

Aplicação de técnicas de geoprocessamento para a análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do estado do Ceará.

Eduardo Guilherme Gentil de Farias^{1,2}
Luís Parente Maia²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
gentil@dsr.inpe.br

² Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR.
Universidade Federal do Ceará - CEP 60165-082 - Fortaleza - CE, Brasil
parente@labomar.ufc.br

Abstract. The variability of the coast line is often employed as an environmental indicator of the negative effects of anthropogenic activities over the natural dynamics of coastal ecosystems. Knowledge of the accretion and retreat rates is essential for a proper management and solution development, regarding the sustainable use and occupation of coastal areas, and can be determined by multi-temporal approaches, using remote sensing data. This study aimed to calculate the coastal line retreat rates for various coastal areas of the Ceará State (Brazil), through a multi-temporal analysis, using satellite images, air photograph and geo-processing tools. The Digital Shoreline Analysis System – DSAS 3.2, an extension of ArcMap 9.1, was used to measure the evolution of the coast line during the last two decades. The results showed strong erosion along the regions of Caponga, Pacheco and Itarema beaches, where the coastal line retreat rates were 7.3 m/y, 4 m/y and 3.4 m/y, respectively. In other coastal areas such as Icaraí, Iracema, Iparana and Meireles, rates were lower than 1.5 m/y. The estuarine area of Jaguaribe river was also studied, and the erosion rate calculated for the left bank was of 0.83 m/y, with a deposition rate of 0.77m/y on the right bank. The correlation between the retreat rates obtained and the environment parameters of these regions revealed that the coastal line spatial compartment is directly affected by a series of environmental, geologic and anthropogenic factors.

Palavras-chave: Geoprocessing, remote sensing and coastal erosion.

1. Introdução

A forma crescente com que o homem vem ocupando a zona costeira, é incompatível numa escala global com os processos dinâmicos naturais destes ecossistemas, particularmente no que tange à variabilidade temporal e espacial da linha de costa.

Vários fatores vêm contribuindo para que nas últimas décadas se agravassem algumas situações de declarada erosão costeira em praticamente todas as regiões litorâneas do planeta. Este retrocesso generalizado da linha de costa tem sido induzido em grande parte, por ações de natureza antrópica, especialmente as que promovem insuficiência do abastecimento sedimentar a montante do sistema (ex: a construção de barragens, a exploração de inertes fluviais e dragagens portuárias) e as que conduzem à degradação das estruturas defensivas naturais (como os campos dunares costeiros ou as barras arenosas submarinas). Em algumas localidades a erosão costeira é, ainda, fortemente ampliada pela construção de molhes de entrada em instalações portuárias, ou estruturas rígidas transversais que interrompem ou debilitam fortemente o fluxo de sedimentos (Oliveira, 2005).

A zona costeira da região nordeste do Brasil se enquadra dentro deste contexto. À exceção das grandes cidades, até muito recentemente esta região era pontilhada por pequenas vilas e povoados de difícil acesso. A abertura de novas estradas bordejando a linha de costa e facilitando o acesso a estas áreas, a difusão da filosofia de lazer voltada para o mar, os planos estaduais de turismo contemplando empreendimentos vultuosos na zona costeira, associados à

ausência de um planejamento adequado que respeite as limitações naturais impostas pelos fenômenos dinâmicos, contribuem para exacerbar o problema de recuo de linha de costa que afeta todo o litoral desta região (Dominguez, 2007).

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 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).

Partindo dessa premissa, o presente trabalho visa à determinação do comportamento da linha de costa em vários trechos do litoral cearense a partir da análise multitemporal de imagens de sensoriamento remoto com o auxílio de técnicas de geoprocessamento, visando contribuir para a projeção e antecipação do comportamento desses ecossistemas às respostas do meio físico à introdução de elementos antrópicos e à dinâmica natural.

2. Área de estudo

A área de estudo está localizada na região Nordeste do Brasil, mais precisamente na porção correspondente ao litoral do estado do Ceará.

A zona costeira cearense tem como uma das principais características as distinções geomorfológicas observadas entre o litoral leste e oeste, sendo o divisor destas duas porções a capital cearense. O litoral oeste apresenta uma planície rasa caracterizada pela presença de dunas e vastas áreas de mangue enquanto à parte leste apresenta uma costa mais rochosa caracterizada por um extenso tabuleiro costeiro que chega até a linha de costa com falésias e paleofalésias (Bensi, 2006).

