

IMAGENS SRTM APLICADAS À ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MORFOTECTÔNICO DA PAISAGEM, COMO AUXÍLIO AO MONITORAMENTO AMBIENTAL NO LITORAL SETENTRIONAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Dalton Rosemberg Valentim da Silva^{1,2} (PRH22-ANP, DG-UFRN), Venerando Eustáquio Amaro^{1,2} (DG, PPGG-UFRN), Michael Vandesteem Silva Souto^{1,3} (PRH22-ANP, PPGG-UFRN), Bruno Rafael de Barros Pereira² (DG-UFRN), Dário Saldanha de Souza² (DG-UFRN), Arnóbio Silva de Souza² (DG-UFRN),

¹ PRH22-ANP-UFRN

²DG – Departamento de Geologia

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Caixa Postal: 1584. CEP: 59078-970. Natal/RN, Brasil.

daltonrosemberg@yahoo.com.br

³ PPGG - Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Caixa Postal: 1639. CEP: 59078-970. Natal/RN, Brasil.

Resumo: A demanda por fontes energéticas tem intensificado as atividades da indústria de hidrocarbonetos e os riscos de derramamento de óleo no litoral setentrional do Rio Grande do Norte, tornando necessário o monitoramento ambiental utilizando técnicas de sensoriamento remoto e modelagem ambiental. A área de estudo, compreendida entre os municípios de Guamaré e Porto do Mangue, está inserida no contexto geológico da Bacia Potiguar e apresenta ambientes com alto índice de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo. As principais unidades geoambientais da área são as dunas móveis e fixas, tabuleiro costeiro, lagoas, zona de estirâncio, planícies de maré e flúvio-estuarina em parte recobertas por manguezais. Estas unidades estão ocupadas pelas atividades das indústrias petrolífera, salineira e de carcinicultura, além da agricultura e pesca. O objetivo deste trabalho é analisar a relação entre os fatores morfotectônicos e a paisagem dos ecossistemas costeiros utilizando imagens da SRTM – *Shuttle Radar Topographic Mission* de Fevereiro de 2000. A interferometria de radar utilizada na imagem permitiu a extração de informações altimétricas e de declividade, bem como o mapeamento da rede de drenagens e dos lineamentos topográficos de maior magnitude presentes na área. O mapeamento dos lineamentos foi feito com base na interpretação de modelos de sombreamento. Observa-se uma forte relação entre a rede de drenagem e as variações morfológicas expressas pelos lineamentos. Foi possível constatar que a localização de alguns campos de exploração petrolífera coincide com lineamentos identificados nos dados SRTM. Ao comparar estes lineamentos com dados pré-existentes na literatura da área é possível inferir que os mesmos coincidem com as duas grandes estruturas geológicas regionais, o Sistema de Falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais que podem agir como armadilhas estruturais para os hidrocarbonetos, além de influenciarem na compartimentação morfotectônica da área. A integração dos dados altimétricos, de declividade, relevo e o aspecto visual de imagens Landsat 7 ETM+ mostram a presença da feição dômica conhecida como Domo de Mangue Seco, onde ocorre uma concentração de poços de petróleo. Os dados de interferometria de radar do SRTM revelam novas feições que contribuem com o mapeamento da vulnerabilidade ambiental dos ecossistemas costeiros e também com a determinação de índices de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo. Trata-se, portanto, de informação relevante na elaboração de uma base cartográfica eficaz a ser consultada no plano de contingência em casos acidentais de derramamento de óleo, facilitando a proteção dos ambientes mais sensíveis e vulneráveis e também servindo para o planejamento da instalação de novas áreas de exploração. É importante entender a evolução morfodinâmica da zona costeira em escala temporal para que áreas industriais não sejam instaladas em locais inadequados e para prever o comportamento futuro de determinadas feições do terreno.

Palavras-chaves: 1. monitoramento ambiental, 2. interferometria de radar, 3. evolução morfodinâmica, 4. vulnerabilidade ambiental, 5. plano de contingência.

1. INTRODUÇÃO

As instalações *onshore* da indústria de hidrocarbonetos no Estado do Rio Grande do Norte concentram-se no litoral setentrional, entre os municípios de Areia Branca e São Bento do Norte (Figura 1). A área está inserida no contexto geológico da Bacia Potiguar (Araripe & Feijó 1994) e caracteriza-se pela alta sensibilidade ambiental (Souto 2004), por uma acentuada instabilidade morfológica ocasionada pela intensa ação de processos costeiros e por forte influência de atividades antrópicas (indústrias petrolífera, salineira e de carcinicultura), além de outras atividades socioeconômicas realizadas pela população local, como a pesca e atividades portuárias.

O principal objetivo deste trabalho é a integração de imagens de radar SRTM - *Shuttle Radar Topographic Mission* com imagens do satélite Landsat 7 ETM+ para obtenção de informações geoambientais, geomorfológicas (relevo, drenagens, lineamentos, declividade) e altimétricas, como base para identificar correlações entre estes elementos morfotectônicos e as modificações na paisagem litorânea ao longo do tempo. Tal análise é importante na compreensão do comportamento morfodinâmico da região e sua influência nas áreas de exploração petrolífera, além de subsidiar a elaboração de planos de contingência de danos causados por eventual derramamento de óleo na zona costeira.

