



Geomorfologia de uma área com alta sensibilidade ambiental na Bacia Potiguar (NE do Brasil) *

Geomorfology of a High Sensitive Area on Potiguar Basin (NE Brazil)

Dalton Rosemberg Valentim da Silva @¹, Venerando Eustáquio Amaro¹,
Michael Vandesteem Silva Souto¹, Miriam Cunha do Nascimento¹,
Bruno Rafael de Barros Pereira¹

RESUMO

A zona costeira setentrional do Rio Grande do Norte, NE do Brasil, está inserida na Bacia Potiguar, com rochas e sedimentos cujas idades variam do Cretáceo ao Neógeno. Esta área tem alta sensibilidade ambiental e conflitos socioeconômico-ambientais devido à ocupação pelas indústrias petrolífera, salineira e de carcinicultura, além de estar sob atuação de processos hidrodinâmicos que causam a erosão da linha de costa em áreas ocupadas por estas atividades industriais. Diante deste quadro, é importante conhecer informações sobre a morfologia do terreno, uma vez que este é um dos fatores a ser considerado para um melhor desenvolvimento de planos de gestão costeira integrada. A metodologia utilizada neste trabalho tem o objetivo de utilizar produtos de sensoriamento remoto, em conjunto com dados disponíveis na literatura e levantamentos de campo para gerar produtos cartográficos que auxiliem na caracterização geológica e geomorfológica da região. Imagens orbitais óticas dos satélites LANDSAT e CBERS foram submetidas a técnicas de processamento que incluem razões de banda e principais componentes para gerar imagens coloridas no sistema de cores RGB. Estas imagens coloridas foram integradas com imagens de radar do tipo SRTM e Radarsat, gerando produtos híbridos 2D e 3D. A vantagem desta metodologia em comparação com a análise individual de cada tipo de imagem (ótica e de radar) consiste na integração entre o aspecto textural das imagens de radar e o aspecto espectral das imagens óticas. Os produtos híbridos realçam as formas de relevo, facilitando a interpretação das feições morfológicas na superfície do terreno. A partir da interpretação das imagens híbridas em conjunto com dados obtidos em campo e em trabalhos prévios, foram desenvolvidos os mapas de geologia e geomorfologia. Informações de altimetria em metros, declividade em graus, aspecto (sentido de mergulho das superfícies no terreno) e sombreamento (simulação da iluminação) foram obtidos a partir dos dados SRTM. Lineamentos foram mapeados a partir de produtos de filtragem direcional aplicada sobre os dados SRTM e sobre imagem CBERS, evidenciando a influenciados Sistemas de Falhas de Afonso Bezerra (NW) e Carnaubais (NE)

@ autor correspondente: daltonroseberg@yahoo.com.br

¹ - UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal-RN, Brasil.

* Submissão – 30 Junho 2010; Avaliação – 7 Setembro 2010; Recepção da versão revista – 22 Outubro 2010; Disponibilização on-line – 7 Dezembro 2010

na geomorfologia costeira, confirmando estudos prévios que reconhecem a reativação holocênica destas estruturas como fator relevante na compartimentação e sedimentação litorânea. Esta estratégia metodológica criou uma base de dados que pode ser utilizada em planos de contenção no caso de derramamentos de óleo e outros poluentes, além de auxiliar no planejamento da instalação de novas áreas de exploração. A geomorfologia da área está intimamente relacionada com a natureza do material geológico, atuação tectônica e hidrodinâmica costeira.

Palavras-chave: Zona costeira, Bacia Potiguar, Imagens orbitais, radar, Geomorfologia.

ABSTRACT

The study area is located on northern coast of Rio Grande do Norte state, NE-Brazil, inserted on the geological context of Potiguar Basin. This sedimentary basin is filled with rocks and sediments which ages range from Cretaceous to Quaternary. According to previous studies, the environmental sensitivity on this coastal zone is very high due to the industrial occupation of the natural environment. These industrial activities consist in hydrocarbon's exploration, salt industries and shrimp farms. The constant activities of coastal hydrodynamic processes causing erosion on shoreline are also a strong contribution to classify such area as a very high environmental sensitivity coast. Such situation demands a constant environmental monitoring which can create a database of useful information for a better development of integrated coastal zone management. One of the most important knowledge to be achieved is the morphology of surface. This paper aims to apply a methodology of digital image processing to extract geological and geomorphological information about the study area. Optical images from satellites Landsat and CBERS were georeferenced using control points acquired on field with DGPS, using UTM-Zone 24 South coordinate system. The statistics were calculated and the images were processed using techniques like bands ratios and principal components analysis to create RGB color images. For the LANDSAT image the most efficient RGB compositions were 541, 531, 751 and the RGB composition between the ratios $7/3 - 5/3$ and $4/3$. CBERS color images used consist in RGB 431, 421, 432 and RGB with the principal components PC1-PC4-PC3. The selected RGB images were integrated with radar data from SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) and Radarsat, to create 2D and 3D hybrid images. The gain that this methodology provides in comparison to the individual analysis of each kind of image (optical and radar) consist on the joining of textural aspect of radar and the spectral information of optical images. Such hybrid images enhance the relief, aiding the interpretation of morphological features on surface. Geologic and geomorphologic maps were developed from the interpretation of hybrid images together with field data and information from previous studies. Lithostratigraphy involves Jandaíra Formation (carbonaceous rocks), Tibau Formation (fine to conglomeratic calciferous sandstones), Macau Formation (basalts and gabbros), Barreiras Formation (conglomerates and coarse sandstones) and quaternary deposits. Geomorphological units are: tabular relief zones composed mainly by Barreiras Formation, described at Brazilian technical literature as "Tabuleiros Costeiros", fluvial-marine flood plains, mangrove, fixed and mobile dunes and shoreline. Coastal tabular zones are composed by carbonatic, siliciclastics and magmatic rocks, with altimetry ranging from 7 to 119 m. Dunes are composed by sand and sandy soil (fixed ones), their altimetry reaches until 4 m. The fluvial-marine flood plain is under influence of tides and river floods, being composed by fine sandy and silty sediments together with clay and organic matter and occur between 0 and 6 m above sea level. SRTM data was also used individually to obtain information about altimetry in meters, creating 2D digital elevation model and topographic profile. The altimetry ranges from 0 to 230 m, such values correspond to the elevation above relative sea level. The central part of the area consists on the Assu-Assu river valley with elevation below 15 meters, placed between higher zones to west and to east. The western portion of the area correspond to Serra do Mel region, with elevation up to 30 meters and on the eastern region there's a dome high known as Mangue Seco Dome, with the highest values of elevation (230 meters). Slope information was also extracted from SRTM, separating areas with very low slope ($0 - 1^\circ$), low slope ($1 - 1,5^\circ$), medium slope ($1,5 - 2^\circ$), high slope ($2 - 3,5^\circ$) and very high slope ($3,5 - 7,7^\circ$). The area is generally very flat, but the highest slope zones consist in limits between features with higher elevation and lower zones. Aspect map was also created from SRTM data, this map displays the dip direction of surfaces, indicating the behavior of surface flow. Directional filters were applied on SRTM data and CBERS image aiming to enhance topographic lineaments on surface. Such lineaments were mapped and their orientation is parallel to regional fault systems of Afonso Bezerra (NW trend) and Carnaubais (NE trend), confirming the influence of such geological fault systems on coastal landscape which were already known from previous studies as being reactivated during the Holocene, so controlling coastal morphology and sedimentation. Comparing lineaments mapped from SRTM with those mapped from CBERS's images is possible to note a decrease in lengths, however in both cases most lineaments are smaller than 5 km and some few are bigger than 10 km. Some outcrops have evidence of brittle deformation like faults, joints and silex formation, such structures are parallel to lineaments. This methodology created a cartographic database which can be used as some of the parameters to be considered during the development of coastal zone management plans. Such knowledge around morphology is important to the monitoring of industrial activities already installed on the coast, for the planning of new human occupation, and for a better development of emergency plans in cases of oil spills. Since, surface morphology influences directly on the interaction between coastal processes and human occupation. The geomorphology on the study area is deeply related to the nature of the geological units, tectonic factors and coastal processes. Forthcoming studies should apply the methodology used on this paper in detailed scales, using high resolution images and high resolution digital elevation models to provide the level of accuracy demanded by a so complex and sensitive region.

Keywords: Coastal zone, Potiguar Basin, orbital images, radar, Geomorphology.

1. INTRODUÇÃO

A área de estudo está situada no Estado do Rio Grande do Norte, extremo nordeste do Brasil. O litoral setentrional deste estado apresenta uma intensa instabilidade morfológica, evidenciada por processos de erosão e de acreção da linha de costa. Ecossistemas frágeis coexistem com algumas das principais atividades socioeconômicas do Estado, como a exploração petrolífera, produção de sal marinho, carcinicultura, agricultura, pesca e turismo. Tais condições trazem a necessidade do monitoramento ambiental que vem sendo desenvolvido, utilizando técnicas de geoprocessamento e geofísica marinha, e aplicação de conhecimentos na área de geologia costeira.

Com a finalidade de obter informações geológicas e geomorfológicas (relevo, altimetria, padrão de drenagens, lineamentos), imagens óticas dos satélites Landsat e CBERS foram integradas com imagens de radar SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) e Radarsat para gerar mapas temáticos do ambiente costeiro, como subsídio a análise integrada dos diversos aspectos atuantes na modificação costeira da região em alguns cenários. O conhecimento dos aspectos morfológicos da superfície é importante para o prognóstico do comportamento do óleo em caso de derramamentos acidentais na área de estudo que é de alta sensibilidade ambiental. As unidades geomorfológicas mapeadas na área são dunas móveis e fixas, planície flúvio-marinha, planície flúvio-marinha vegetada (manguezal) e tabuleiros costeiros. O termo tabuleiros costeiros corresponde a platôs de origem sedimentar, com altitude média entre 50 e 150 m, relevo plano a suavemente ondulado, frequentemente interrompido por drenagens e ravinamentos (Prates *et al.* 1981).

2. LOCALIZAÇÃO, ASPECTOS FISIAGRÁFICOS E PROCESSOS COSTEIROS

A área é delimitada pelos meridianos 9421349 m N e 9447082 m N e pelos paralelos 739474 m E e 792185 m E (Figura 1).

Em escala global esta zona costeira tem as características do que Inman & Nordstrom (1971) definiram como uma costa de afastamento antiga, ou

seja, decorrente do movimento divergente entre placas litosféricas em estágios avançados de desenvolvimento. Este tipo de costa apresenta planícies costeiras extensas, de baixo relevo e sistemas de drenagem bem desenvolvidos (Silva *et al.* 2004).

O modelamento das formas de relevo nesta área é resultante da ação constante dos processos do meio físico, das condições climáticas, das variações do nível do mar, da natureza das seqüências geológicas, das atividades neotectônicas e do suprimento de sedimentos carreados pelos rios e oceano, que controlam o desenvolvimento de feições erosivas e construtivas na faixa litorânea (Souto *et al.* 2006).

Segundo Nimer (1989), o clima na área é semi-árido seco, sendo influenciado pela zona de convergência intertropical, com período seco de junho a janeiro e úmido de fevereiro a maio. A precipitação máxima é, em média, 600mm/ano e a temperatura média é de 26,8°C (Vital 2009). Os principais canais fluviais na área são os rios Piranhas-Assu, Casqueiras, Conceição, Cavalos e Conchas. As classes de vegetação consistem em manguezal, cobertura das paleodunas e vegetação de caatinga (arbórea e arbustiva), além das áreas de cultivo (Souto *et al.* 2006). As principais atividades industriais são de salinas, tanques de carcinicultura, agricultura, pesca, turismo e principalmente exploração de óleo e gás.

Os processos hidrodinâmicos que atuam na área são descritos por Chaves *et al.* 2006, Rocha *et al.* 2009 e Vital 2009, sendo caracterizados pela energia de ondas moderada, junto a costa, com alturas de 10 a 80 cm e período entre 4 e 8 segundos, ventos provenientes de direção NE, e regime de mesomare semi-diurno, com máxima de 3,3m durante maré de sizígia e mínima de 1,2m durante maré de quadratura.

3. SENSIBILIDADE AMBIENTAL

As Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo (Cartas SAO) contêm informações indispensáveis para o planejamento de contingência e para a implementação de ações mitigadoras aos incidentes com poluição por óleo. As cartas SAO apresentam informações de recursos biológicos, atividades econômicas e dos Índices de Sensibilidade do Litoral (ISL) ao derramamento de óleo, que são definidos com base em informações geomorfológicas, tipo de substrato geológico,

declividade, atuação de ondas e marés e indicações de trafegabilidade, variando de 1 a 10, obedecendo as diretrizes do Ministério do Meio Ambiente (MMA).

