

# Uso de Dados Multisensor para geração de Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo, nos Ecossistemas Costeiros da Região do Cabo Norte, Amapá.

Edson de Faria Almeida<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais (CREN),  
Av. Chile, 500/15 and. Centro, 20031-170, Rio de Janeiro – RJ  
[edson.almeida@ibge.gov.br](mailto:edson.almeida@ibge.gov.br)

## Abstract.

The objective of this paper is to discuss advanced remote sensing techniques applied to the study of environmental sensitivity to oil spills in the coastal ecosystems of the Cabo Norte region, Amapá State, Brazil, using multisensor data.

The ecosystems in the investigated site are dominated by mangroves, which are mostly sensitive to oil spills. Precise knowledge of mangrove spatial distribution is fundamental in the event of an oil spill, since the Cabo Norte area is in the route of a considerable number of oil tankers.

Cabo Norte lies in an environment of high complexity, which still lacks characterization for the understanding of its processes. Therefore, the information extracted from remote sensing products are of vital importance. Such technology allows the observation of this area under different points of view through several sensors, making it possible to study existing environment processes in multiple scales. Each sensor is also capable of detecting the response to the elements that compose the landscape in specific areas of the electromagnetic spectrum.

Based on the methods used in this study, the coastal environments recognized in the area of the coastal plain of Cabo Norte, Amapá, were grouped in accordance with their index of environmental sensitivity to oil spills. This approach has proven effective in the recognition and analysis of the environmental sensitivity, and, consequently, enabled the definition of new indexes to oil spills adapted to these environments.

**Palavras-chave:** remote sensing, image processing, environmental sensitivity map, Cabo Norte – Amapá, Coast Ecosystem, oil spill, Amazonia, sensoriamento remoto, processamento de imagens, carta de sensibilidade ambiental, Cabo Norte – Amapá, Ecossistema Costeiro, Derramamentos de Óleo, Amazônia.

## 1. Introdução

O presente trabalho tem como objetivo discutir o uso de técnicas avançadas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo da sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo nos ecossistemas costeiros da região do Cabo Norte, Amapá, empregando dados multisensores.

Nesta área, ocorrem ecossistemas dominados por manguezais, que apresentam sensibilidade máxima a derramamentos de óleo. O conhecimento preciso de sua distribuição espacial é fundamental em caso de acidentes, pois a região investigada está na rota de um considerável número de navios petroleiros, que são potenciais causadores de derramamentos.

No ambiente de alta complexidade do Cabo Norte, que ainda necessita de caracterização para o entendimento de seus processos, as informações extraídas a partir de produtos de sensores remotos são fundamentais. Tal tecnologia permite a observação desta área sob diferentes pontos de vista, através de sensores diversos, possibilitando o entendimento em múltiplas escalas dos processos que nela operam. Existe também a capacidade de cada sensor de perceber a resposta, em regiões específicas do espectro eletromagnético, dos elementos que compõem a paisagem.

A partir dos métodos utilizados, os ambientes reconhecidos na planície costeira do Cabo Norte foram agrupados de acordo com seus índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo. A abordagem empregada mostrou-se eficaz no reconhecimento e análise dos ecossistemas costeiros e, conseqüentemente, permitiu a

atribuição de índices de sensibilidade a derramamentos de óleo adaptados para estes ambientes.

A proposta do presente trabalho é retomar a abordagem de Souza Filho *et al.* (2004) para a região do Cabo Norte, Amapá, gerando uma análise dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo, pela integração das imagens JERS-1 SAR, SRTM, RADARSAT-1, Landsat-7 ETM+, MODIS e IKONOS. A pesquisa inclui uma avaliação multitemporal da sensibilidade ambiental considerando o ciclo hidrológico do Rio Amazonas e os diferentes cenários de macromarés (Figura 2).

### Área de estudo

A área de estudo está situada na região do Cabo Norte, Estado do Amapá, nos domínios da Folha NA.22-Z-A (Cabo Norte), compreendendo as latitudes de 02°00'01,53" N e 00°59'58,71" S, e entre as longitudes de 51°00'01,36" W e 49°44'58,66" W (Figura 1). O local sofre influência flúvio-marinha, sendo parte integrante de um sistema maior, a região estuarina da Planície Costeira do Rio Araguari. Sedimentos pertencentes ao Grupo Barreiras constituem o limite oeste da área de estudo; o limite sul é definido pelo canal estuarino do Rio Araguari.