A figura 1 apresenta destacada em tons de laranja às regiões contempladas pelo presente estudo. Foram selecionadas oito áreas, sendo estas: A praia do Farol no município de Itarema, as praias do Icarai, Pacheco e Iparana no município de Caucaia, as praias de Iracema e Meireles em Fortaleza, a praia da Caponga no município de Cascavel e a desembocadura do rio Jaguaribe localizada no município de Fortim. Todas as áreas foram escolhidas tomando por base o histórico de erosão nessas regiões através de trabalhos anteriores (Morais, 1980; Maia, 1998; Magalhães, 2000; Leal, 2003; Bensi, 2006 e Farias, 2007).

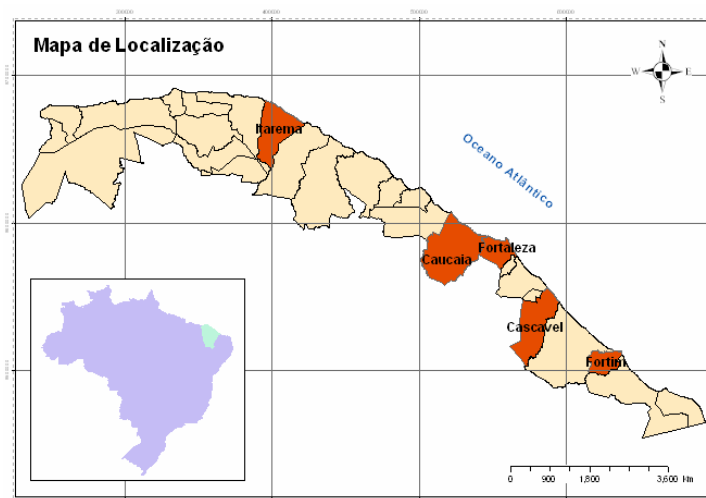


Figura 1 - Mapa de localização.

3. Material e Métodos

3.1 Produtos de sensoriamento remoto

O presente trabalho utilizou imagens digitais dos satélites Landsat 5, Landsat 7 ETM+ e QUICKBIRD, georreferenciadas para o datum horizontal SAD 69 zona 24 Sul.

O processamento digital inicial das imagens de sensoriamento remoto foi realizado no software ENVI 4.2 e posteriormente, as imagens foram integradas e georreferenciadas utilizando o software ArcGIS 9.1.

Em seguida foram realizados os procedimentos de análise das composições coloridas das bandas para a geração de imagens com caráter multiespectral. Do conjunto de imagens obtidas, foram escolhidas aquelas que proporcionaram melhor distinção da linha de costa.

3.2 Delimitação da linha de costa

O conceito de linha de costa é extremamente amplo, haja vista que sob o ponto de vista físico a linha de costa corresponde simplesmente à linha de interface entre a terra e a água.

Devemos entender a linha de costa como um limite móvel, cuja posição é variável a todas as escalas quer sejam espaciais ou temporais. Os critérios que a definem devem por isso ser rigorosos, de forma a tornar comparáveis os resultados obtidos. A definição comumente adotada para caracterizar a posição da linha de costa em áreas costeiras arenosas, tem incidido na utilização da “linha” que marca o limite atingido durante a preamar de sizígia, caracteriza-se por uma mudança nítida de tonalidade nas areias da praia (Figura 2), facilmente identificável nas fotografias aéreas e imagens de sensoriamento remoto (Crowell 1991).



Figura 2 - Linha pontilhada em vermelho na imagem Quickbird representando a delimitação de linha de costa segundo Crowell (1991).

Em ambiente computacional, inicialmente as imagens foram registradas utilizando como mapa de verdade os produtos cartográficos gerados a partir do Zoneamento Ecológico e Econômico do Litoral Cearense. Posteriormente, a linha de costa foi delimitada através da vetorização dos dados referentes à sua identificação, com base nas imagens de sensoriamento remoto e fotografias aéreas, pretendendo deste modo, além de quantificar as variações da posição da linha de costa desenvolver um meio de analisar e quantificar as diferentes fontes de erro decorrentes do processo cartográfico.