Silveira *et al.* (2003) elaboraram uma carta SAO para a costa entre os municípios de Guamaré e Macau, no Rio Grande do Norte, com ISL's 2 (tabuleiros costeiros), 3 (campos de dunas fixas e móveis), 7 (zona de praia e planície de inundação), 9 (planície de maré) e 10 (manguezal e lagoas). Souto *et al.* (2006) desenvolveram cartas SAO em Escala Operacional para a região da Ponta do Tubarão (parte leste da área de estudo). Estes mapas em escala de 1:10.000 oferecem maior detalhe do que os precedentes, tendo sido desenvolvidos com base em imagens IKONOS de alta resolução e levantamentos de campo em duas fases de maré. Na baixamar foram caracterizados cinco ISL's, 3 (praias dissipativas e campo de dunas móveis), 4 (praias intermediárias expostas e praias abrigadas), 7 (planície de maré arenosa exposta), 9

(planície de maré arenosa/lamosa abrigada) e 10 (deltas e barras de rio vegetadas, apicum e manguezal), enquanto que na preamar foram acrescentados os índices 5 (praias mistas de areia, cascalho e conchas) e 8 (escarpa/encosta de rocha não lisa e estruturas artificiais, abrigados). As áreas de influência da indústria petrolífera foram também consideradas por este autor com ISL 10, devido ao risco que estas atividades oferecem ao meio ambiente e populações que vivem nas adjacências de suas instalações. É importante a elaboração periódica deste tipo de cartas devido às constantes mudanças na paisagem costeira.

4. CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo está inserida no contexto geológico da Bacia Potiguar, uma bacia sedimentar meso-cenozóica, situada no extremo leste da Margem Equatorial Brasileira. A bacia abrange parte dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará (Figura 2),

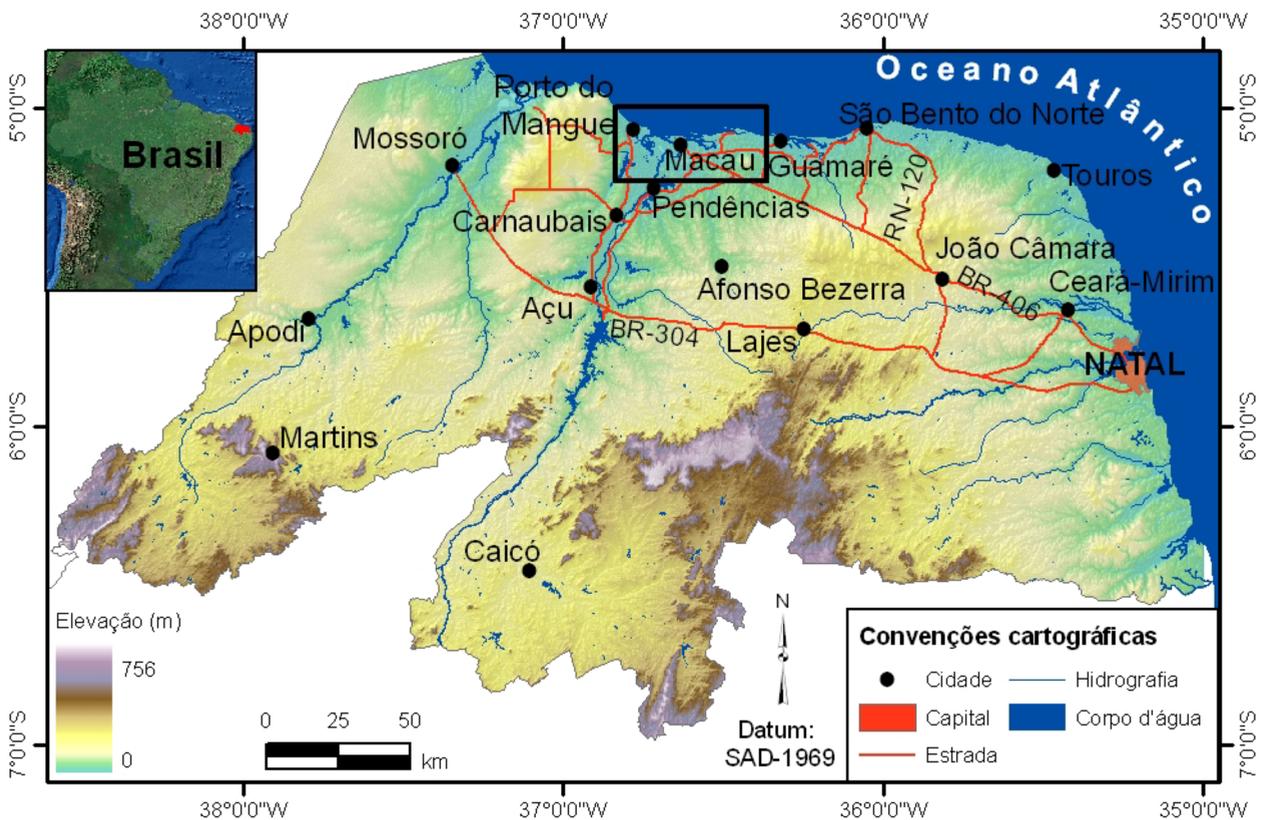


Figura 1 – Localização da área estudada no Estado do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil.

Figure 1 – Location of study area on Rio Grande do Norte state, northeast Brazil.

ao longo de aproximadamente 48.000 km², sendo 21.500 km² emersos e 26.500 km² submersos (Neto *et al.*, 2007).

As unidades litoestratigráficas estão distribuídas em três superseqüências: Rifte (Cretáceo Inferior); Pós-rifte (Aptiano); e Drifte (Albiano até o recente). A evolução cenozóica é marcada pela reativação dos sistemas de falhas de Afonso Bezerra (NW) e Carnaubais (NE), que influenciou na evolução do litoral entre Aracati/CE e Touros/RN (Srivastava & Corsino, 1984). Fonseca (1996) afirmou que este par de sistemas conjugados de falhas é responsável pela compartimentação do litoral entre a Ponta do Mel/RN e a Ponta dos Três Irmãos/RN, reativando parte da estruturação pré-existente e modelando a superfície atual e sedimentação costeira (Figura 3). Caldas *et al.* (1997) argumentou a existência de uma relação geométrica entre a linha de costa e a orientação do Sistema de Falhas de Carnaubais (Figura 3), concordando com Bezerra *et al.* (1998) que propõem

um soerguimento nos últimos 5.000 anos para a porção leste da falha nesta área. A influência destas estruturas na geomorfologia foi constatada em outras porções da bacia: Moura-Lima *et al.* (2005) analisou o controle tectônico na Chapada do Apodi, Dantas *et al.* (2004) reconheceu esta relação na porção central e SE da Falha de Afonso Bezerra, e Aquino *et al.* (2006) verificou-a na análise morfotectônica da região de Carnaubais/RN. Estudos estão sendo atualmente desenvolvidos com o intuito de melhor caracterizar a relação entre a neotectônica e modificações recentes da paisagem costeira no litoral setentrional do Rio Grande do Norte.

A Bacia Potiguar foi considerada a maior produtora *onshore* de hidrocarbonetos do Brasil com uma produção diária de 100.000 barris de óleo e 4 milhões de m³ de gás natural, segundo dados da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Bio-combustíveis (ANP). Na área de estudo existem 140 poços exploratórios e 350 poços explotatórios.

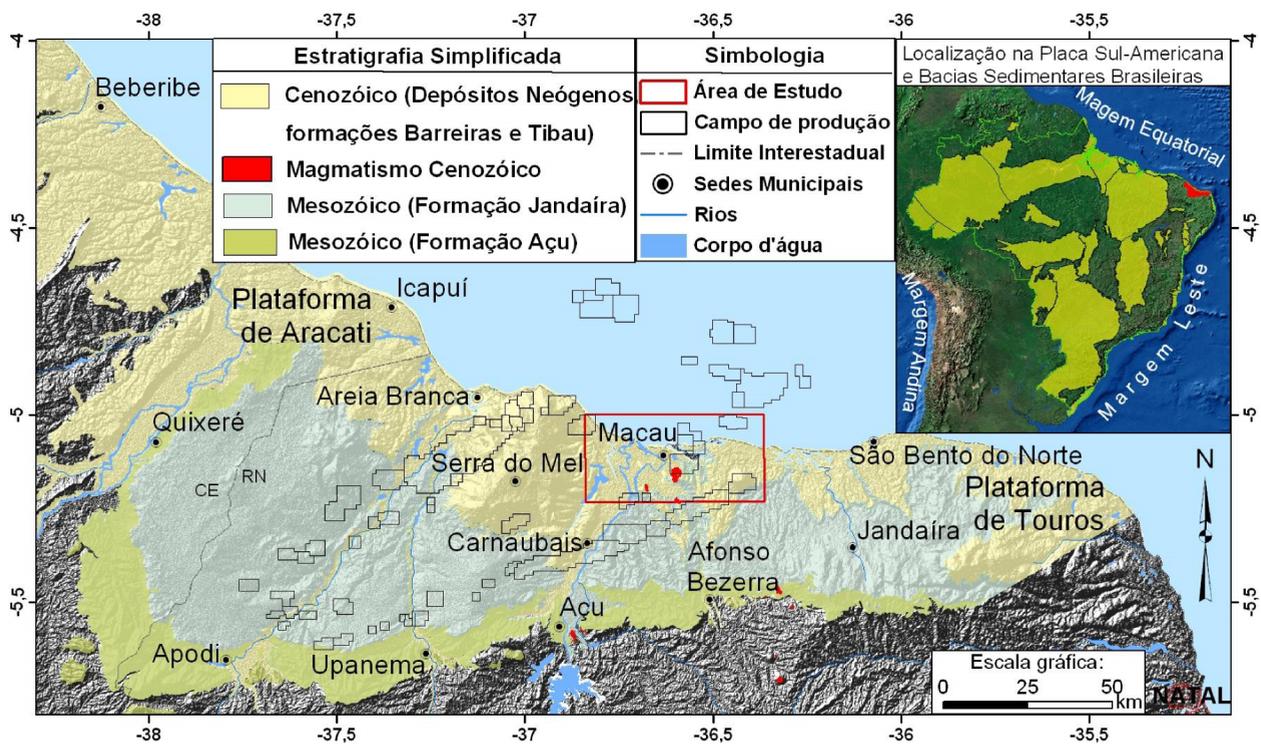


Figura 2 – Distribuição de campos petrolíferos na Bacia Potiguar e localização desta bacia meso-cenozóica na Placa Sul-Americana, com base em dados disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e pela Agência Nacional do Petróleo – (ANP).

Figure 2 – Oil fields on Potiguar Basin and location of this Meso-Cenozoic basin on South American Plate, based on data provided by Brazilian geological service (CPRM) and national agency of oil (ANP).

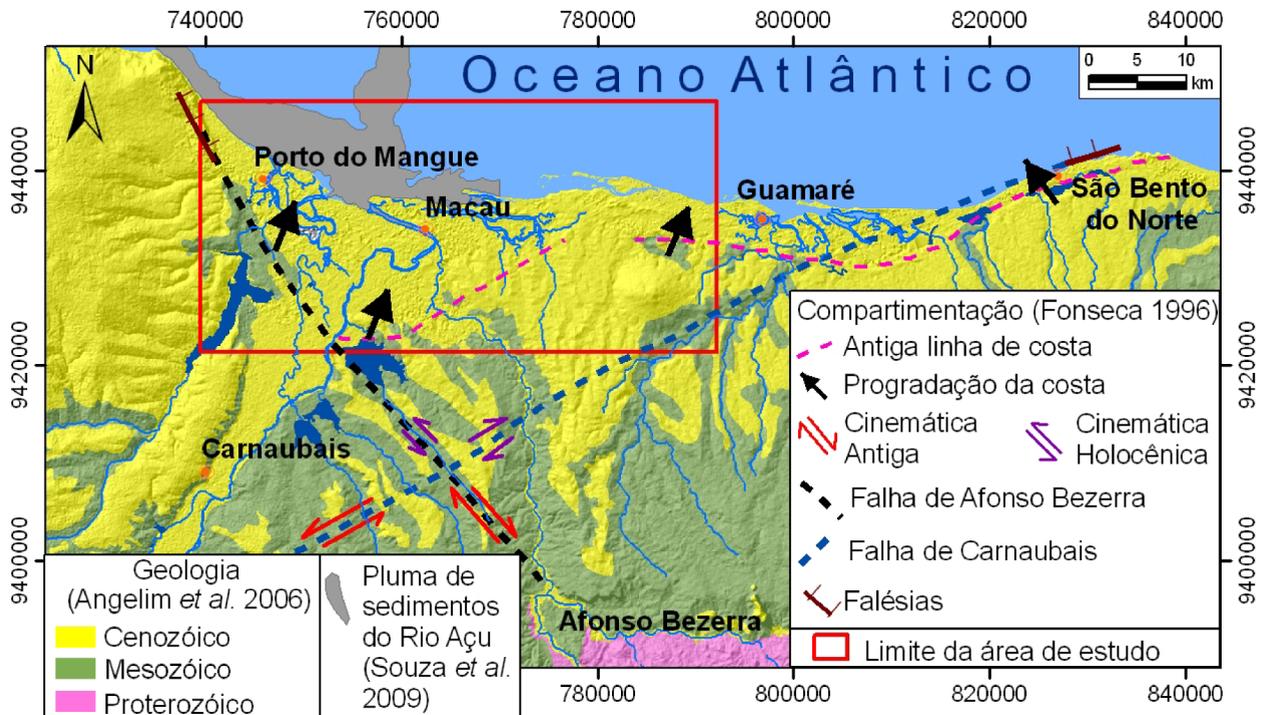


Figura 3 – Posicionamento dos sistemas regionais de falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais, cuja reativação holocênica de cinemática oposta à antiga controlou a morfologia do litoral setentrional do Rio Grande do Norte, NE-Brasil.