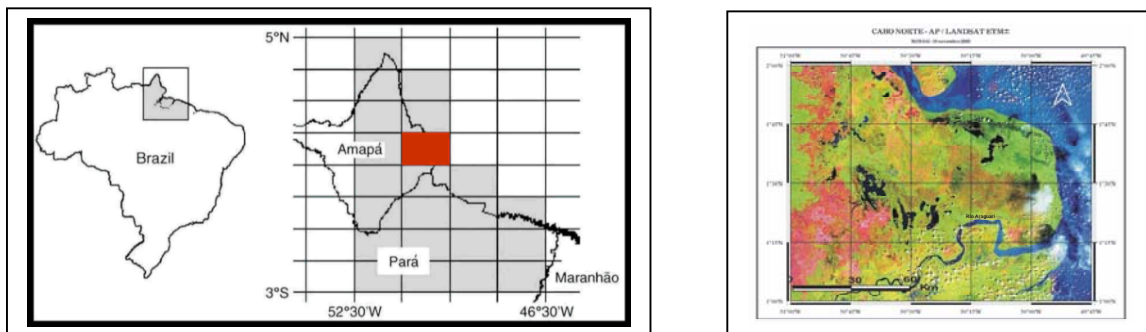


Figura 1. À esquerda, mapa de localização da área de estudo na Folha Cabo Norte (NA.22-Z-A), Amapá e à direita, área de estudo, representada em composição colorida do Landsat-7 ETM+, 5R4G3B, adquirida em 18/11/2000. Fonte: Almeida (2008).

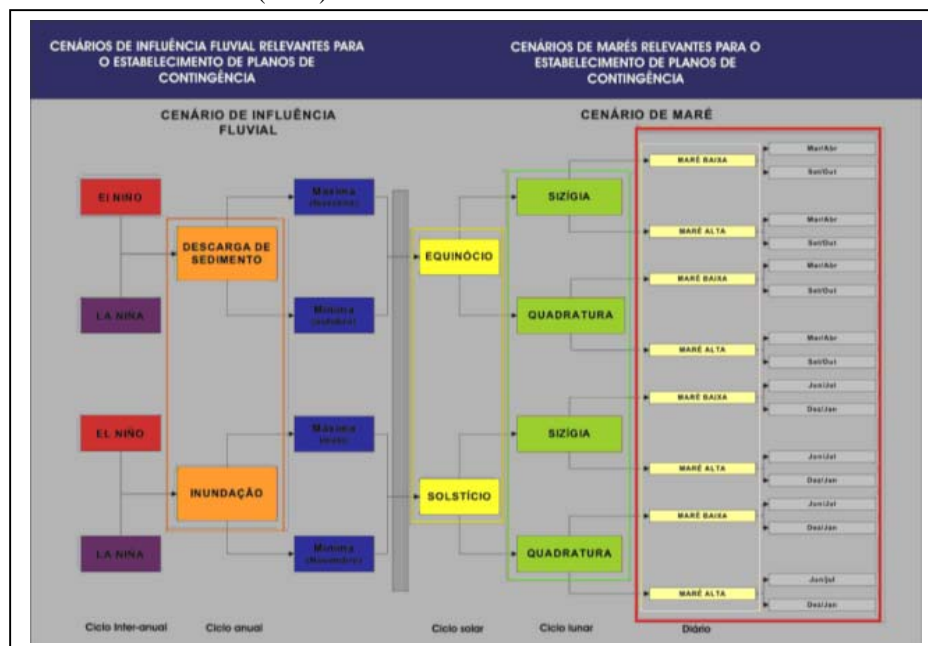


Figura 2. Cenários ambientais para mapeamento, sazonal, das áreas húmidas, sensíveis a derramamento de óleo, na região costeira do Cabo Norte. Fonte: Almeida (2008).

## **Implicações para mapeamento sazonal dos ecossistemas húmidos na região do Cabo Norte, AP**

A Zona Costeira Amazônica (ZCA), na qual se insere a região do Cabo Norte, abrange a costa do Amapá, Pará e Maranhão, situando-se em domínio de meso e macromaré. Nessa região, ocorre a maior extensão contínua de manguezais do planeta, em uma fisiografia com baixo relevo, alta densidade de drenagem e processos ativos de erosão, sedimentação e neotectônica (Souza Filho e El Robrini, 2000). Na presença de macromarés, a faixa de manguezais inundados, um ambiente de máxima sensibilidade a derramamentos de óleo, chega a 30 km de largura e os estuários estendem-se por mais de 80 km continente adentro (Souza Filho, 2005).

A conjugação do ciclo hidrológico dos rios da Amazônia, em especial os quatro cenários fluviais do Rio Amazonas, com os ciclos de maré dá origem a pelo menos 64 diferentes cenários teóricos para a elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo, os quais servirão de apoio para a elaboração de planos de contingência na zona costeira amazônica (Souza Filho *et al.*, 2007).

Os 64 cenários teóricos idealizados para a Zona Costeira Amazônica são resultantes da combinação dos quatro cenários fluviais com os 16 cenários de maré, os quais precisam ser considerados para a geração das cartas SAO.