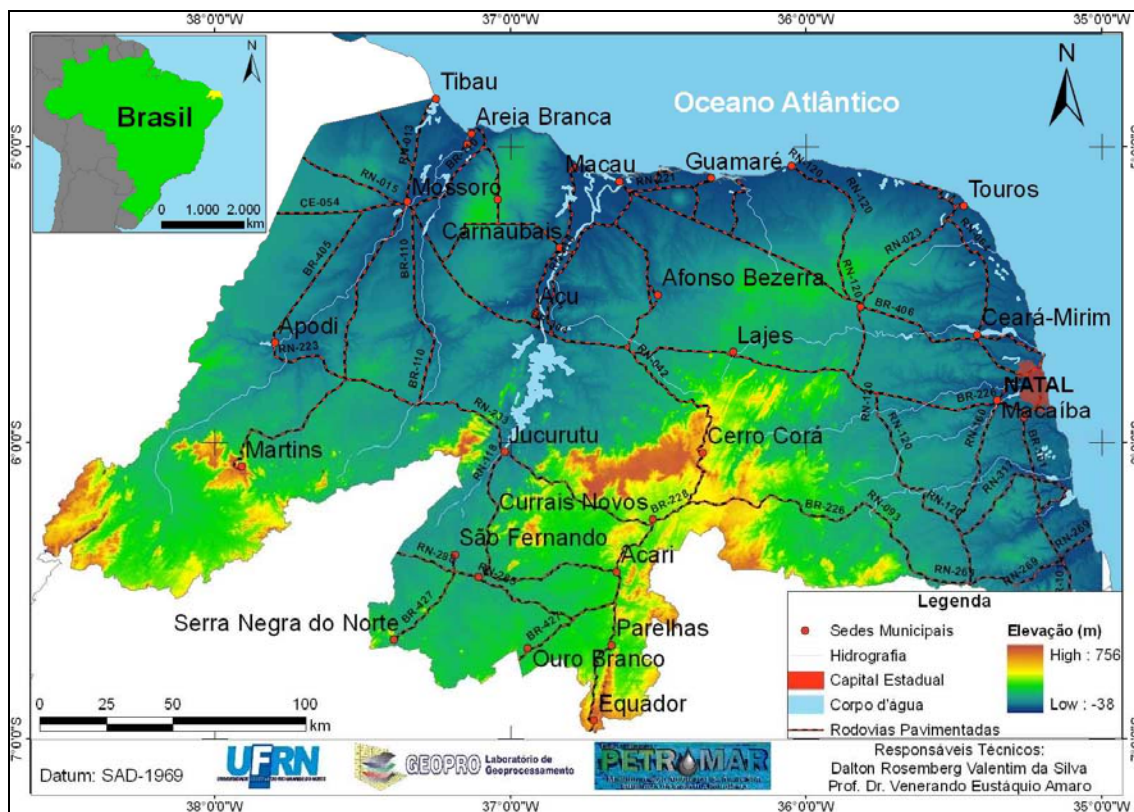


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo no Estado do Rio Grande do Norte, mostrando os dados planimétricos (IBGE e SUDENE) combinados aos dados altimétricos do SRTM.

2. Síntese da Revisão Bibliográfica

Na área de estudo ocorrem duas grandes estruturas frágeis regionais, o Sistema de Falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais (Figura 2), que sofreram reativação configurando o principal evento tectônico na Bacia Potiguar durante o Cenozóico. Com a intenção de entender o comportamento dessas estruturas e sua importância para a compartimentação morfológica da área foram desenvolvidos diversos estudos ao longo dos anos.

Costa Neto (1985), estudando a região de Macau-RN, concluiu que a evolução cenozóica desta área está intimamente relacionada com as reativações de falhas NW. Com os abalos sísmicos de 1986 na região de João Câmara-RN, se intensificaram os estudos em neotectônica na área comprovando que os eventos tectônicos estão atuantes até o recente. Torres (1994) reconheceu estruturas dos esforços deformacionais recentes em unidades terciárias e quaternárias, influenciando assim o contexto morfotectônico regional.

Caldas (1996) argumentou a existência de uma relação entre a geometria do litoral setentrional entre Caiçara do Norte e São Bento do Norte com a orientação do Sistema de Falhas de Carnaubais. Fonseca (1996) afirma que o par conjugado definido pelas Falhas de Afonso Bezerra e de Carnaubais gerou uma compartimentação entre a Ponta do Mel e a Ponta dos Três Irmãos (Figura 2), reativando parte da estruturação pré-existente e modelando a superfície regional atual, além de influir na evolução e processos de sedimentação costeira.

Souto (2004) constatou na análise multitemporal da linha de costa para dez datas distintas entre 1988 e 2003, a contínua progradação da barra arenosa da Ilha Barreira da Ponta do Tubarão para WSW e dos esporões arenosos das barras do Fernandes e Corta Cachorro no sentido preferencial para W.

Moura (2004) relacionou as reativações tectônicas pós-campanianas e meso-estruturas rasas mapeadas com os campos de paleotensões e analisou a influência do Sistema de Falhas de Carnaubais na geomorfologia da borda da Chapada do Apodi e em anomalias e trechos defletidos para direção NE observados no curso do Rio Apodi, na Região de Felipe Guerra-RN.