Figure 3 – Afonso Bezerra and Carnaubais Regional Fault Systems, which Holocenic reactivation controlled the coastal morphology of northern Rio Grande do Norte state, NE-Brazil.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

As imagens orbitais óticas utilizadas foram obtidas pelos satélites Landsat 7 ETM+ (11/06/2002), CBERS-2/CCD (19/04/2004) e CBERS-2B/CCD (23/08/2008) e disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>). As bandas espectrais foram unificadas em um arquivo multicamadas, que em seguida foi submetido ao georreferenciamento utilizando pontos de controle coletados em campo com DGPS Topcon L₁/L₂, na projeção UTM Zona 24S e datum SAD-1969. A estatística das imagens Landsat 7 ETM+ e CBERS-2B/CCD foi calculada com o objetivo de permitir a análise dos parâmetros estatísticos, correlação entre bandas e a aplicação das técnicas de processamento que levam em consideração estes parâmetros.

O número C de possibilidades de combinações entre as bandas no sistema RGB foi calculado

utilizando a Fórmula 1 (Noyola-Medrano *et al.* 2005). Para a imagem Landsat, C = 20 possibilidades de combinações, sendo que para cada uma é possível fazer seis trocas de banda entre os canais vermelho, verde e azul, por exemplo, 123, 132, 213, 231, 312 e 321. Já para a imagem CBERS o valor de C = 4. A análise estatística dos dados espectrais permite selecionar quais composições apresentariam melhor resultado, através do cálculo do Fator de Índice Ótimo – FIO (Fórmula 2), que considera o desvio padrão de cada banda e os coeficientes de correlação entre elas. Quanto maior o valor de FIO, maior serão as variações de cor, gerando composições mais informativas (Chavez *et al.*, 1982).

As combinações RGB 541, 531 e 751 obtiveram maiores valores de FIO para a imagem Landsat 7 ETM+, optou-se por utilizar também a combinação RGB entre as razões de bandas 7/3 5/3 4/3 (Souto *et al.* 2006). No caso da imagem CBERS-2B/CCD os três maiores valores de FIO foram os das composições

RGB 431, 421 e 432, porém a aplicação da Análise por Principal Componente (APC) obteve melhores resultados na diferenciação de unidades de paisagem. A APC separa ao máximo o contraste das n bandas e através de transformação matemática gera n novas imagens. A maior variabilidade dos dados está na primeira PC e vai diminuindo nas PCs seguintes. Assim como as bandas originais, as PCs foram combinadas no sistema de cores RGB e as combinações geradas foram submetidas à aplicação de realce de contraste por equalização do histograma.

$$C = \frac{m(m-1)(m-2) \dots (m-n+1)}{n!} \quad (1)$$

$$FIO = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{|r_{(1,2)}| + |r_{(1,3)}| + |r_{(2,3)}|} \quad (2)$$

Os dados SRTM são produto da aquisição de dados topográficos para 80% da superfície terrestre, realizada pelas agências espaciais americana (NASA), italiana (ASI) e alemã (DLR) nos primeiros onze dias do mês de fevereiro do ano 2000. Os dados aqui utilizados têm 90m de resolução, foram adquiridos via *ftp* pelo endereço eletrônico *ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov* e convertidos para a projeção UTM Zona 24S, *Datum* SAD-1969. A partir dos dados SRTM foram extraídas informações de altimetria, declividade, aspecto e sombreamento (por filtragem direcional), além da integração com imagens RGB gerando produtos híbridos 2D e 3D. A imagem RADARSAT foi primeiramente submetida a uma correção geométrica do seu posicionamento espacial, em seguida foi efetuado o reescalonamento de 16 bits (nível digital de 0 a 65535) para 8 bits (0 a 255), georreferenciamento com base nos pontos de controle obtidos com DGPS Topcon L₁/L₂, e aplicação do filtro *Enhanced Frost* 3X3 para reduzir o ruído *speckle* (textura granular).

A integração de dados ópticos e de radar é uma metodologia que vem sendo utilizada em estudos de geociências, com o objetivo de associar as informações espectrais das imagens óticas com informações espaciais das imagens de radar (Boulhosa & Souza-Filho 2009). A metodologia de integração aplicada

neste trabalho consiste no desenvolvimento de composições RGBI, onde os canais vermelho, verde e azul contem bandas espectrais e no canal Intensity é adicionada a imagem Radarsat ou os sombreamentos SRTM. Os filtros sobel 5X5 e laplaciano 5X5 foram aplicados sobre a PC1 da imagem CBERS-2/CCD de 02/10/2007, destacando feições lineares no terreno devido à simulação da iluminação solar em quatro sentidos (N-S, NE, E-W, NW). A Tabela 1 relaciona sucintamente as informações das imagens utilizadas e o tipo de processamento nelas aplicado.

6. RESULTADOS

6.1 Geologia

A caracterização geológica da área de estudo teve como base as informações obtidas em Souto *et al.* (2006), Angelim *et al.* (2006) e Bezerra *et al.* (2006), juntamente com a interpretação de imagens híbridas (RGB+SRTM) e (RGB+Radarsat), além de informações disponíveis via *web* no GEOBANK do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e levantamentos de campo realizados nos meses de fevereiro, março, maio e junho de 2007 e março de 2008. As unidades estratigráficas presentes na área de estudo (Figura 6) variam de idade cretácea a holocênica, em uma coluna que da base para o topo é composta pela Formação Jandaíra (carbonatos fossilíferos), Formação Tibau (arenitos calcíferos finos a conglomeráticos), Formação Macau (basaltos e gabros), Formação Barreiras (conglomerados e arenitos grossos, com intercalações de siltitos) e Depósitos Quaternários. Os Depósitos Quaternários consistem em Depósitos Aluvionares Antigos (conglomerados e arenitos grossos, relacionados à antigos terraços fluviais), Depósitos Aluvionares Recentes (areias quartzosas de canal e sedimentos finos em planícies de inundação), Depósitos Flúvio-Lacustrinos (sedimentos finos relacionados com transbordamento), Depósitos Flúvio-Marinhos (sedimentos finos ricos em carbonato e matéria orgânica, sob influência de marés), Depósitos de Mangue (silte, argila e matéria orgânica), Depósitos Eólicos Vegetados (areias quartzosas avermelhadas, com matéria orgânica), Depósitos Eólicos Não-vegetados (areias quartzosas bem selecionadas com grãos arredondados) e Depósitos Litorâneos de Praia

(areia fina a grossa com bioclastos e minerais pesados).

Nas rochas carbonáticas da Formação Jandaíra ocorrem evidências de deformação frágil como falhas e juntas extensionais de atitude 330°Az/85NE e processos de silicificação resultante da reativação da Falha de Afonso Bezerra similar a outros setores da bacia (Damascena *et al.*, 2008; Nogueira *et al.* 2008). Na porção central da área ocorrem falha 105°Az/58SW, juntas extensionais 78°Az/55NW, 35°Az/84SE e 0°Az/79W em arenito lítico da Formação Tibau (Bezerra *et al.* 2006).

6.2 Unidades geomorfológicas

Com base na interpretação dos produtos gerados a partir dos dados SRTM e produtos híbridos (Landsat+SRTM, CBERS+SRTM, Landsat+Radarsat e CBERS+Radarsat), juntamente com as informações disponíveis na literatura (Souto *et al.*, 2006, Souza *et al.*, 2009, Pereira *et al.*, 2009) foi possível o mapeamento das unidades geomorfológicas, representado na Figura 5, que consistem em tabuleiros costeiros, planície flúvio-marinha, planície flúvio-marinha vegetada, dunas fixas, dunas móveis e zona de praia.

Tabela 1 – Resumo das técnicas de processamento digital realizadas sobre as imagens de sensoriamento remoto.
Table 1 – Summary of digital remote sensing image processing.

Satélite/ Sensor	Ponto/ Órbita	Data	Tipo de Processamento Aplicado
Landsat 7 ETM+	215/064	11/06/2002	Georreferenciamento. Correção atmosférica. Composição RGB entre bandas e razões de bandas. Realce de contraste por equalização do histograma. Integração com dados SRTM e Radarsat.
CBERS 2/CCD	148/106	19/04/2004 02/10/2007	Georreferenciamento. Integração com dados SRTM gerando modelos 3D (2004). Filtragem direcional da PC1 (2007).
CBERS 2B/CCD	148/106	23/08/2008	Georreferenciamento. Composições RGB entre as bandas e PCs. Realce de contraste por equalização do histograma. Integração com dados SRTM e Radarsat.
SRTM	Não se aplica	Fev/2000	Georreferenciamento. Extração de elevação, declividade, aspecto e sombreamento. Integração com composições RGB Landsat e CBERS gerando produtos 2D e 3D.
Radarsat	Não se aplica	29/06/2006	Georreferenciamento. Re-escalamento espectral. Redução de ruído. Integração com composições RGB.

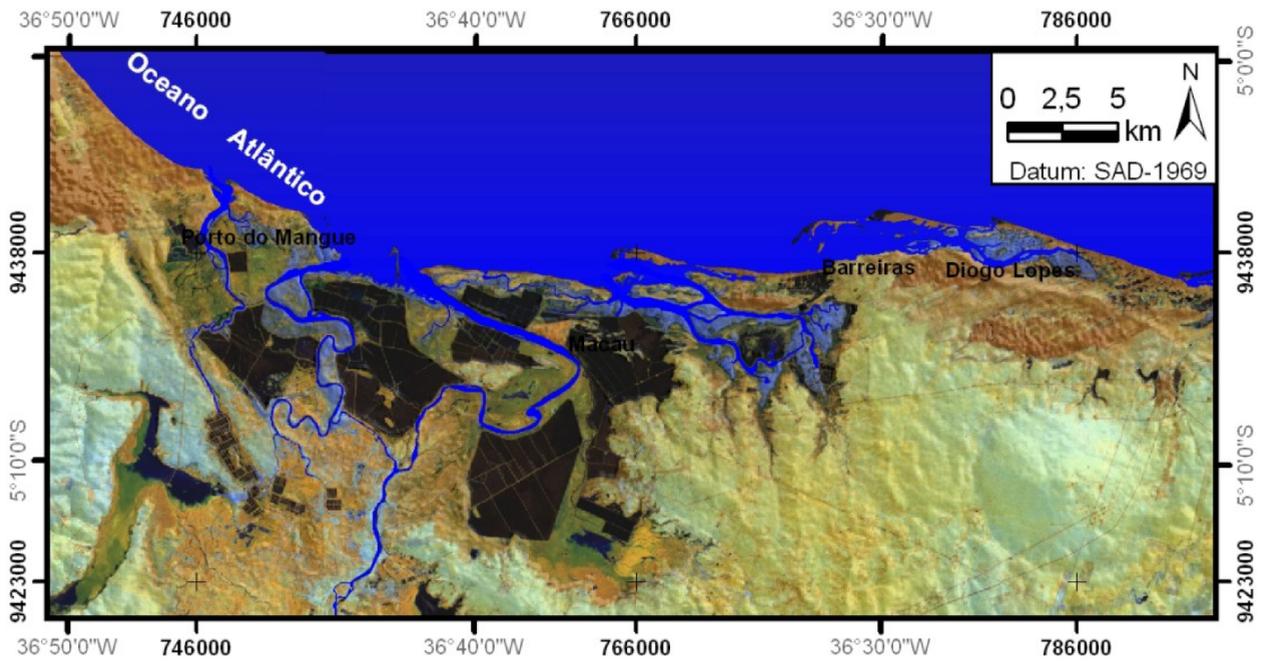


Figura 4 – Imagem colorida integrando a composição RGB entre as razões de banda 7/3 - 5/3 - 4/3 (Landsat 7) e sombreamento SRTM.