3.3 Digital shoreline analysis system – DSAS

A análise por inferência geográfica utilizou a extensão denominada *Digital Shoreline Analysis System – DSAS 3.2* que amplia as funcionalidades do *software* ArcGIS 9.1, permitindo a automatização de grande parte das tarefas relacionadas com a análise quantitativa da evolução das tendências de erosão e deposição através de uma série estatística de tempo e posições múltiplas da linha de costa (Thieler *et al.*, 2005).

O DSAS trabalha gerando transectos ortogonais a uma linha de base determinada pelo usuário (*baseline*) em um espaçamento definido e calcula então, as taxas de mudanças através de métodos estatísticos distintos que são mostrados em uma tabela de atributos. Dentre as várias opções de tratamento disponíveis, o presente trabalho optou pela adoção do método de regressão linear (LRR).

O método LRR calcula as taxas de recuo de linha de costa através de regressão linear simples, considerando para tal as inflexões existentes ao longo de cada linha de costa (*shoreline*). É um método que utiliza conceitos estatísticos aceitados aonde todos os transectos são considerados para efeito de cálculo.

Os valores negativos apresentados pelo DSAS representam as áreas onde pôde ser constatados índices de erosão, enquanto que os valores positivos denotam tendências de deposição nas regiões estudadas.

Utilizando o *software* ArcMap 9.1 as linhas de costa (*shorelines*) foram vetorizadas em formato shapefile. Para este formato, também foi adquirida uma linha de base e foi criada uma base de dados geográficos. A determinação da variação da linha de costa é então obtida através de transectos perpendiculares a partir das linhas de costa das séries multitemporais geradas pelo *DSAS 3.2*, pressupondo como referência uma linha de base que pode ser *onshore* ou *offshore* conforme previamente estabelecida pelo usuário (Figura 3).

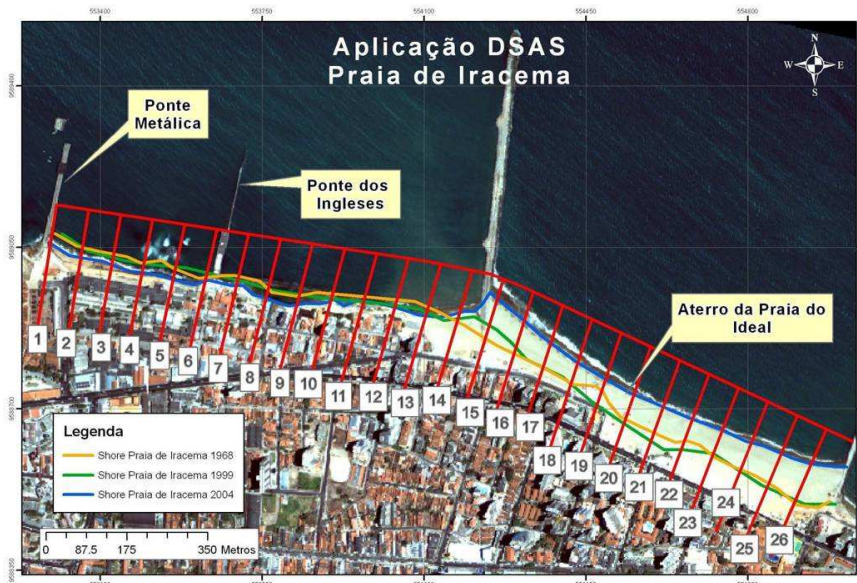


Figura 3 - Exemplo de aplicação do DSAS na região da praia de Iracema (Fortaleza – CE).

4. Resultados e Discussão

O presente estudo contemplou 8 áreas para a análise utilizando técnicas de geoprocessamento, considerando para escolha dessas regiões o nível de resolução das imagens e fotografias aéreas do Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR.

Em alguns casos, foram estudadas regiões que correspondem a uma curta escala temporal, devido à ausência de fotografias aéreas que delimitassem com o nível de acuidade necessária a delimitação da linha de costa.

4.1 Desembocadura e estuário inferior do rio Jaguaribe

Para esta região, foram utilizadas fotografias aéreas para os anos de 1958, 1975, 1988 e imagem do satélite LANDSAT 7 ETM+ do ano de 2001 para a região na qual encontra-se inserida a área.

Foram gerados 26 transectos perpendiculares na margem esquerda e 41 transectos perpendiculares para a margem direita. Estes se encontravam com 100m de espaçamento e 1100m de extensão à linha de costa da desembocadura e estuário do rio Jaguaribe. Para este trabalho, foram geradas duas linhas paralelas a uma distância média de 350m e as taxas de regressão tomaram como base imagens entre os anos de 1958 a 2001.