Dantas (2004) utilizou técnicas de sensoriamento remoto e modelagem digital de terreno para reconhecer lineamentos NW na porção central e SE da Falha de Afonso Bezerra e concluiu que regiões de altos topográficos são alinhadas paralelamente a vales de drenagens e as bordas das lagoas de Queimados, da Pedra e Vargem de Cima são controladas tectonicamente pela falha.

Os dados obtidos pela SRTM foram utilizados por Aquino (2006) na análise morfotectônica da região de Carnaubais-RN, gerando modelos tridimensionais do terreno e modelos de sombreado que ajudaram a constatar que os lineamentos e os alinhamentos de drenagem seguem os mesmos padrões verificados para as juntas distensionais de maior representatividade na área. Apresentando orientações NE e NW predominantes, além de orientações EW e NS subordinadas. A observação dos Modelos Digitais do Terreno permitiu a visualização do controle estrutural sobre as feições de relevo e de drenagens presentes na área: alinhamentos e junções bruscas de drenagens e alinhamentos de corpos rochosos.

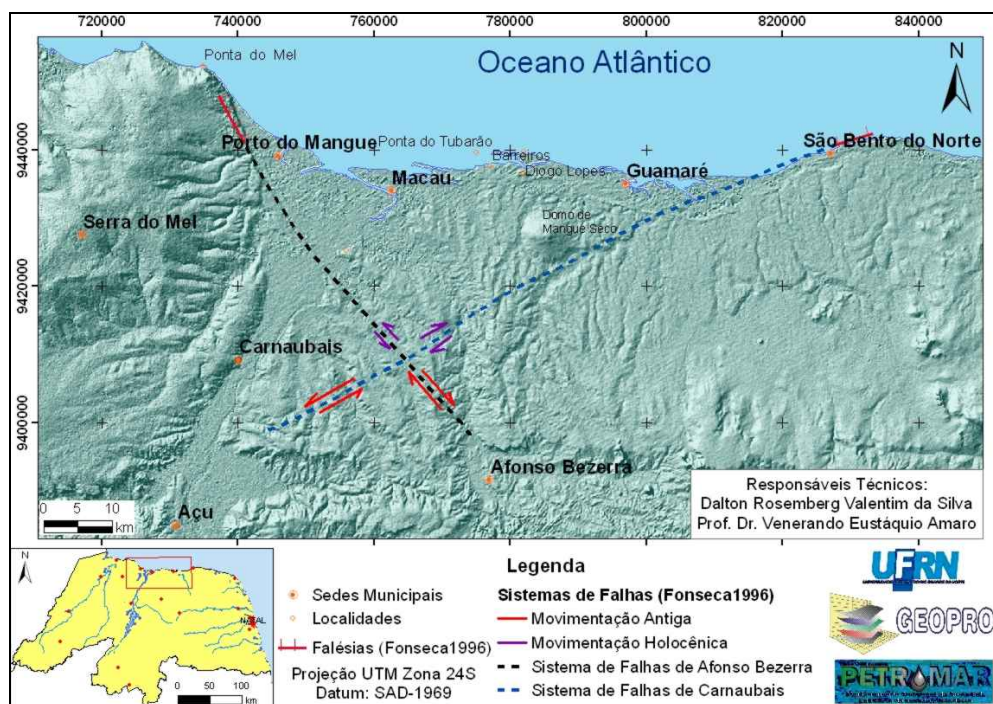


Figura 2 – Compartimentação do litoral setentrional (Fonseca 1996) e Sistemas de Falha de Afonso Bezerra (*trend* NW) e Carnaubais (*trend* NE) dispostos sobre sombreado dos dados SRTM.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada pode ser dividida nas seguintes etapas:

3.1 Revisão Bibliográfica

Pesquisa sobre o contexto morfotectônico do litoral setentrional e sua influência nos processos costeiros atuais, além de levantamento dos dados cartográficos e de sensoriamento remoto (imagens ópticas e de radar) disponíveis no GEOPRO – Laboratório de Geoprocessamento e catálogos *online* (INPE, IBGE, USGS, etc.).

3.2 Pré-Processamento das Imagens Digitais

O pré-processamento consistiu no georreferenciamento das imagens na Projeção UTM Zona 24S e *Datum* SAD-1969. No caso da imagem SRTM foi realizada uma correção de ruídos (Valentim *et al.* 2006) além de extrair da imagem a porção *offshore* da área que não fornecia informações passíveis de validação.

3.3 Processamento das Imagens Digitais

As imagens ópticas do satélite LANDSAT 7 ETM+ foram submetidas a técnicas de combinação entre bandas espectrais e realce de contraste por equalização do histograma além de razão de bandas e de transformações por principais componentes (Figura 3) através do método padrão e do método seletivo. (Noyola-Medrano *et al.* 2005). O processamento foi realizado com base na análise de dados estatísticos relacionados aos aspectos espectrais da imagem.

A imagem SRTM foi processada para gerar modelo digital de elevação, modelo de sombreamento, simulando a direção e ângulo de incidência da fonte de iluminação, e modelos tridimensionais representando a superfície terrestre. As informações espectrais das imagens ópticas foram integradas às informações espaciais obtidas pela SRTM, gerando produtos híbridos bidimensionais e tridimensionais que permitem uma melhor análise morfológica da área.