Figure 4 – Color image integrating RGB composition between band's ratios 7/3 - 5/3 - 4/3 (Landsat 7) and SRTM shading.

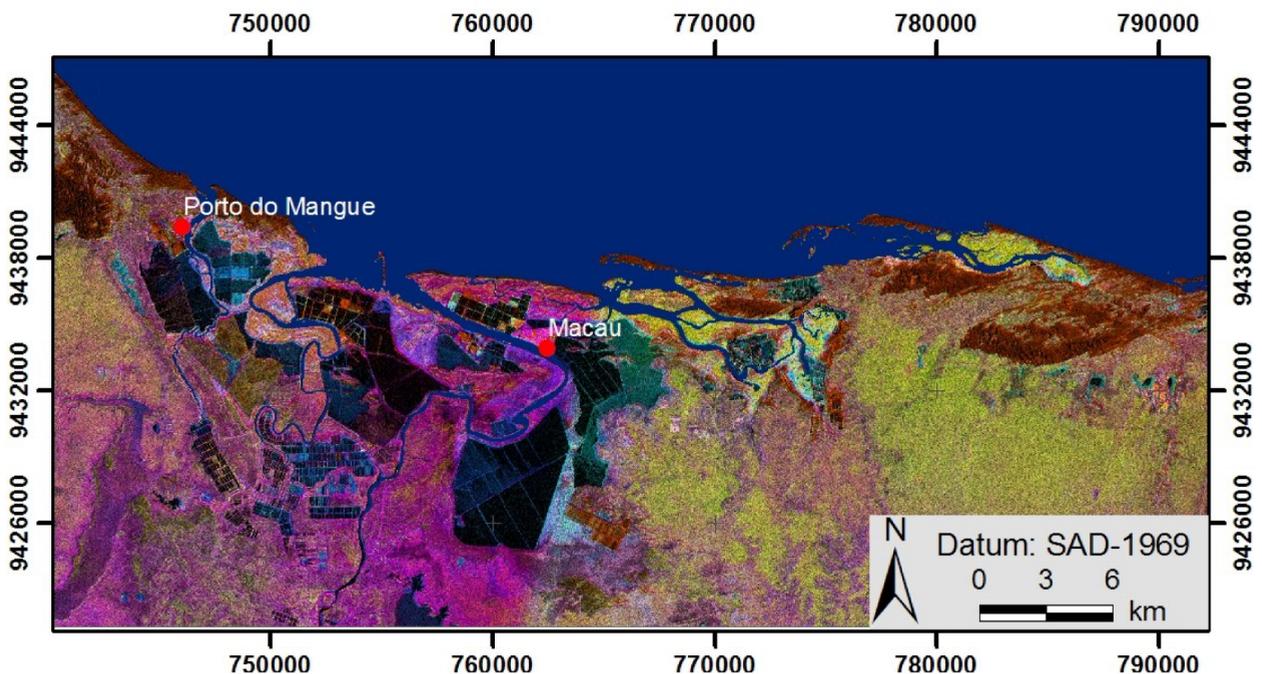


Figura 5 – Imagem colorida integrando a composição RGB entre as Principais Componentes PC1 PC4 e PC3 (CBERS-2B) com imagem Radarsat.

Figure 5 - Color image integrating RGB PC1 PC4 PC3 (CBERS-2B, 2008) and Radarsat images.

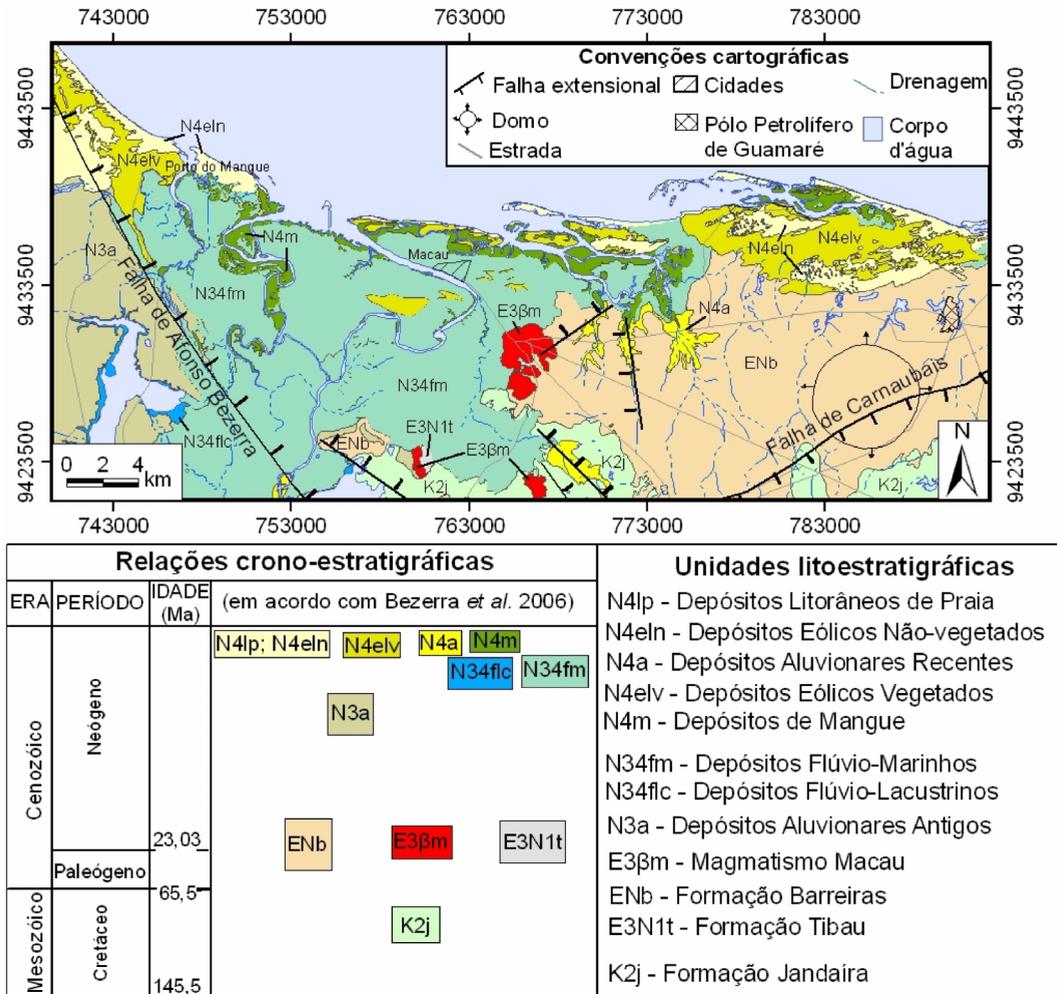


Figura 6 – Mapa geológico da área de estudo.
 Figure 6 – Geology of study area.

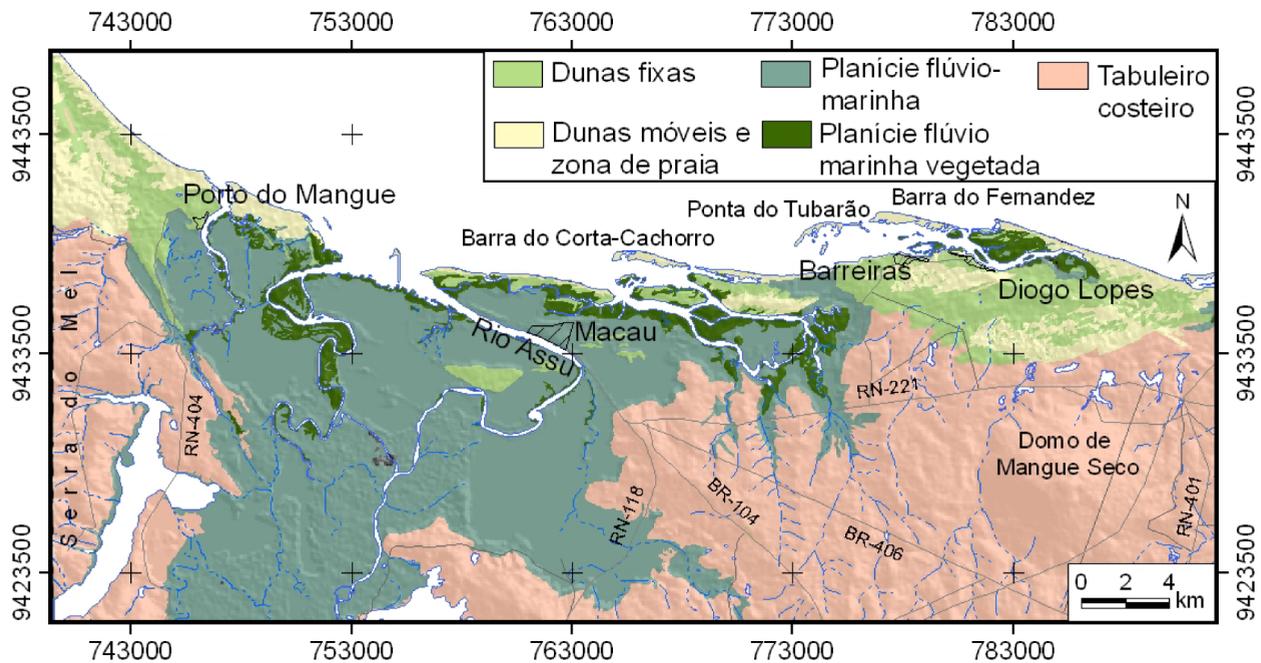


Figura 7 – Mapa geomorfológico da área de estudo.
Figure 7 – Geomorphology of study area.

6.3 Lineamentos

Apesar dos processos hidrodinâmicos (ondas, marés, correntes, ventos, pluviosidade, escoamento superficial e ação antrópica) serem mais eficientes nas modificações da paisagem costeira em curto espaço de tempo, existe evidências de estruturas deformacionais, até mesmo em registros holocênicos, que justificam a aplicação de análise morfotectônica em estudos de evolução costeira (Fonseca 2006). Desde os abalos sísmicos de 1986 na região de João Câmara/RN se intensificaram os estudos em neotectônica na Bacia Potiguar, comprovando que o tectonismo está atuante até o recente na região (Fonseca, 1996; Caldas *et al.*, 1997; Bezerra, 2000; Amaral *et al.*, 2000; Coriolano *et al.*, 2000; Bezerra *et al.*, 2001; Dantas *et al.*, 2004; Moura-Lima *et al.*, 2005; Aquino *et al.*, 2006; Nogueira *et al.*, 2008).

Os lineamentos topográficos negativos foram extraídos a partir dos dados SRTM e da imagem CBERS-2/CCD, além do auxílio de imagens híbridas e modelos 3D, aplicando técnicas de filtragem direcional e realce de bordas. A classificação em função da orientação (N-S, NE, E-W, NW) e o traçado

dos lineamentos foram realizados em ambiente SIG com vetorização no aplicativo ArcGIS 9.3. Informações de localização geográfica (ponto central), direção azimutal e comprimento foram extraídas automaticamente. As orientações dos lineamentos foram integradas em diagramas de rosetas no Stereonet v. 2.46 e histogramas (comprimento *versus* azimute), obtendo informações diretamente nas tabelas de atributos dos arquivos SHP, otimizando a análise do comportamento e distribuição espacial dos lineamentos.

A interpretação dos dados SRTM mostra orientações gerais médias 310° Az, 45° Az, 179° Az e 92° Az. Os maiores valores de comprimento medidos para cada direção foram 27,7 km (NW) na porção oeste da área, 17 km (NE) na região de Diogo Lopes, 13,2 km (N-S) nas proximidades da Lagoa de Alagamar, e 5,7 km (EW) na linha de costa nas proximidades de Macau e da Foz do Rio Piranhas-Assu (Figura 8). Apesar de o número de lineamentos NE ter sido 59 e os NW serem 38, o comprimento dos lineamentos NW é em geral maior, fazendo com que ao observar o mapa se tenha a impressão de que foram mapeados mais lineamentos NW do que NE.

No diagrama de rosetas cada pétala representa um intervalo de 10° Az, as pétalas NW são mais expressivas devido ao fato de que a orientação dos lineamentos foi mais homogênea, ou seja, diferentes lineamentos NW têm o mesmo valor de direção ou valores próximos, o que resulta em pétalas maiores.