A variação da morfologia da desembocadura e estuário inferior do rio Jaguaribe para o intervalo de 43 anos (1958 a 2001) indica uma média geral de recuo da linha de costa da margem esquerda de -0,83 m/ano, enquanto a margem direita apresentou uma taxa de deposição média na ordem de 0,77 m/ano. Essa tendência erosiva observada para a margem esquerda apresenta-se de forma variada ao longo do trecho estudado em consequência a uma junção de fatores hidrodinâmicos, antrópicos e geomorfológicos.

Nessa região a dinâmica costeira e o transporte eólico em função da direção da deriva litorânea atuam preponderantemente empurrando a foz do rio Jaguaribe para leste provocando erosão na margem esquerda, destruindo casas localizadas próximas às margens do rio.

4.2 Praia da Caponga

Para a análise das tendências de erosão nesta região foram utilizadas uma fotografia aérea para o ano de 1986, a banda pan da imagem Landsat 7 ETM+ para o ano de 1999 e uma imagem Quickbird para o ano de 2004.

Foram gerados e enumerados 22 transectos perpendiculares com comprimento de 250 metros e espaçados 100 metros paralelamente a partir de uma baseline offshore para uma região de aproximadamente 2,1 km de comprimento.

Em todos os transectos pôde ser evidenciado um forte caráter erosivo, indicado através de uma média geral de recuo na ordem de -7,3 m/ano e máximos de -9,6 m/ano na região localizada sob as coordenadas UTM 590377 e 9552247. Área esta que coincide com os aglomerados urbanos, apresentando os maiores índices de ocupação antrópica para a praia da Caponga.

Para o trecho estudado, foi observado que para um intervalo de 18 anos a linha de costa nesta localidade já recuou aproximadamente 160 m em direção ao continente, provocando diversos prejuízos para a população local e para os proprietários de casas de veraneio que já vem sendo atingidos por este fenômeno.

As ocupações desordenadas nessa região vem promovendo um déficit no balanço sedimentar costeiro, uma vez que esses empreendimentos ocupam regiões importantes para a dinâmica destas áreas culminando com processos erosivos em todo o litoral da Caponga

4.3 Praia do Farol

A praia do Farol encontra-se localizada no município de Itarema situado no litoral oeste do estado do Ceará. É uma região pouco explorada pela atividade turística, sendo utilizada pela população local composta basicamente por pescadores.

Para análise das tendências de recuo desta localidade foram utilizadas uma imagem Landsat 5 para o ano de 1991, a banda pan da imagem Landsat 7 ETM+ para o ano de 2001 e para o ano de 2005.

Após a utilização do DSAS foram gerados e enumerados 44 transectos perpendiculares com comprimento de 350 metros e espaçados 150 metros paralelamente a partir de uma baseline onshore para uma região de aproximadamente 6,5 km de comprimento.

De um modo geral toda a região apresenta caráter erosivo, o que pode ser evidenciado através da média geral de recuo obtida que foi de -3.4 m/ano, com valores máximos de -6.1 m/ano.

A erosão observada no litoral de Itarema é notória e vem comprometendo uma série de estruturas e equipamentos públicos e privados. Para contornar esta situação a prefeitura implantou uma série de gabiões, de forma inadequada que posteriormente foram destruídos pela ação das ondas acelerando de certa forma a erosão em alguns locais.

4.4 Praias de Fortaleza e região metropolitana

Para a análise da evolução da linha de costa nas praias de Meireles e Iracema, foi utilizada uma série temporal entre os anos de 1968 e 2004 (fotografia aérea para o ano de 1968, imagem Landsat 7 ETM+ de 1999 e imagem Quickbird para o ano de 2004). Enquanto que para as praias de Iparana, Pacheco e Icarai foram utilizadas imagens Landsat 5 para o ano de 1991, a banda 8 da imagem Landsat 7 ETM+ para o ano de 1999 e imagem Quickbird para 2004.

Dessa forma foi possível analisar a evolução da linha de costa entre as praias do Meireles e Iracema para um período de 36 anos e para as praias de Iparana, Pacheco e Icarai para um período de 13 anos.

A praia do Meireles está localizada numa das regiões nobres da capital cearense, estando presentes ao longo de toda a sua orla uma grande quantidade de condomínios de classe média alta, além de diversos restaurantes e empreendimentos de turismo e lazer, que conferem a essa região uma grande importância no desenvolvimento da economia local.