### **Fenômenos Estudados na Solução do Problema Proposto**

De acordo com o GERCO (Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro do Amapá), a ZCA pode ser compartimentada em dois setores, em relação à foz do Rio Araguari. O setor a norte do Rio Araguari, até o limite com a Guiana Francesa, é designado como Setor Costeiro Oceânico ou Atlântico (Setor 2), abrangendo parte dos municípios de Oiapoque, Calçoene, Amapá, Pracuúba e Tartarugalzinho. O setor situado entre os estuários Araguari e Jari (divisa com o Pará) é chamado de Setor Costeiro Estuarino ou Amazônico (Setor 1), abrangendo parte dos municípios de Cutias, Itaubal, Macapá, Santana e Mazagão. Estas duas áreas são influenciadas predominantemente pelas marés (Torres e El Robrini, 2006). Os fenômenos estudados neste trabalho referem-se ao Setor Costeiro Oceânico ou Atlântico.

Fenômenos complexos que atuam nos ecossistemas costeiros da região do Cabo Norte encontram-se submetidos a uma dinâmica espacial e temporal ímpar no mundo. Para avaliação multitemporal da sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na região, é necessário observá-los sob diferentes pontos de vista, através de sistemas de sensores orbitais distintos. Neste sentido, o presente estudo inclui as duas abordagens complementares descritas a seguir.

A) Caracterização do cenário de influência aluvial e de maré, constituído por ambientes costeiros de meso e macro marés, dominados por campos e manguezais inundáveis. Considera-se aqui que as modificações que ocorrem nos ambientes costeiros de influência aluvial e de maré da região do Cabo Norte, com impacto na sensibilidade ambiental, podem ser identificadas e estudadas através de dados dos sensores JERS-1, RADARSAT-1 e MODIS (Figura 3).

Os fenômenos considerados neste processo são:

1 - Descarga de sedimento máxima e mínima, período de sizígia equinocial, cheia e seca do Rio Amazonas;

2 - Inundação máxima e mínima, período de sizígia equinocial, cheia e seca do Rio Amazonas.

B) Estratificação em categorias ecológicas, geomorfológicas e de uso da terra, partindo do princípio de que os fenômenos que ocorrem nos ambientes costeiros da região do Cabo Norte podem ser compreendidos mais facilmente se representados dessa maneira.

Tal procedimento é imprescindível para a determinação da sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo. Os dados de sensores remotos adequados a essa análise incluem os sistemas MODIS, Landsat, SRTM e IKONOS (Figura 4).

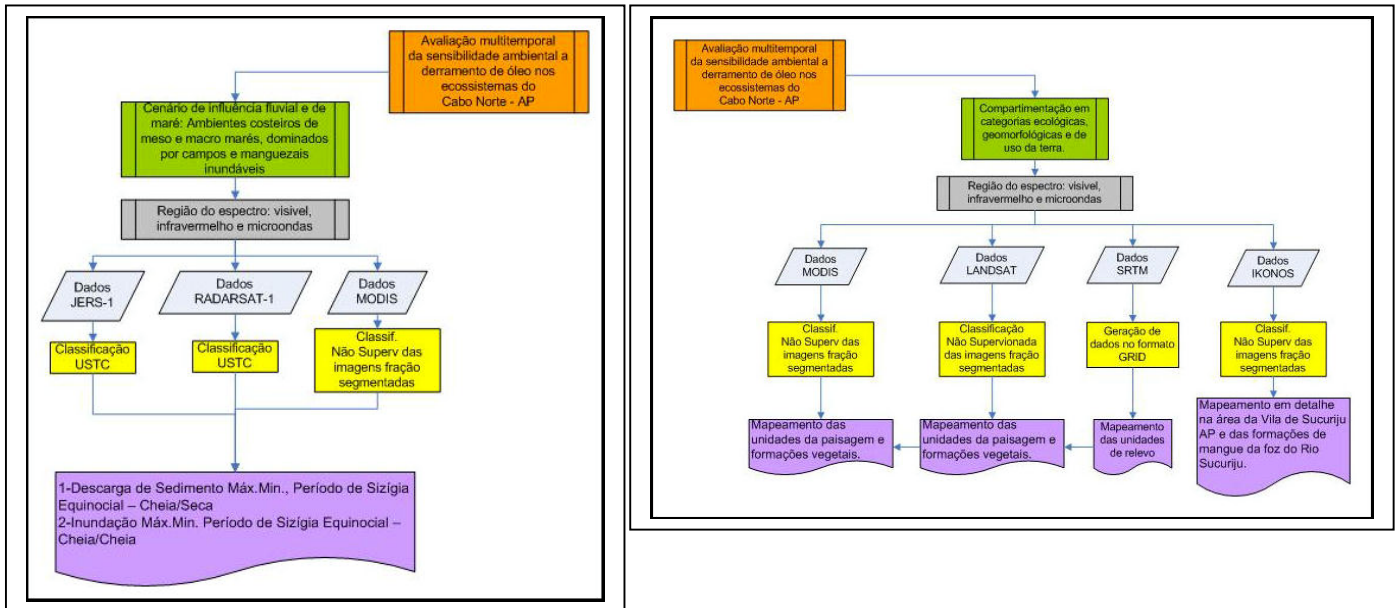


Figura 3 e 4. Fluxogramas de procedimentos.