A análise do histograma que relaciona os azimutes com os comprimentos permite uma classificação dos lineamentos em três grupos: o primeiro com 88 lineamentos de comprimentos menores que 5 km, outro com 26 lineamentos entre 5 e 10 km e o último com 7 lineamentos maiores que 10 km. Neste último grupo três lineamentos têm mais de 15 km, sendo um de direção NE na região de Diogo Lopes, um com direção NW na porção leste da área e o outro com direção NW e aproximadamente 28 km separando os tabuleiros costeiros da planície flúvio-marinha na porção oeste da área, correspondendo a Falha de Afonso Bezerra.

Os lineamentos mapeados com a imagem CBERS têm orientações gerais médias de 316° Az, 45° Az, 175° Az e 89° Az. Os maiores valores de comprimento medidos para cada direção foram 17,3 km (NE) na porção centro leste da área, 13,3 km (NW) na porção oeste da área, 4,5 km (NS) nas proximidades da Lagoa de Alagamar, e 4,7 km (EW) nas proximidades de Macau e da Foz do Rio Piranhas-Assu. A identificação da continuidade de alguns lineamentos é dificultada pela presença de salinas e campos de dunas móveis, o que explica uma diferença relativa entre os comprimentos dos lineamentos em comparação com aqueles obtidos com a filtragem dos dados SRTM. Porém, os dados CBERS-2/CCD oferecem uma melhor apresentação de feições lineares naturais na zona costeira que não é bem representada nos dados SRTM, devido a sua baixa resolução espacial. As imagens filtradas CBERS-2/CCD revelaram alguns lineamentos NE na porção leste da área que não podiam ser observados com os dados SRTM e por outro lado alguns lineamentos NW não aparecem com tanta expressividade devido à natureza espectral da imagem. A análise do histograma mostra que 152 lineamentos têm comprimentos entre 0,34 e 5 km, outro grupo de 15 lineamentos varia entre 5 e 10 km e por fim um grupo de 3 lineamentos com comprimento entre 10 e 17,3 km.

6.4 Rede de drenagem

Informações pré-existentes, composições RGB da imagem CBERS-2B de 23/08/2008 e a filtragem direcional dos dados SRTM garantiram o mapeamento das drenagens presentes atualmente na área. Os canais fluviais e as bordas das lagoas apresentam freqüentemente orientações lineares paralelas aos sistemas regionais de falhas. O Rio Piranhas-Assu tem orientação principal NE (entre 30° e 60°) subparalela aos diversos lineamentos mapeados por toda a área, inclusive nas regiões litorâneas da Barra do Corta Cachorro, ilha barreira da Ponta do Tubarão e foz do Rio dos Cavalos. O segmento estuarino do Rio Piranhas-Assu nas proximidades da cidade de Macau tem orientação NW (300° Az), subparalela aos segmentos mais alongados de alguns *spits* costeiros distribuídos pela linha de costa, além de outros canais de drenagem (como os rios Olho d'água e Amargoso) e de outros segmentos lineares do próprio Rio Assu.

6.5 Altimetria, declividade e aspecto

A altimetria foi extraída dos dados SRTM como linhas de contorno e na forma de um modelo digital de elevação 2D. Os valores em metros (m) apresentados neste trabalho representam a topografia com relação ao nível médio do mar, portanto a informação de que um campo de dunas tem cotas de 4 m, significa que a porção mais alta está posicionada 4 m acima do nível do mar e não que a espessura do depósito sedimentar é de 4 m. Os tabuleiros costeiros ocorrem em intervalos altimétricos de 7 a 119 m, sendo os valores mais altos correspondentes a Serra do Mel (porção oeste da área) e ao Domo de Mangue Seco (Porção leste da área). As dunas localizadas em ilhas barreiras ou *spits* arenosos e faixa litorânea têm cotas de até 4 m, porém na porção leste da área nas proximidades das localidades de Barreiras e Diogo Lopes as cotas têm valores entre 15 e 25 m. Já na porção oeste da área, as dunas móveis depositadas sobre a Serra do Mel chegam até 50 m de elevação, enquanto que o mesmo tipo de depósito nas proximidades da faixa litorânea da mesma área tem cerca de 5 m de altitude. A planície flúvio-marinha tem cotas entre 2 e 6 m e foi subdividida em função da presença ou ausência de cobertura vegetal, as áreas onde ocorre a presença da vegetação de manguezal foram denominadas de planície flúvio-marinha vegetada.

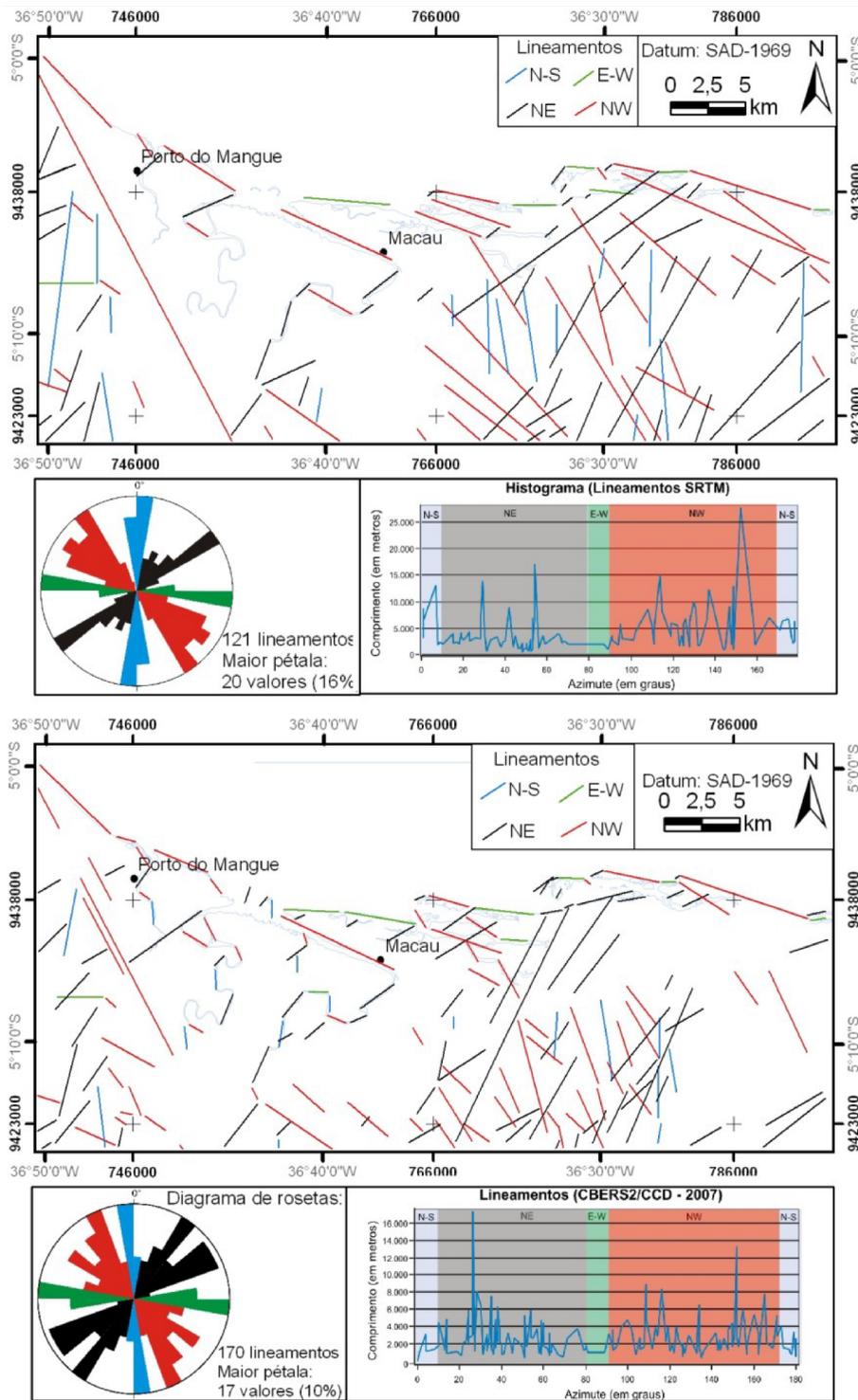


Figura 8 – Lineamentos mapeados a partir de dados SRTM e CBERS-2 representados em mapa, diagrama de rosetas e histograma (comprimento versus azimute).
 Figure 8 – Lineaments mapped from SRTM and CBERS-2 data, represented in map, rose diagram and histogram (length versus azimuth).

O perfil topográfico A-A', de orientação E-W, localizado na parte sul da área (Fig. 9), representa o vale do Rio Piranhas-Assu encaixado na região de tabuleiros costeiros. Esta variação topográfica de 25 e até 50 m é consequência da natureza das unidades geológicas que compõem a planície flúvio-marinha do vale do Assu e das unidades que compõem a superfície de tabuleiros, bem como devido à atuação de elementos tectônicos na própria estruturação da Bacia Potiguar e reativação neotectônica de estruturas geológicas. Uma variação pode ser observada nos tabuleiros, na porção leste do perfil, próximo a região do Domo de Mangue Seco, onde as cotas altimétricas atingem valor de 50 m, formando vales que coincidem com canais de drenagem, evidenciando a influência do escoamento superficial no modelamento da paisagem.

Os valores de declividade em graus foram classificados em cinco intervalos variando de muito baixa a muito alta. As áreas com declividade muito alta foram identificadas nas regiões de borda do vale do Rio Piranhas-Assu, sobretudo com direções gerais N, NW, NE e EW, realçando contatos já observados no modelo digital de elevação entre o tabuleiro costeiro e a planície flúvio-marinha. Zonas lineares contínuas de declividade muito alta são também observadas sob campos de dunas móveis, mais uma vez coincidindo com diferenças notadas no modelo digital de elevação. No Domo de Mangue Seco a declividade também varia de alta a muito alta.

A classificação em graus azimute (0 a 360°) permite identificar os oito sentidos de mergulho para N, NE, E, SE, S, SW, W e NW, realçando altos e baixos topográficos, permitindo assim constatar a presença de serras, vales de drenagens, escarpas e encostas. Esta informação apresentada em mapa facilita o planejamento de levantamentos de campo e instalação de novas áreas de ocupação, uma vez que é possível estimar quais porções da superfície são mais ou menos adequadas ao acesso por parte antrópica. O sentido de fluxo do escoamento superficial de água ou outros fluídos, como no caso de derramamento acidental de poluentes ou petróleo, pode ser identificado. Em casos de acidentes ambientais, esta informação é importante, uma vez que permite prever o comportamento do fluído poluente, colaborando assim com a eficiência das medidas mitigadoras.

6.6 Modelagem 3D

A integração em três dimensões dos dados de altimetria (SRTM) com combinações coloridas entre as bandas de imagens óticas permite a geração de modelos que facilitam a identificação das feições morfológicas, uma vez que apresentam as variações topográficas associadas com as informações espectrais. A Figura 12a integra a composição RGB entre as razões de banda 7/3-5/3-4/3 da imagem Landsat 7 ETM+ de 11/06/2002 com os dados SRTM, destacando a atuação de lineamentos de direção geral NE, EW e NW na morfologia da paisagem costeira cenozóica. O vale do Rio Piranhas-Assu aparece encaixado em lineamentos NNE, que controlam a planície flúvio-marinha, com o considerável rebaixamento do trecho extremo norte da região. O sistema de drenagens acompanha as principais direções de lineamentos, em sua maioria no sentido do vale do Rio Piranhas-Assu. A relação entre a geometria do litoral e a Falha de Carnaubais na região de Caiçara do Norte e São Bento do Norte, argumentada por Caldas *et al.* (1997) fica bastante evidente neste modelo, assim como o alinhamento da Falha de Afonso Bezerra entre Porto do Mangue e Carnaubais.

Na Figura 12b está representada em três dimensões a paisagem costeira na região à oeste do Rio Piranhas-Assu, no município de Porto do Mangue, integrando os dados SRTM com composição RGB PC1 PC4 PC3 da imagem CBERS2B/CCD de 23/08/2008. São observados os campos de dunas móveis em cor laranja, a Serra do Mel em tons amarrozados a verde escuro a ocupação da área estuarina por salinas e tanques de carcinicultura, além do Rio das Conchas e Rio dos Cavalos. Neste modelo as variações altimétricas entre a Serra do Mel e a planície flúvio-marinha ficam bastante evidentes, com uma feição linear de relevo negativo de orientação NW, paralela à orientação do Sistema de Falhas de Afonso Bezerra. As bordas da Lagoa de Alagamar têm orientação NE, subparalela ao Sistema de Falhas de Carnaubais, enquanto que na Lagoa do Queimado as bordas são controladas pelo sistema de falhas de Afonso Bezerra. Os canais flúvio-estuarinos do Rio dos Cavalos e Rio das Conchas têm trechos com orientação NE e outros com orientação NW, sugerindo também um possível controle da atuação tectônica.