3.4 Mapeamento de Lineamentos e Drenagens

Esta etapa consistiu na vetorização dos lineamentos marcados na variação do relevo no terreno e da rede de drenagens na região entre Porto do Mangue e São Bento do Norte, a partir de modelos de sombreamento criados sobre a imagem SRTM.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia adotada permitiu a obtenção dos seguintes resultados:

4.1 Combinações RGB e Unidades de Paisagem

As combinações entre bandas espectrais no sistema de falsa cor RGB facilitam a identificação e interpretação das diferentes unidades de paisagem presentes na região, bem como a identificação de estruturas submersas que não poderiam ser observadas na imagem de RADAR e tiveram suas formas realçadas devido às técnicas de processamento aplicadas sobre as imagens ópticas (Figura 3).

A composição **R-G-B PC1-PC3-PC2** da imagem Landsat 7 ETM+ de 11/06/2002 (Figura 3), mostrou na porção *onshore* as formas de vegetação (caatinga e manguezal) em tons esverdeados, as áreas ocupadas pela indústria salineira em tons azulados, e campos de dunas e zonas de estirâncio em rosa e branco. Canais de maré e estuarinos foram destacados de maneira que níveis de profundidade podem ser estimados.

Na porção *offshore* o processamento da imagem permitiu o realce de informações submersas como as linhas de *beachrocks* submersos subparalelos a linha de costa atual e o cânion submarino em continuidade geométrica ao Rio Açu. Além disso, foi possível perceber um gradiente nas tonalidades de azul, tornado-se mais escuro na medida em que se afasta da costa até a quebra abrupta da plataforma, uma indicação das variações na profundidade. A imagem ressaltou os sedimentos em suspensão nas proximidades da costa, transportados pela corrente de deriva litorânea, as *sandwaves* submersas de diferentes orientações preferenciais.

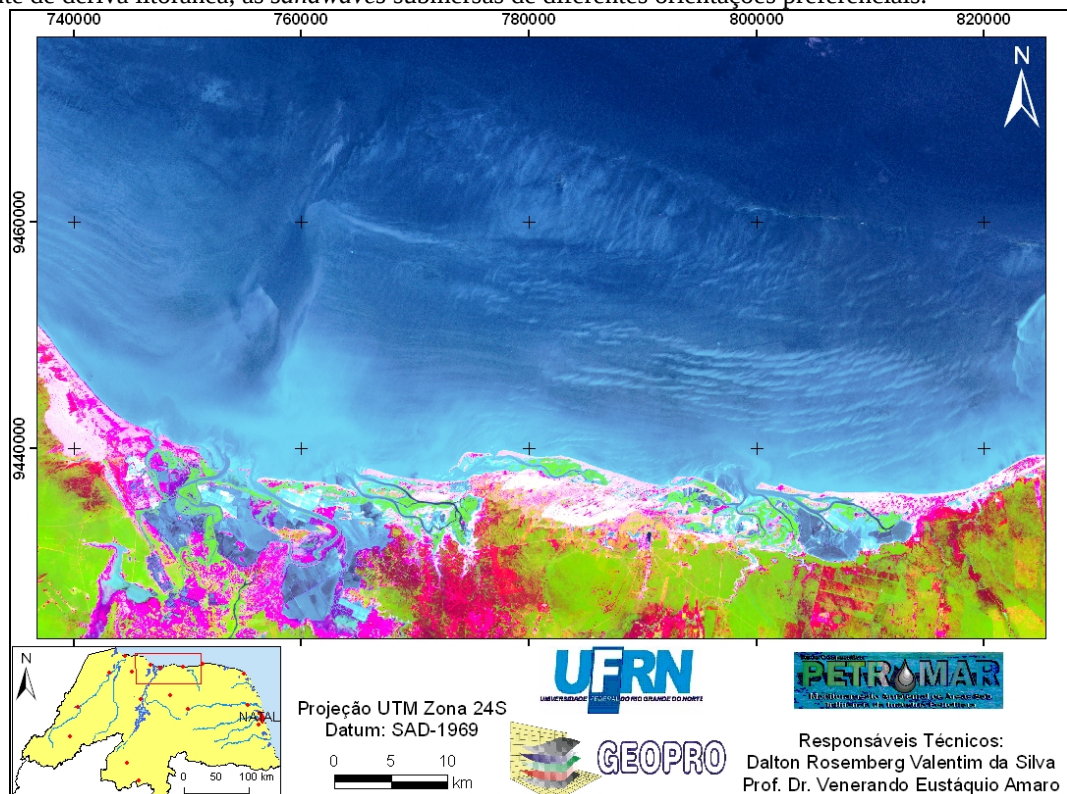


Figura 3 – Composição R-G-B PC1-PC3-PC2, destacando as unidades de paisagem no ambiente litorâneo e realçando feições submersas na porção *offshore*.

4.2 Modelos Tridimensionais da Superfície

Os dados SRTM forneceram informações altimétricas que puderam ser melhor analisadas após integração com informações ópticas das composições RGB.