Para esta área foram gerados e enumerados 22 transectos perpendiculares com comprimento de 150 metros e espaçados 75 metros paralelamente a partir de uma baseline offshore para uma região de aproximadamente 1,5 km de comprimento.

A praia do Meireles apresentou uma maior tendência deposicional, onde obteve uma média geral de progradação de linha de costa na ordem de +0,10 m/ano, com valores máximos de deposição de +1.1 m/ano. Entretanto a região também apresentou sensíveis índices de erosão pontuais ao longo do trecho estudado, obtendo média de recuo na ordem de -0.6 m/s.

Para a região da praia de Iracema a utilização do DSAS resultou na identificação de uma tendência erosiva ao longo de toda a região com exceção da região aonde se localiza o aterro em frente ao Ideal Clube que apresentou elevadas taxas de deposição, valor este, reflexo da engorda artificial realizada no ano de 2001, obtendo uma média geral de recuo de linha de costa na ordem de -0.5 m/ano, com máximos de -0.65 m/ano.

A praia de Iparana inserida a oeste da desembocadura do rio Ceará, entre falésias da formação Barreiras, vem sendo historicamente juntamente com a praia de Pacheco localizada atingida por severos processos erosivos desde a década de 80. Nessa região, o uso de ferramentas de geoprocessamento gerou 24 transectos perpendiculares espaçados 100 metros e com comprimento de 750 metros dispostos paralelamente a partir de uma baseline offshore para uma região de aproximadamente 2,0 km de comprimento. O recuo de linha de costa ainda é evidente em grande parte da orla, atingindo valores máximos de -9.4 m/ano e média de -1,25 m/ano, valor este considerado alarmante para o comportamento dinâmico do litoral cearense.

Na praia do Pacheco a utilização do DSAS resultou na obtenção e enumeração de 31 transectos perpendiculares espaçados 100 metros e com comprimento de 750 metros dispostos

paralelamente a partir de uma baseline offshore para uma região de aproximadamente 2,5 km de comprimento. A região apresenta expressivos índices de erosão ao longo do trecho estudado, com valores máximos de -4 m/ano com tendências pontuais de deposição, oriundos dos fluxos dinâmicos para esta região.

De forma similar à praia de Iparana, a região costeira da praia do Pacheco vem sofrendo com a problemática da erosão, fato este que vem comprometendo a estética do litoral, bem como as casas de veraneio e as estruturas de contenção do avanço contínuo da linha de costa.

Para a praia do Icaraí foram realizados 46 transectos enumerados transversais à linha de costa espaçados 100 metros e com comprimento de 750 metros dispostos paralelamente a partir de uma baseline offshore ao longo de aproximadamente 5,7 km de litoral, onde pode ser evidenciado uma tendência generalizada de recuo de linha de costa com média de -0.95 m/ano para toda a região estudada segundo as taxas de regressão linear simples (LRR).

4.5 Resumo dos resultados obtidos

A partir dos resultados obtidos (Figura 4), pode-se inferir que dentre as 8 áreas selecionadas para a realização do presente trabalho, a praia da Caponga é atualmente a que apresenta os índices de recuo de costa mais críticos, com média de -7.3 m/ano, seguido da praia de Pacheco que obteve taxa de recuo médio de -4m/ano e da praia do Farol, localizada no município de Itarema que apresentou taxas de erosão na ordem de -3.4 m/ano. As demais áreas contempladas apresentaram índices de erosão inferiores a -1.5 m/ano, sendo a praia de Iracema a área que apresentou maior estabilidade da linha de costa, com índices de erosão de -0.5 m/ano.