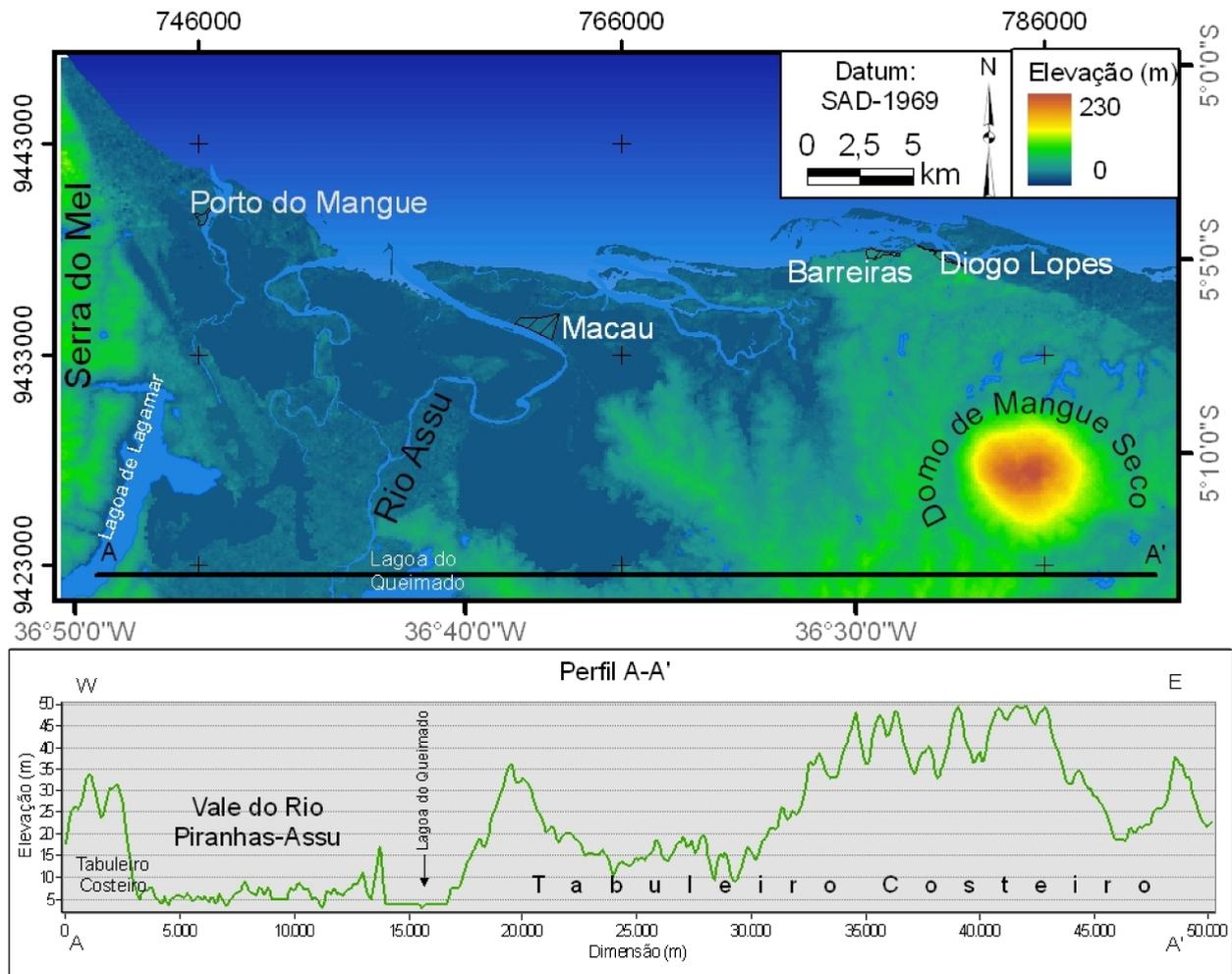


Figura 9 – Elevação da área estudada, destacando feições topográficas como o vale do Rio Assu, o Domo de Manguê Seco e a Serra do Mel.

Figure 9 – Elevation of study area, showing Assu Assu River's fluvial valley and higher surfaces like Manguê Seco Dome and Serra do Mel regions.

A porção da Serra do Mel mais próxima do litoral está representada na Figura 12c pelo modelo híbrido que integra os dados SRTM com composição RGB 321 da imagem CBERS2/CCD de 19/07/2004. Os extensos campos de dunas móveis (tons esbranquiçados) podem ser observados em cotas topográficas mais baixas nas proximidades da faixa litorânea e recobrimdo superfícies mais elevadas na Serra do Mel. As feições poligonais maiores na Figura 12c representam as atividades de agricultura e as menores correspondem às áreas de exploração petrolífera, ambas as formas de atividade antrópica

aparecem com cor bege e estão instaladas em área com vegetação de caatinga (em tons marrons).

O Domo de Manguê Seco, feição presente na porção leste da área com cotas entre 20 e 119 m, está representado na Figura 12d, coberto por vegetação de caatinga em tons amarronzados. Canais de drenagem superficial escoam das áreas mais elevadas desta feição, alimentando lagoas situadas na sua base. Sobre ele encontra-se o Campo de Guimarães, um dos importantes campos de exploração petrolífera na área.

A Figura 12e destaca a região leste da foz do Rio Piranhas-Assu, onde *spits* arenosos e ilhas barreiras

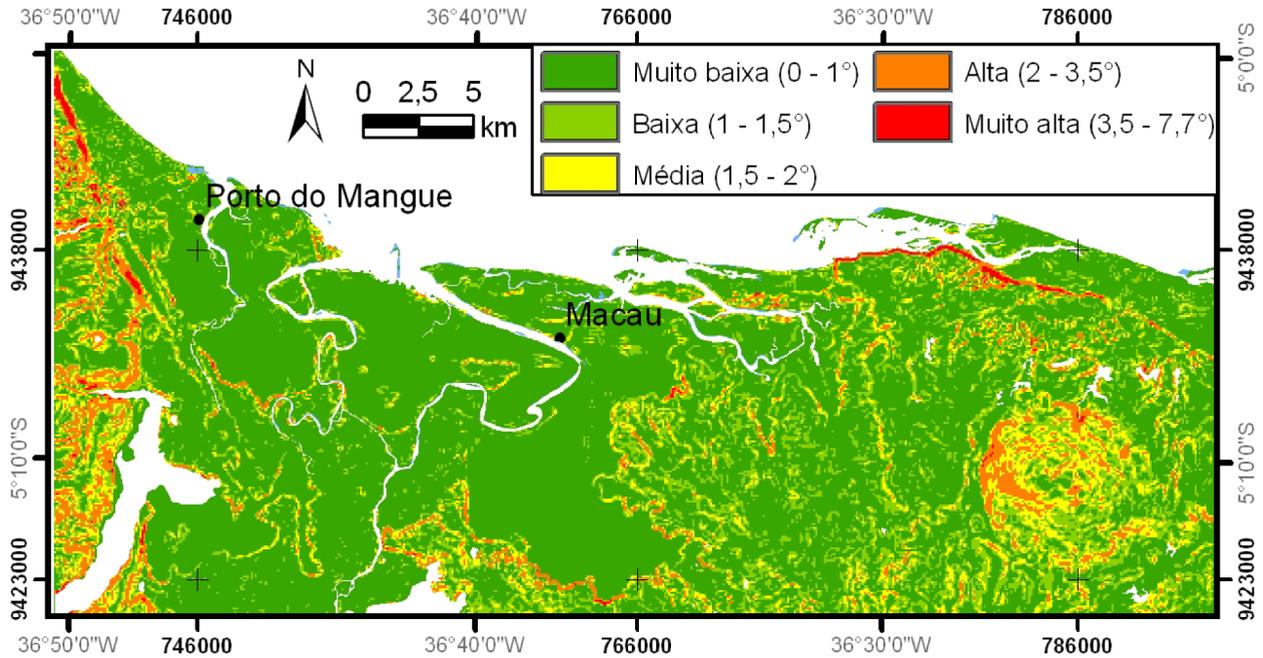


Figura 10 – Declividade alta em encostas de vales fluviais e altos topográficos.

Figure 10 – Higher slope degrees on fluvial valleys limits and topographic highs

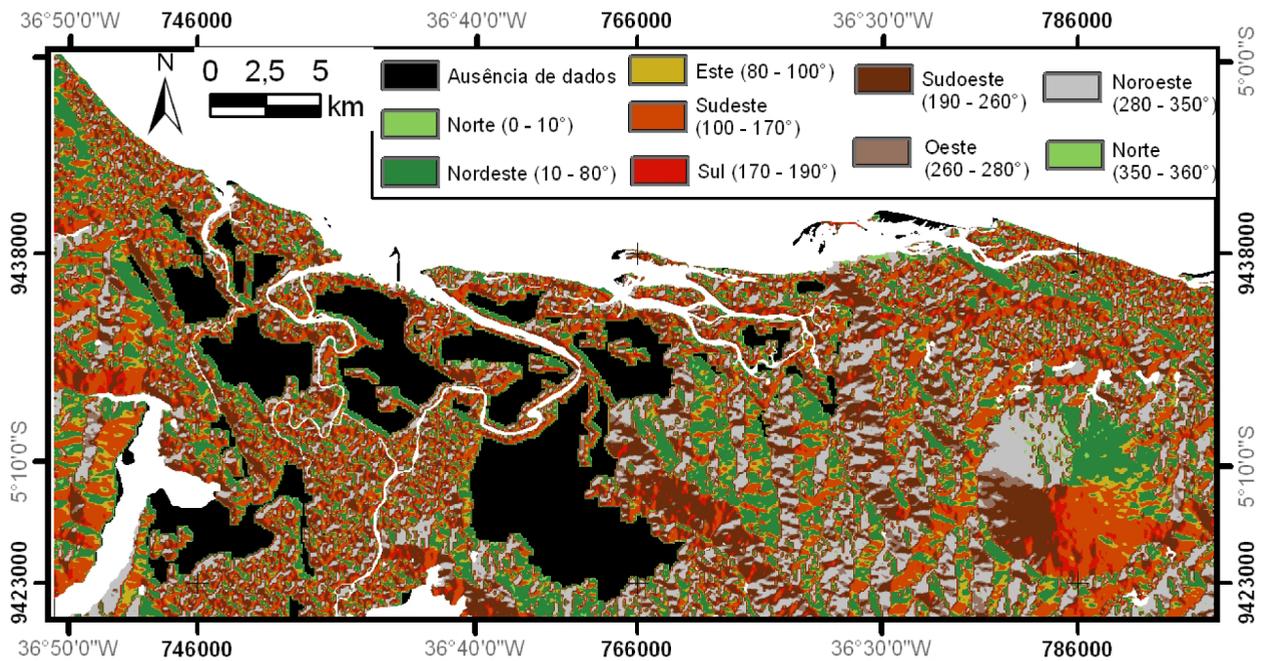


Figura 11 – Mapa de aspecto com oito sentidos de mergulho de feições morfológicas, indicando o comportamento do escoamento superficial e auxiliando na identificação de altos e baixos topográficos.

Figure 11 – Aspect map with eight dip directions for morphological features, indicating the behavior of surface flow and aiding the identification of topographic high and low areas.

presentes na zona costeira mostram orientações W-NW em seus segmentos mais alongados e NE nos mais curtos, evidenciando mais uma vez a influência das estruturas tectônicas regionais na geometria das feições morfológicas quaternárias. A semelhança geométrica é também observada no canal estuarino do Rio Piranhas-Assu, rios Conceição e Casqueiras, na área lagunar de Diogo Lopes e no alto topográfico observado sobre campos de dunas móveis e fixas.

7. DISCUSSÕES

7.1 Lineamentos e morfologia do terreno

Apesar das freqüentes mudanças na morfologia costeira, os lineamentos mapeados estão sempre presentes, como por exemplo, no caso da Ponta do Tubarão, que ao contrário de outros corpos arenosos presentes na área que migram em direção ao W ou NW, apresenta sempre comportamento típico de uma feição que apresenta controle tectônico, com uma inflexão para SW que pode variar em grau azimute dependendo do ano. Na imagem CBERS-2/CCD de 2007 a Ponta do Tubarão inflexiona para 213° Az, uma direção subparalela a lineamentos mapeados na porção mais continental da área, incluindo segmentos do Rio Piranhas-Assu, limite entre os tabuleiros e a planície flúvio-marinha e outros trechos da linha de costa, o que indica uma possível continuidade de lineamentos continentais em direção ao litoral. Segundo Fonseca (2006), a permanência de uma feição linear frente ao rejuvenescimento do relevo com a atuação contínua dos agentes costeiros externos é um indicativo do controle da costa por macroestruturas endógenas.