A Figura 4 mostra um modelo digital do terreno integrando dados SRTM com uma composição RGB 751 realizada sobre uma Imagem LANDSAT 7 ETM+ de 11/08/2001. Este tipo de produto híbrido auxilia a compreensão do comportamento de feições morfológicas no litoral setentrional do Rio Grande do Norte. Observa-se que as unidades planície de maré, planície de inundação fluvio-estuarina (coloração escura azulada e lilás) e a zona de estirâncio mostram relevos planos à suavemente inclinados, poucos metros acima do nível médio das águas fluviais e/ou estuarinas. Juntamente com o ecossistema de manguezais ocorrem no intervalo altimétrico de 0 a 4 metros. As dunas móveis e fixas (coloração esbranquiçada) podem apresentar até 5 metros de altitude com relevo ondulado. A superfície de tabuleiros costeiros (coloração esverdeada) ocorre em intervalos altimétricos de 7 a 75 metros, sendo os valores mais altos correspondentes a Serra do Mel (a oeste) e ao Domo de Mangue Seco (a leste).

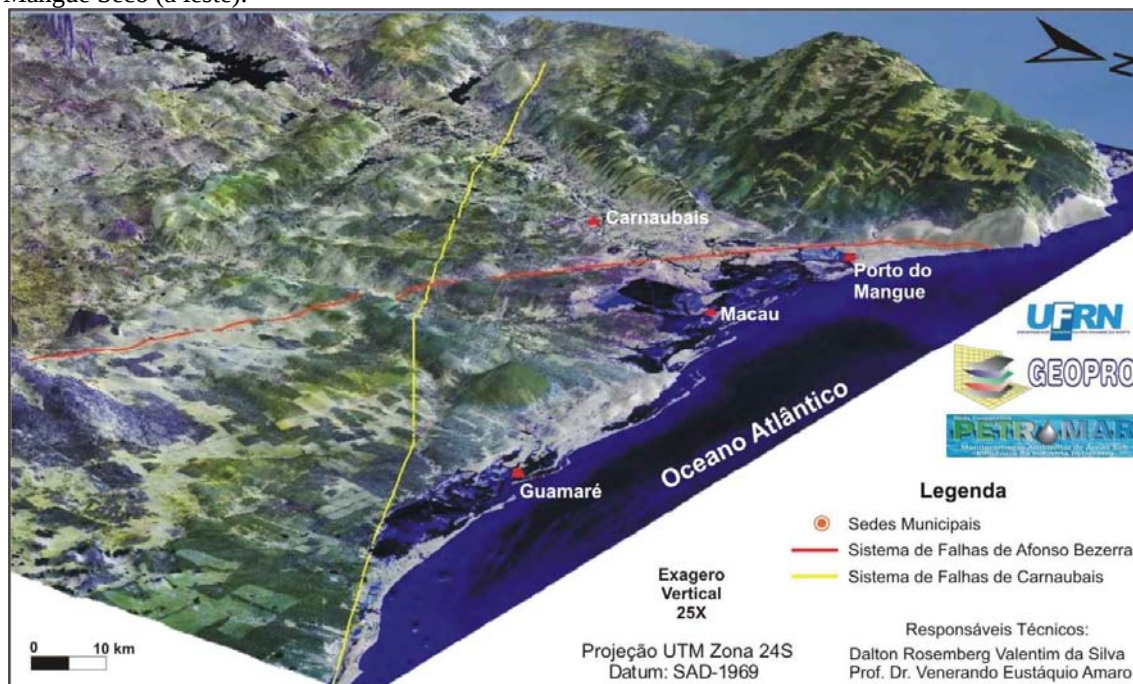


Figura 4 – Modelo digital de terreno integrando dados espaciais (SRTM) e espectrais (Landsat 7 ETM+) para definição 3D dos aspectos geomorfológicos da área de estudo.

4.3 Modelos de Sombreamento e Lineamentos

Este tipo de modelo permite a simulação da direção e ângulo de incidência da iluminação de acordo com as orientações preferenciais dos elementos estruturais do terreno. O uso de aspectos de sombreado na análise da superfície foi possível graças à interferometria de radar utilizada pelo SRTM que permite gerar o modelo digital de elevação – MDE para 80% da superfície terrestre (Rabus *et al.* 2003).

Neste trabalho foram gerados modelos de sombreado (Figura 5) com as direções 0°Az./45°El., 45°Az./45°El., 90°Az./45°El., 270°Az./45°El. e 315°Az./45°El. A interpretação de alguns modelos foi dificultada pela presença de ruídos inerentes à imagem SRTM. Lineamentos topográficos com direção preferencial NW, subparalelos ao Sistema de Falhas de Afonso Bezerra são os mais proeminentes, sendo seguidos por aqueles com direção NE subparalelos ao Sistema de Falhas de Carnaubais. lineamentos NS e EW foram também identificados em menores quantidades (Figura 6).

4.4 Rede Hidrográfica

O comportamento de um sistema de drenagem está intimamente relacionado com aspectos topográficos, geomorfológicos e elementos morfotectônicos. O conhecimento destes aspectos e do sistema de drenagens em si é importante no planejamento de medidas mitigadoras em casos de derramamento acidental de óleo, visto que a declividade e demais aspectos de relevo influenciam no escoamento dos fluídos e são controlados pelo tectonismo atuante na área.

O mapeamento da rede hidrográfica foi realizado com base nos dados SRTM e também nas composições RGB de imagem LANDSAT para a região estuarina. A Figura 7 mostra a rede hidrográfica da área em três dimensões e sua relação com os *trends* regionais das falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais.