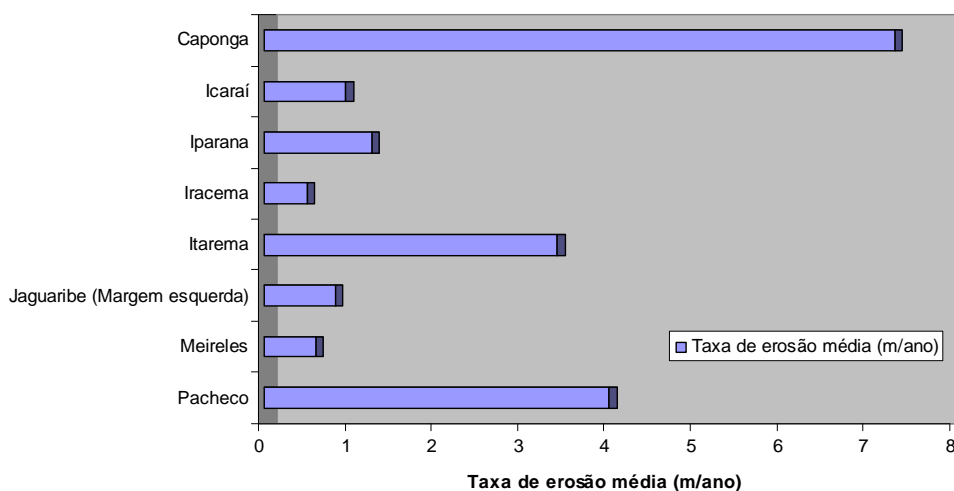


Figura 4 - Resumo dos resultados obtidos.

5. Conclusões

A partir dos resultados pode-se inferir que há uma tendência generalizada de avanço do mar no litoral do estado do Ceará que vem promovendo a destruição de casas e estruturas de defesa do litoral.

No que diz respeito, a utilização de técnicas de geoprocessamento associadas a imagens de sensoriamento remoto a obtenção dos resultados de tendências de recuo de linha de costa nas áreas contempladas se mostrou eficiente. A elaboração de uma base multitemporal de imagens de satélite e fotografias aéreas em ambiente GIS favoreceram a identificação e compreensão da dinâmica natural e ambiental das áreas investigadas, sendo essenciais como subsídio às tomadas de decisões acerca do uso e gestão sustentável dessas áreas. Trata-se de

uma importante ferramenta no planejamento e intervenção ambiental, sobretudo por indicar facilmente as tendências de recuo e/ou progradação de uma região ao longo dos anos.

No tocante a escolha do sensor a ser adotado, apesar da utilização de imagens de alta resolução ter se mostrado preferencialmente melhores na identificação e vetorização da linha de costa, quando comparadas às imagens Landsat e fotografias aéreas, a precisão alcançada e a relação custo x benefício favorece a utilização dos últimos.

6. Referências Bibliográficas

Bensi, M. **Aplicação do correntometro acústico ADCP em ambientes marinhos e estuarinos do Ceará e Paraíba – Nordeste do Brasil**. 2006. 128 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR, Universidade Federal do Ceará. 2006.

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.

Crowell, M., S.P. Leatherman, M.K. Buckley. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. **Journal of Coastal Research**, Vol. 7, Nº 3, pp. 839-852. 1991.

Dominguez, J.M.L. – **Avaliação regional do problema da erosão na região nordeste do Brasil**. <http://www.cpgg.ufba.br/lec/eros.htm>. Acessado em: 21 de Novembro de 2007.

Farias, E.G.G de; Maia, L.P . Aplicação de técnicas de geoprocessamento para a análise de mudanças morfológicas na desembocadura e estuário inferior do rio Jaguaribe – CE. **Anais**. XII Congresso Latino Americano de Ciências do Mar - COLACMAR, Florianópolis – SC,2007.

Leal, J.R.L.V. **Zoneamento geoambiental da área de proteção ambiental de Canoa Quebrada – Aracati – Ceará**. 2003. 210 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará. 2003.

Magalhães, S. H. O. **Caracterização morfodinâmica e evolução a médio e curto prazo das praias dos municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia- CE**. 2000. 123f. Dissertação (Mestrado em Sedimentologia). Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2000.

Maia, L.P. **Processos costeros y balance sedimentário a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): Implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral**. 1998 268 p. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, facultat de Geologia, Departament d'Estratigrafia i Paleontologia, Bcelona, Espanha.

Morais, J.O. **Aspectos da geologia ambiental costeira do município de Fortaleza (Estado do Ceará)**. Tese para seleção de professor titular. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Ceará – UFC.1980.

Oliveira, S. M. C. 2005. **Evolução recente da linha de costa no Troço Costeiro Forte Novo**. 2005. 153 p. Dissertação de Mestrado- Universidade de Lisboa, Portugal. 2005.

Thieller, E. R.; Martin, D. ; Ergul, A. **The Digital Shoreline Analysis System, version 2.3. Shoreline change measurement software extension ArcMap 9.1**. USGS Open-File. 2005.

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.