A influência de processos sub-superficiais na morfologia do terreno pôde mais uma vez ser constatada, visto que a orientação azimutal da maioria dos lineamentos mapeados, tanto a partir de dados óticos quanto de radar, é semelhante à orientação de sistemas regionais de falhas antigas reativadas no Holoceno, Afonso Bezerra (NW) e Carnaubais (NE).

Esta semelhança pode ser observada em canais fluviais e estuarinos de orientação linear prolongada, falésias, vales e altos topográficos e até mesmo em segmentos da linha de costa. A presença de lineamentos de orientação NW nas bordas da Lagoa do Queimado, corrobora com a idéia de que as rochas

silificadas que ali ocorrem estão relacionadas à reativação do Sistema de Falhas de Afonso Bezerra.

Devido às características peculiares da área de estudo como baixo relevo e intensa ocupação antrópica é extremamente relevante o uso combinado de imagens óticas e de radar para o mapeamento dos lineamentos e da rede de drenagens. O fato de a imagem CBERS-2/CCD ter resolução de 20 m favorece o mapeamento de lineamentos nas porções da área com menor variação de relevo e baixas cotas altimétricas que não são bem observadas nos dados SRTM, porém estes dados oferecem a vantagem de não representar as feições lineares antrópicas da superfície como estradas, cercas, canais artificiais, barragens, áreas de cultivo e industriais. Sendo assim, alguns lineamentos são mascarados nos dados SRTM pela sua baixa resolução espacial e pela relação entre o imageamento de radar e a própria natureza das áreas litorâneas, enquanto que na imagem CBERS-2/CCD outros lineamentos são mascarados pelas instalações antrópicas. Nota-se que além da diminuição no tamanho geral dos lineamentos há uma inversão com relação ao lineamento mais extenso; dentre aqueles mapeados a partir dos dados SRTM o maior tem orientação NW e comprimento de 27,7 km enquanto que dentre os mapeados com dados CBERS-2/CCD o maior tem orientação NE e comprimento de 17,3 km.

7.2 Caracterização geomorfológica

Durante as várias etapas de trabalho foi possível confirmar a forte relação entre as unidades litoestratigráficas, a erosão e o comportamento do relevo. Os principais agentes erosivos modificadores da paisagem atuando nos tabuleiros costeiros e planície flúvio-marinha são o escoamento superficial, a desagregação mecânica e o intemperismo químico, enquanto que na zona litorânea ocorre ação intensa de ventos, ondas, correntes e variações de maré.

Os tabuleiros costeiros têm relevo plano a levemente ondulado formando uma geometria tabular com cotas altimétricas que variam de até 119 m na área do Domo de Mangue Seco. Esta unidade é composta por carbonatos da Formação Jandaíra, basaltos e lateritas da Formação Macau, arenitos e conglomerados da Formação Barreiras, conglomerados e arenitos dos Depósitos Aluvionares

Antigos e os sedimentos arenosos recentes situados às margens de canais de drenagem. A rede de drenagem superficial tem uma densidade fraca e influencia na disposição do relevo, uma vez que ocorrem vales encaixados com paredes íngremes ao longo dos canais fluviais, gerando ondulação no relevo. Nas áreas onde a Formação Jandaíra aflora o relevo é cárstico com ausência de rede de drenagem organizada e erosão superficial e com presença de feições de relevo geradas por dissolução. Segundo Xavier-Neto *et al.* (2008), a carstificação na Formação Jandaíra tem um controle estrutural, estando assim relacionada com a atuação de tensores tectônicos após sua deposição, ao final do Campaniano.

As rochas presentes na área oferecem maior resistência à erosão por escoamento superficial do que os sedimentos inconsolidados, uma vez que possuem cimento entre seus grãos, o que aumenta o

seu grau de coesão. As rochas com cimento carbonático são mais facilmente afetadas do que os arenitos que têm cimento silicoso e quanto maior a homogeneidade da rocha maior é sua resistência, uma vez que não possui elementos com solubilidade diferente. Outro fator que diminui a ação do escoamento superficial é a alta permeabilidade dos arenitos, calcários e basaltos presentes na superfície de tabuleiros costeiros. Os calcários são coerentes, pouco plásticos, homogêneos, e distinguem-se pela sua permeabilidade devido a presença de fissuramento e sua alta solubilidade, resistindo a erosão superficial, mas estando sujeitos à decomposição química. Os planos de descontinuidades, sejam sedimentares ou tectônicos, facilitam a desagregação mecânica, uma vez que permitem a percolação de fluidos que influenciam também na decomposição química.

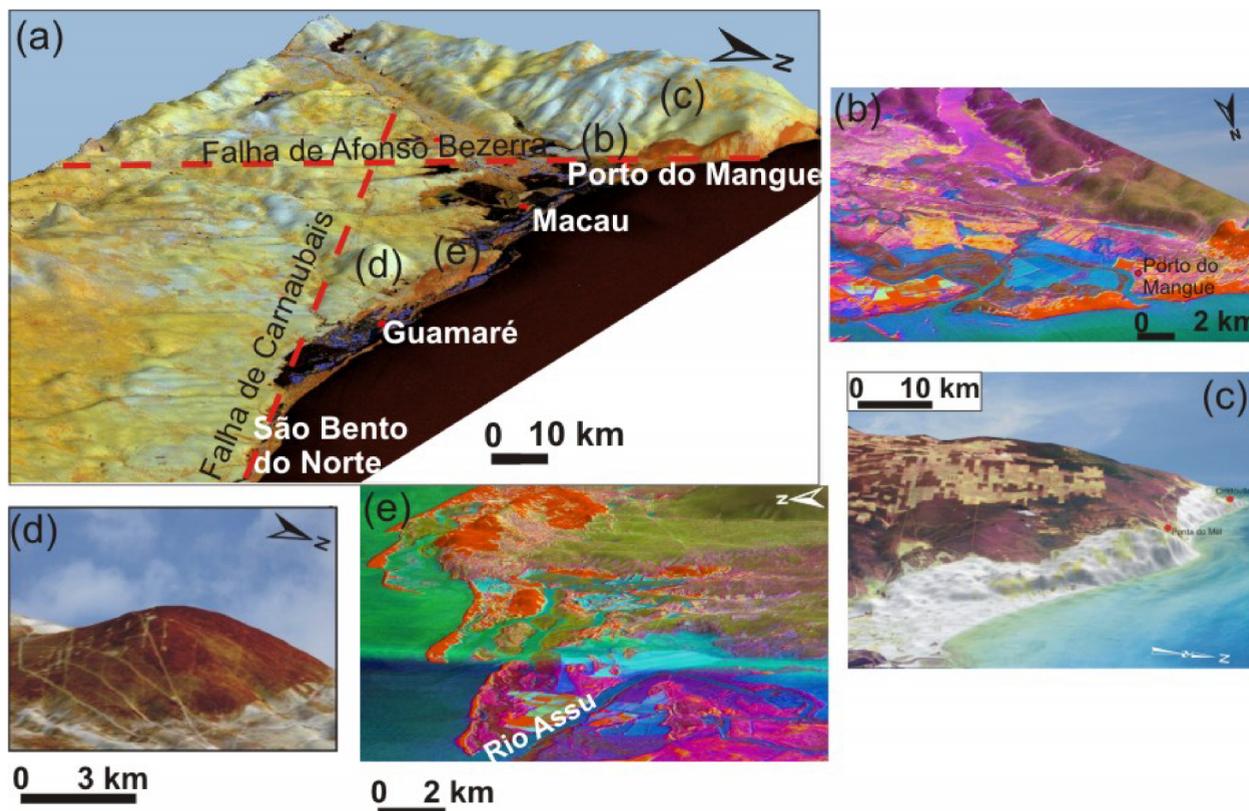


Figura 12 – Morfologia da superfície em modelos digitais 3D integrando SRTM e imagens multiespectrais.
Figure 12 – Surface morphology on 3D elevation models joining SRTM and multispectral data.

A planície flúvio-marinha corresponde às áreas inundáveis que recebem o volume de água acrescido durante momentos de transbordamento, seja por influência pluviométrica (Depósitos Aluvionares Recentes) ou por variação de maré (Depósitos Flúvio-Marinhos e de Manguê), e nela ficam depositados os sedimentos de granulação silte e argila. Após o transbordamento, não há energia suficiente para levar de volta os sedimentos de granulação grossa, antes transportados com a alta energia durante a enchente, gerando assim os depósitos de areias nas bordas dos canais, denominados de Depósitos Aluvionares Recentes de Canal. Esta unidade ocorre nas margens de canais fluviais de diferentes capacidades e competências e nas áreas sob influência das variações de maré, com relevo plano e baixas cotas altimétricas. Alguns autores preferem incluir os manguezais presentes na área como parte da planície flúvio-marinha, porém a presença da vegetação de manguê atribui características específicas (fauna e flora típicos) a este tipo de depósito. A cartografia deste ecossistema como unidade específica, aqui chamada de planície flúvio-marinha vegetada, é importante para o monitoramento ambiental realizado na área, uma vez que as áreas de manguê foram classificadas em estudos prévios como sendo de sensibilidade ambiental muito alta e contribuem de forma natural para a redução da erosão na costa. Na planície flúvio-marinha ocorre deposição de sedimentos argilosos de composição química homogênea a base de silicatos de alumina pouco solúveis, com alta plasticidade e baixa permeabilidade, fator que dificulta a infiltração e aumenta o escoamento superficial, atribuindo as argilas uma maior resistência à decomposição química em comparação com as areias inconsolidadas. Sendo assim, o material argiloso é sensível à erosão mecânica e não a química.

As dunas foram diferenciadas em fixas e móveis, apesar de ambos serem depósitos eólicos, as dunas fixas são cobertas por vegetação que impede sua migração, atribuindo às mesmas uma estabilidade e acúmulo de matéria orgânica derivada das plantas e formação de solo. Já as dunas móveis são compostas por areias inconsolidadas e estão em processo contínuo de migração.

8. CONCLUSÕES

A metodologia empregada permitiu ampliar o conhecimento dos aspectos morfológicos da região, utilizando produtos de sensoriamento remoto, distribuídos gratuitamente, para gerar de maneira rápida e eficiente uma base cartográfica georreferenciada que poderá ser acessada durante a evolução de estudos atualmente em andamento, aplicados à gestão costeira integrada. morfodinâmico.

Os dados de interferometria de radar SRTM permitiram a análise de parâmetros relevantes para o monitoramento ambiental da área, como altimetria, declividade e aspecto, uma vez que em casos de acidentes que ofereçam riscos ambientais, o conhecimento destes fatores influencia diretamente a eficiência das medidas mitigadoras.

A aplicação de técnicas de Análise por Principal Componente, razões de banda e filtragem espacial é importante, porém, a integração dos sombreados dos dados SRTM com combinações RGB das imagens Landsat e CBERS previamente submetidas a tais processamentos oferece um ganho relevante para a análise morfológica das unidades de paisagem, uma vez que integra os fatores relacionados ao relevo com o aspecto geológico das unidades realçadas pela análise multiespectral das imagens óticas. Da mesma forma, é relevante a integração dos dados óticos com a imagem Radarsat, realçando os limites entre as unidades de paisagem em produtos híbridos com 12,5 m de resolução, ampliando a escala de trabalho.

Os modelos 3D geralmente representam a topografia em escalas de cores distribuídas do menor ao maior valor altimétrico, porém a integração dos dados SRTM com composições RGB oferece uma maior eficiência para a caracterização geomorfológica e geológica da área, uma vez que a superfície representada em três dimensões apresenta o aspecto visual das imagens multiespectrais obtidas pelos sensores óticos orbitais.