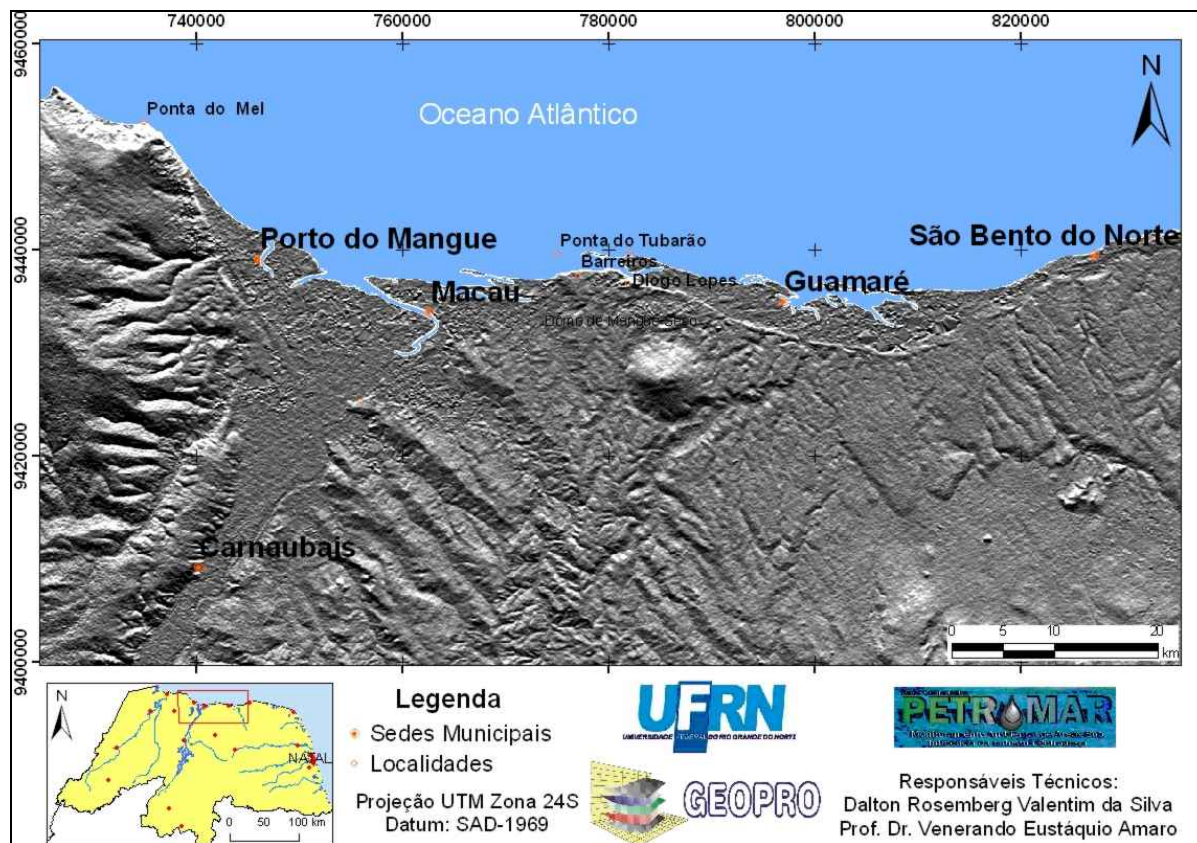


Figura 5 – Modelo de sombreamento com direção 0°Az./45°El. realçando feições lineares na superfície.

