de longo período na Sub-bacia 30 (do rio Oiapoque ao rio Araguari), 2004. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/gestaoRecHidricos/InfoHidrologicas>>. Acesso em: 12 jan. 2005.
- Allison, M.A., Nitrouer, C.A., Faria, L.E.C., Rates and mechanisms of shoreface progradation and retreat downdrift of the Amazon river mouth. **Marine Geology**, v. 125, p. 373-392, 1995.
- Chavez, P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 450-479, 1988.
- Chu, Z.X.; Sun, X.G.; Zhai, S.K.; Xu, K.H. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: Based on remote sensing images. **Marine Geology**, v. 227, p. 13-30, 2006.
- Departamento de Hidrografia e Navegação- DHN . **Tábuas de marés para 2004. Costa do Brasil e alguns portos estrangeiros**. Rio de Janeiro: DHN. p. 1-6, 2004.
- Herz, R. **Manguezais do Brasil**. São Paulo: EDUSP, 1991. 54 p.
- Meade, R.H.; Dunne, T.; Richey, J.E.; Santos, U.M; Salati, E. Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon River of Brazil. **Science**, v. 228, p. 488-490, 1985.
- Nitrouer, C.A.; Demaster, D. J.; Figueiredo, A.G.; Rine, J.M. AmasSeds: an interdisciplinary investigation of a complex coastal environment. **Oceanography**, v. 4, p. 3-7, 1991.
- Oltman, R.E. **Reconnaissance investigation of discharge and water quality of the Amazon River**. Washington: US. Geological Survey. 1968. 16p. (Circular 552).
- Proisy, C.; Mougin, E.; Fromard, F.; Karam, M.A. Interpretation of polarimetric signatures of mangroves forests. **Remote Sensing of Environment**, v.71, p. 56-66, 2000.
- Schaeffer-Novelli, Y., Cintroân-Molero, G., Soares, M.L.G., de-Rosa, T. Brazilian mangroves. **Aquatic Ecosystem Health and Management**, v. 3, p. 561-570, 2000.
- Serviço Geológico do Brasil-CPRM. **Carta geológica do Brasil ao milionésimo - Folha NA-21**. CD-ROM. Windows 98/2000/XP, 2004.
- Silveira, O. F. M. **A planície costeira do Amapá: dinâmica de ambiente costeiro influenciado por grandes fontes fluviais quaternárias**. 1998. 215p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 1998.
- Souza Filho, P.W.M.; Martins, E.S.F.; Costa, F.R. Using mangroves as geological indicator of coastal changes in the Bragança macrotidal flat, Brazilian Amazon: an approach from remote sensing data and GIS. **Ocean & coastal management**, v. 49, p. 462-475, 2006.
- Souza Filho, P.W.M. & Paradella, W.R. Use of synthetic aperture radar for recognition of Coastal Geomorphological Features, land-use assessment and shoreline changes in Bragança coast, Pará, Northern Brazil. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 75, n. 3, p. 341-356, 2003.
- Toutin, T. Intégration de données multi-source: comparaison de méthodes géométriques et radiométriques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, p. 2795-2811, 1995.
- Trebossen, H. ; Deffontaines, B. ; Classeau, N. ; Kouame, J. ; Rudant, J.P. Monitoring coastal evolution and associated littoral hazards of French Guiana shoreline with radar images. **C. R. Geoscience**, v. 337, p. 1140–1153, 2005.
- Tucker, C.J., Grant, D.M., Dykstra, J.D. NASA's global orthorectified Landsat data set. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 70, n. 3, p. 313–322, 2004.