A orientação da maioria dos lineamentos mapeados é paralela aos sistemas regionais de Falhas de Afonso Bezerra (NW) e Carnaubais (NE), cuja reativação holocênica vem influenciando o escoamento superficial e a sedimentação costeira proveniente do continente até os dias atuais. Esta influência é refletida na geomorfologia por intermédio da inclinação da faixa litorânea, disposição do padrão

de drenagem, alinhamento de encostas de vales e falésias costeiras, além dos *spits* e ilhas barreiras com orientações E-NW em seus segmentos mais alongados e NE nos mais curtos. Ao comparar os lineamentos mapeados a partir dos dados SRTM com aqueles mapeados com dados CBERS é possível notar uma diminuição no comprimento de uma maneira geral, porém nos dois mapas a maioria dos lineamentos mapeados é menor que 5 km, um grupo menor têm entre 5 e 10 km e poucos têm mais de 10 km. Alguns dos afloramentos que constam no banco de dados do Serviço Geológico do Brasil apresentam evidências de atividade tectônica frágil como falhas, juntas e processo de silicificação e a sua localização e direção dos planos de falha coincidiu com os lineamentos mapeados. Alguns lineamentos coincidem também com a cartografia prévia do arcabouço estrutural de sub-superfície como no caso do lineamento de 28 km que separa os tabuleiros costeiros da planície flúvio-marinha na porção oeste da área que corresponde a representação da Falha de Afonso Bezerra em mapas estruturais pré-existentes.

Os dados cartográficos gerados neste trabalho contribuem para a caracterização das diferentes unidades de paisagem e para estimar comportamentos futuros de determinadas feições do terreno diante do quadro de risco ambiental de derramamento de óleo, decorrente da intensa dinâmica costeira da região. Sendo, portanto, uma fonte de informações relevante para estudos de gestão costeira integrada, uma vez que fornecem alguns dos conhecimentos necessários para a determinação da melhor forma de intervenção antrópica no meio físico. Nascimento (2009) realizou um levantamento histórico sobre a interação entre a ocupação antrópica e os processos naturais na área. Esta autora concluiu que as intervenções do tipo *hard* realizadas em trechos deste litoral ocupados pela indústria petrolífera foram realizadas sem um estudo geoambiental prévio, resultando na ineficiência em conter a erosão.

É importante a continuidade de estudos que apliquem as metodologias utilizadas neste trabalho em escala de detalhe, permitindo assim a definição de áreas adequadas para ocupação com o nível de precisão exigido para a região.

BIBLIOGRAFIA

- Amaral, C.A.; Bezerra, F.H.R.; Amaro, V.E. (2000) - Evidências geológicas e morfotectônicas das falhas sísmicas de Samambaia e São Rafael, RN. *Simpósio de Geologia do Nordeste*, p.122, Editora Universitária UFPE, Recife, PE, Brasil.
- Angelim, L.A.A.; Nesi, J.R.; Torres, H.H.F.; Medeiros, V.C.; Santos, C.A.; Veiga Junior, J.P.; Mendes, V.A. (2006) - *Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte - Escala 1:500.000*. 119p., CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Recife, PE, Brasil. (disponível em http://www.cprm.gov.br/publique/media/rel_rio_grande_norte.pdf).
- Aquino, M.R.; Fonseca, V.P.; Lima, E.N.M.; Sousa, M.O.L.; Lima Filho, F.P.; Bezerra, F.H.R. (2006) - Geologia e análise morfotectônica da porção sul da Folha Macau, RN. *XLIII Congresso Brasileiro de Geologia, Anais*, p.291, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Aracaju, SE, Brasil.
- Bezerra, F.H.R. (2000) - Neotectonics in Northeastern Brazil: implications for a preliminary seismic-hazard assessment. *Revista Brasileira de Geociências*, 30:558-560. (ISSN/ISBN: 03757536).
- Bezerra, F.H.R.; Lima Filho, F.P.; Amaral, R.F.; Caldas, L.H.O.; Costa Neto, L.X. (1998) - Holocene coastal tectonics. In: Stewart, I.S. & Vita-Finzi, C. (eds.), *Coastal Tectonics*, pp.279-293, Geological Society, London, Special Publications, 146, Londres, U.K. (ISBN:186239024x).
- Bezerra, F.H.R.; Amaro, V.E.; Vitafinzi, C.; Saadi, A. (2001) - Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(1):61-75. ([http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00009-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00009-8))
- Bezerra, F.H.R.; Amaral, R.F.; Silva, F.O.; Sousa, M.O.L.; Fonseca, V.P.; Vieira, M.M.; Lima, E.N.M.; Aquino, M.R. (2006) - Folha Macau SB.24-X-D-II e SB.24-X-V. Escala 1:100.000. Contrato CPRM 069/PR/2005-UFRN. CPRM/FINEP/UFRN, Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Recife, PE, Brasil. Mapa disponível em <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>.
- Bezerra, F.H.R., Amaral, R.F., Silva, F.O., Sousa, M.O.L., Fonseca, V.P., Vieira, M.M., Lima, E.N.M., Aquino, M.R. (2006) - Folha Macau SB.24-X-D-II e SB.24-X-V. Escala 1:100.000. Contrato

- CPRM/069/PR/2005-UFRN. CPRM/FINEP/UFRN. Mapa disponível em <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>.
- Boulhosa, M.B.M.; Souza-Filho, P.W.M. (2009) - Reconhecimento e mapeamento dos ambientes costeiros para geração de mapas de ISA ao derramamento de óleo, Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27, supl. 1, pp.23-27. (ISSN 0102-261x. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2009000500003>).
- Caldas, L.H.O.; Dantas, E.P.; Castro, D.L.; Jardim de Sá, E.F. (1997) - Gravimetria e sensoriamento remoto aplicados na caracterização do lineamento de Afonso Bezerra e Sistema de Falhas de Carnaubais (RN). *XXVII Simpósio de Geologia do Nordeste, Anais*, p. 343-347, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Fortaleza, CE, Brasil.
- Chaves, M.S.; Vital, H.; Silveira, I.M. (2006) - Beach morphodynamics of the Serra oil field, northeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI39:594-597. (ISSN 0749-0208).
- Chavez Jr., P.S.; Berlin, G.L.; Bowel, J.A. (1982) - Statistical method for selecting Landsat MSS Ratios. *Journal of Applied Photogrammetry and Engineering*, 8(1):23-31. (ISSN: 0098-7298).
- Coriolano, A.C.F.; Jardim de Sá, E.F.; Amaro, V.E. (2000) - Integração de dados de sensoriamento remoto e geologia estrutural no estudo de aquíferos fraturados na porção leste do estado do Rio Grande do Norte. *XVIII Simpósio de Geologia do Nordeste*, Recife. Boletim 16:154-154, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Recife, PE, Brasil.
- Damascena, R.V.C.; Lima; E.M.; Vieira; M.M.; Bezerra, F.H.R. (2008) - Petrografia de rochas do Sistema de Falhas de Afonso Bezerra, Bacia Potiguar-RN: Dados preliminares. *44º Congresso Brasileiro de Geologia, Anais*, p. 954, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Curitiba, PR, Brasil.
- Dantas, A.R.; Sousa, M.O.L.; Bezerra, F.H.R. (2004) - Sensoriamento remoto e modelagem digital de terreno aplicados ao estudo do Sistema de Falhas de Afonso Bezerra, Bacia Potiguar, RN. *XLII Congresso Brasileiro de Geologia, Anais*, v.1:391-392, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Araxá, MG, Brasil.
- Pereira, B.R.B.; Amaro, V.E.; Valentim da Silva, D.R. (2009) - Métodos de fusão de imagens multisensores (óticos e radar) na melhoria do mapeamento de unidades de uso e ocupação do solo na região de Macau e Porto do Mangue, Estado do Rio Grande do Norte. *XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais*. p. 7055-7062, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Natal, RN, Brasil (ISBN: 9788517000447)
- Fonseca, V.P. (1996) - *Estudos Morfo-tectônicos na área do baixo curso do Rio Assu-Assu (Assu-Assu-Macau) Rio Grande do Norte*. 103p., Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil. (Não Publicado).
- Fonseca, V.P. (2006) - *Estudos morfotectônicos aplicados à Planície Costeira do Rio Grande do Sul e adjacências*. Tese de doutorado, 324p., Programa de Pós-graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (Não Publicado). Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/6173>.
- Inman, D.L.; Nordstrom, C.E. (1971) - On the tectonic and morphologic classification of coasts. *Journal of Geology*, 79: 121. (<http://dx.doi.org/10.1086/627583>).
- Moura-Lima, E.N.; Sousa, M.O.L.; Aquino, M.R.; Bezerra, F.H.R. (2005) - Paleotensões na região de Felipe Guerra-RN, Bacia Potiguar. *XXI Simpósio de Geologia do Nordeste*, Boletim v. 19, 292-295, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Recife, PE, Brasil.
- Nascimento, M.C. (2009) *A erosão costeira e sua influência sobre a atividade petrolífera: alternativas sustentáveis na mitigação de impactos ambientais*. 229p, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal, RN, Brasil. (Não Publicado). Disponível em http://bdt.d.bczm.ufrn.br/tesesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=3388 e http://bdt.d.bczm.ufrn.br/tesesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=3389
- Nimer, E. (1989) - *Climatologia do Brasil*. 421p., IBGE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. (ISBN: 8524002824).
- Nogueira, F.C.; Bezerra, F.H.; Silva, A.M.; Castro, D.L.; Sousa, M.O.; Ferreira, J.M.; Nascimento, A.F. (2008) - Evidências de reativação cosísmica de estruturas da crosta superior em regime intraplaca: A Falha de Samambaia, Nordeste do Brasil.

- 44° Congresso Brasileiro de Geologia, Anais, p.251, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Curitiba, PR, Brasil.
- Noyola-Medrano, M.C.; Hinojosa-Corona, A.; Martin-Barajas, A. (2005). - Caracterización litológica de regiones desérticas mediante técnicas de percepción remota: Un ejemplo en la franja costera central de Baja California, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2):229-245. (ISSN: 1026-8774) (disponível em [http://rmcg.unam.mx/22-2/\(7\)Noyola.pdf](http://rmcg.unam.mx/22-2/(7)Noyola.pdf)).
- Neto, O.C. Pessoa; Soares, U.M.; Silva, J.G.F.; Roesner, E.H.; Florêncio, C.P.; Souza, C.A.V., (2007) - Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2):357-369, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. (ISSN: 0102-9304).
- Prates, M.; Gatto, L.C.S.; Costa, M.I.P. (1981) - Geomorfologia. In: *Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais*. Volume 23, 744p., folhas SB.24/25 Jaguaribe, Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Rocha, A.K.R.; Vital, H.; Gomes, M.P.; Rocha, G.R. (2009) - Bedforms characterization of the AssuAssu Estuary (NE Brazil). *Journal of Coastal Research*, SI56:1410-1413. (ISSN: 0749-0258).
- Silva, C.G.; Patchineelam, S.M.; Baptista Neto, J.A.; Ponzi, V.R.A. (2004) - Ambientes de sedimentação costeira e processos morfodinâmicos atuantes na linha de costa. In: Baptista Neto, J.A., Ponzi, V.R.A. & Sichel, S.E. (eds.), *Introdução à geologia marinha*, p.175-218, Interciência, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. (ISBN: 8571930988).
- Silveira, I.M.; Vital, H.; Amaro, V.E.; Grigio, A.M. (2003) - Carta de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo para a Área entre Gamaré e Macau. In: *2° Congresso Brasileiro de Pesquisa & Desenvolvimento em Petróleo e Gás*, Anais (CD-ROM), Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás (ABPG). Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Souto, M.V.S.; Castro, A.F.; Grigio, A.M.; Amaro, V.E.; Vital, H. (2006) - Multitemporal analysis of geoenvironmental elements of the coastal dynamics of the region of the Ponta do Tubarão, City of Macau/RN, on the basis of remote sensing products and integration in GIS. *Journal of Coastal Research*, SI39:1618-1621. (ISSN: 0749-0208).
- Souza, A.S.; Amaro, V.E.; Duarte, C.R. (2009) - Aplicação de técnicas de geoprocessamento na caracterização da pluma de sedimentos em suspensão na foz do Rio Piranhas/AssuAssu, Macau/RN. *XXIII Simpósio de Geologia do Nordeste, Anais*. p. 258. Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Natal, RN, Brasil.
- Srivastava, N.K.; Corsino, S.R. (1984) - Os carbonatos de Touros: petrografia e estratigrafia. *SBG - Simpósio de Geologia do Nordeste, Atas*, p. 165-176. Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Natal, RN, Brasil.
- Vital, H. (2009) - The mesotidal barriers of Rio Grande do Norte. In: Dillemburg, S. & Hesp, P. (eds.), *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*, p.289-324, Springer-Verlag, Heidelberg, Alemanha. (ISBN:9783540250081).
- Xavier-Neto, P.; Bezerra, F.H.R.; Nascimento, C.C.; Cruz, J.B. (2008) - O condicionamento estrutural do Carste Jandaíra e da espeleogênese associada pela tectônica pós-campaniana da Bacia Potiguar. *44° Congresso Brasileiro de Geologia, Anais*, p.998, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Curitiba, PR, Brasil.