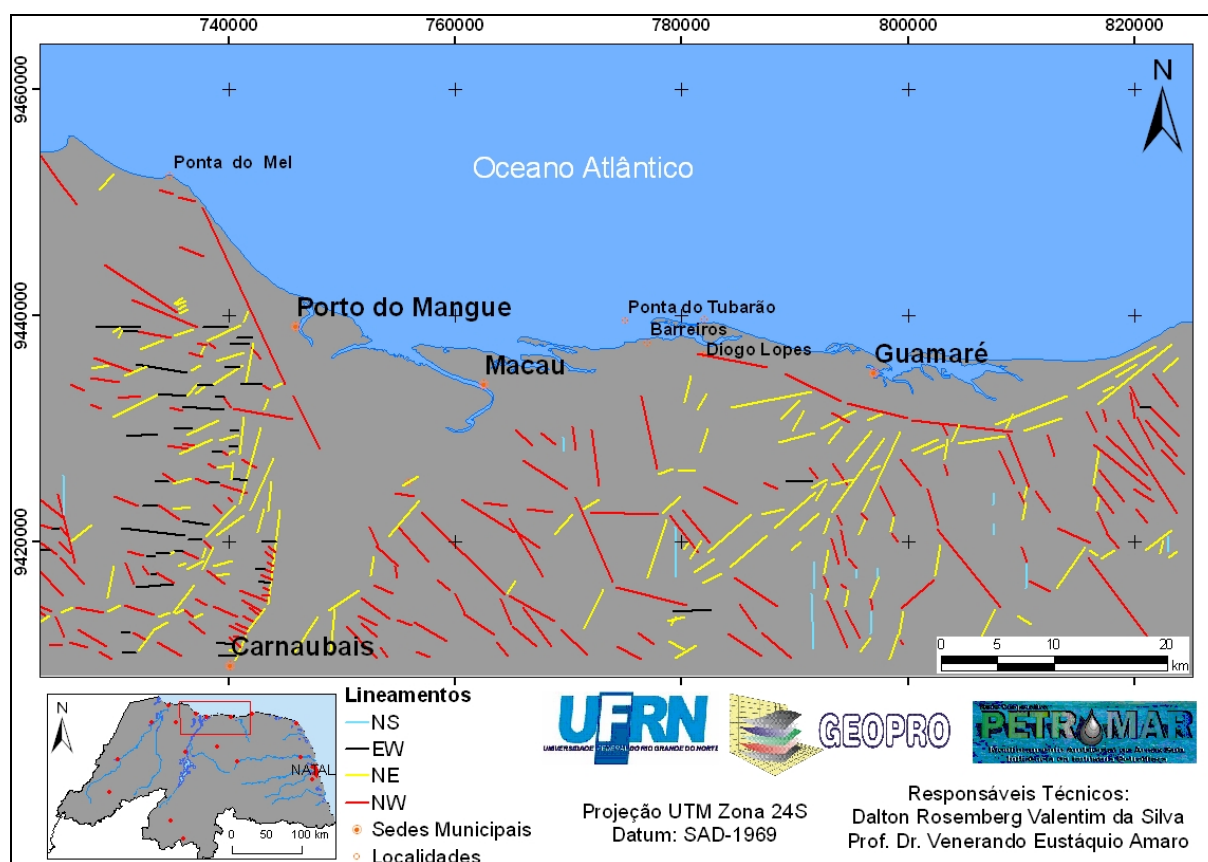


Figura 6 – Lineamentos topográficos mapeados a partir dos modelos de sombreamento.

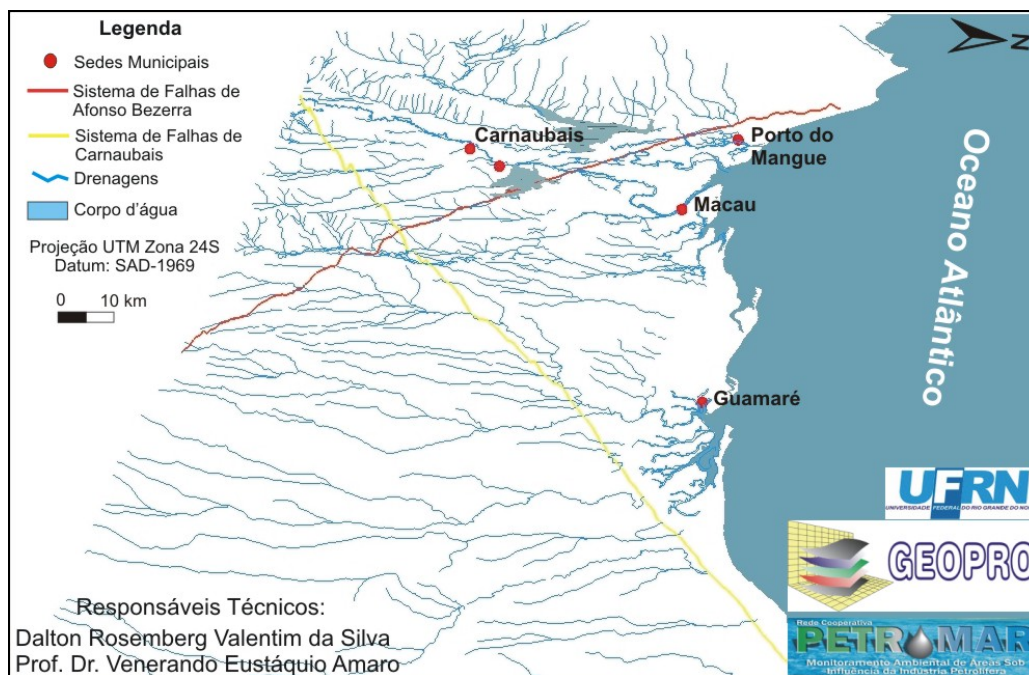


Figura 7 – Modelo digital de elevação apresentando a rede hidrográfica da área e sua relação com os *trends* das estruturas regionais.

5. CONCLUSÃO

O uso de dados SRTM para obter informações sobre os elementos morfológicos da superfície é de relevante importância na caracterização morfodinâmica de áreas litorâneas onde se localizam as instalações da indústria petrolífera. As informações obtidas com esta metodologia podem ser somadas às diversas variáveis consideradas no estudo de sensibilidade e vulnerabilidade ambiental, colaborando com planos de contingência em casos de derramamento acidental de óleo.

Os lineamentos mapeados são subparalelos aos *trends* regionais dos Sistemas de Falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais. Estes sistemas de falhas sofreram reativação tectônica no Cenozóico, com cinemática oposta à movimentação antiga.

A comparação entre os *trends* gerais dos lineamentos identificados e da rede hidrográfica mostrou que a deformação frágil exerce controle sobre o curso das drenagens (direção e inflexões). Portanto, influencia no sistema de escoamento superficial da área. Este controle estrutural é observado inclusive na orientação de canais estuarinos e de maré entre São Bento do Norte e Porto do Mangue-RN.

Esta compreensão sobre a evolução morfodinâmica da zona costeira no tempo e todos os fatores (tectônicos, hidrodinâmicos e antrópicos) que influenciam na sua morfologia, é importante para que áreas industriais não sejam instaladas em locais inadequados e na prevenção de comportamentos futuros de determinadas feições do terreno diante do quadro de risco ambiental decorrente da intensa dinâmica costeira da região.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração da Agência Nacional do Petróleo – ANP, do CNPq e da Rede Norte-Nordeste de “Monitoramento Ambiental de Áreas sob Influência da Indústria Petrolífera” (Rede PETROMAR – CTPETRO-FINEP-PETROBRAS-CNPq) por meio do Projeto Cooperativo “Monitoramento de Áreas de Risco ao Derramamento do Petróleo – Continuidade” (Projeto PETRORISCO, CTPETRO-FINEP-PETROBRAS-CNPq) que têm como executor o Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - PPGG/UFRN e coordenação do Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro.

7. REFERÊNCIAS

- AQUINO, M.R., 2006. **Mapeamento Geológico, Análise Morfotectônica e Estrutural da Região de Carnaubais – Bacia Potiguar**. Monografia de Graduação, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- ARARIPE, P.T.; FEIJÓ, F.J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**, 8(1):127-141. 1994.
- CALDAS, L.H. de O. 1996. Geologia costeira da Região de São Bento do Norte e Caiçara, litoral norte Potiguar. Departamento de Geologia da UFRN, Natal, Relatório de Graduação, 82p.

- COSTA NETO, L.X. 1985. **Geologia da Área entre Macauzinho e Boa Vista - Sul de Macau - RN**. 145 p. Relatório de Graduação, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN. 82p.
- DANTAS, A.R. 2004. **Mapeamento estrutural da porção central e sudeste da Falha de Afonso Bezerra, Bacia Potiguar/RN**. Relatório de Graduação, Departamento de Geologia, UFRN, Natal/RN. 112p.
- FONSECA, V.P. 1996. **Estudos Morfo-tectônicos na área do baixo curso do Rio Açu (Açu-Macau) – Rio Grande do Norte**. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 103 p.
- MOURA, E.N. 2004. **Mapeamento Estrutural na Região de Felipe Guerra - RN, Bacia Potiguar**. Monografia de Graduação, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN. 80p.
- 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**, v. 22, num 2, 2005, p. 229-245.
- SOUTO, M.V.S. 2004. **Análise multitemporal dos elementos geoambientais da Planície estuarina de Região da Ponta do Tubarão, área de influência dos campos petrolíferos de Macau e Serra, Município de Macau, RN**. 2004. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.
- TORRES, H.H.F., 1994. Metodologia para estudos neotectônicos regionais, o caso de João Câmara. **Série Publicações Especiais da CPRM**. V2. p. 7-45.
- VALENTIM DA SILVA, D.R.; AMARO, V.E.; GOMES, M. P.; SOUZA, A.S.; FERREIRA, A. T.S.; SOUTO, M.V.S., 2006. Modelagem digital de terreno em áreas *onshore* e *offshore* da Bacia Potiguar, entre Galinhos e Porto do Mangue no litoral setentrional do Rio Grande do Norte. In: **Workshop final da primeira fase da rede cooperativa norte-nordeste em monitoramento ambiental de áreas sob a influência da indústria petrolífera (REDE PETROMAR, CTPETRO - FINEP/PETROBRAS/CNPQ)**, Natal/RN. 2006.

SRTM IMAGES APPLIED TO THE ANALYSES OF LANDSCAPE'S MORPHOTECTONIC BEHAVIOR, AIDING THE ENVIRONMENTAL MONITORING ON NORTHERN COAST OF RIO GRANDE DO NORTE

The request for energetic resources caused the constant growing of hydrocarbon industry activities and the risk of oil spill in Rio Grande do Norte coast, bringing the necessity of an environmental monitoring using remote sensing and environmental modeling techniques. The study area, located between Guamaré and Porto do Mangue counties, it's inserted on the geological context of Potiguar Basin with a high environmental sensitivity and influence of coastal process. The main geoenvironmental unities are mobile and fixed dunes, coastal plains, tidal flats, fluvial-estuarine flood plain partially covered by mangroves, lagoons and beaches. Oil and salt industries and shrimp farms occupy these unities. This work aims the analysis of relations between morphotectonic factors and landscape of coastal ecosystems using SRTM data from February of 2000. The radar interferometry allowed the extraction of elevation, as well as the mapping of lineaments and drainage on surface. The mapping of lineaments on surface was possible due to the interpretation of hillshade models with different illumination directions, allowing a geomorphological analysis that shows a strong relation between the drainage patterns orientation and the mapped lineaments. The location of some oil fields is similar to the orientation of some lineaments. The orientation of these lineaments are parallel to the regional fault systems of Carnaubais (NE) e Afonso Bezerra (NW), which can work as structural traps for hydrocarbons and control the behavior of morphological features on surface. The integration of elevation, slope, relief and spectral (Landsat 7 ETM+) data show a concentration of oil drills over the Dome of Mangue Seco, close to Guamaré-RN. The SRTM data show new features that contribute to the mapping of environmental vulnerability of coastal ecosystems and also to determinate the Index of Environmental Sensitivity to Oil Spills, optimizing the protection of environments and the planning of new exploration areas. To understand the morphodynamic evolution of the coastal zone in time is significant to guarantee that industrial areas will not be installed in inappropriate zones and to foresee the future behavior of features on surface.

Environmental monitoring, radar interferometry, morphodynamic evolution, environmental vulnerability

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.