### O Conceito de Índice de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo

O aumento da segurança nas operações de exploração, produção e transporte de petróleo e derivados, implementado nos últimos anos pelas companhias de energia, tem diminuído os riscos de acidentes. Ainda assim, quando estes ocorrem, são, em sua maioria, ocasionados pelo derramamento de óleo durante os procedimentos de limpeza dos reservatórios dos navios petroleiros. Os danos deles decorrentes são uma grave ameaça à conservação ambiental das áreas costeiras em todo mundo (Jensen *et al.*, 1993).

A importância do monitoramento ambiental em áreas onde há atividades petrolíferas é realçada pelos vários casos de derramamentos de petróleo ocorridos no litoral brasileiro nos últimos anos.

Diante da necessidade de se responder a esses acidentes, Hayes e Gundlach (1975) propuseram um índice de susceptibilidade a derramamentos de óleo baseado nas características geomorfológicas de uma região. O objetivo foi indicar, através de mapas, qual o comportamento do óleo em um ambiente costeiro, utilizando processos de limpeza naturais. Posteriormente, Gundlach e Hayes (1978) sugeriram que as características biológicas de um ambiente costeiro estão relacionadas a aspectos geomorfológicos, surgindo, portanto, o Índice de Vulnerabilidade a Derramamentos de Óleo. Com o avanço da metodologia, foram incorporadas informações sócio-econômicas, impactos culturais, impactos arqueológicos, informações sobre correntes marítimas e parâmetros bióticos (ARPEL, 1997 *in* Araújo *et al.*, 2002). Assim, mapas de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo foram sendo desenvolvidos para dar suporte à tomada de decisões rápidas em planos de contingência e em operações de combate na eventualidade de um acidente ambiental, além de fornecer subsídios para planejamento ambiental (Araújo *et al.*, 2002).

Atualmente, o sistema utilizado internacionalmente para mapas de sensibilidade ambiental costeira a derramamentos de óleo tem por base o conceito proposto pela

NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), que utiliza uma escala de 1 a 10 (NOAA, 2002). Quanto maior for a sensibilidade de um ambiente ao óleo, maior será o seu valor na escala e vice-versa.

Devido à maior incidência de acidentes com óleo em regiões marinhas ou baías, houve desenvolvimento mais intenso desta metodologia para ambientes costeiros.

No Brasil, as cartas de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo são apresentadas em três escalas:

- Estratégica: 1:250.000;
- Tática: 1:50.000;
- Operacional: 1:10.000.

Jensen *et al.* (1990) utilizaram métodos de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG) para auxiliar na confecção de mapas de sensibilidade em ambientes de pântano e manguezais.

### **Regiões de florestas e manguezais inundados**

A interpretação correta das imagens de radar para mapeamento dos tipos de cobertura depende de um bom entendimento dos processos de retroespalhamento, assim como da observação adequada dos elementos que contribuem para estes processos. As áreas de floresta inundada reúnem ambientes da superfície terrestre que possuem comunidades vegetais adaptadas a substratos sujeitos à inundação permanente ou periódica (Novo e Costa, 2005). Essas superfícies normalmente estão submetidas a diferentes graus de salinidade e de composição química, com recobrimento por vegetação de diferentes dimensões, biomassa, espécies, estruturas e densidade.

A delimitação cartográfica de áreas inundadas em florestas tropicais normalmente é limitada pela impossibilidade de acesso, em razão da mobilidade sempre dificultada pela inundação, por solos com excesso de detritos, assim como por emaranhados espessos de vegetação rasteira e raízes (Hess *et al.*, 1990). A detecção remota de inundação é restringida por dosséis de florestas densas, que deixam o limite terra-água invisível aos sensores que operam em comprimentos de onda na faixa do visível e infra-vermelho. Devido à facilidade de penetração na vegetação utilizando a faixa de comprimentos de onda longos nas microondas, é possível identificar corpos d'água abaixo da copa das árvores. Nas imagens de radar, este fato de fundamental importância permite mapear grandes extensões de florestas inundadas e distingui-las pela diferença de sinal de retorno de outros alvos no terreno.

### **Metodologia de processamento de imagens e dados utilizados**

A metodologia de processamento de imagens é constituída de um sistema de monitoramento e mapeamento da dinâmica dos ambientes costeiros do Amapá. Tal sistema inclui a integração de dados de diferentes sensores, com distintas resoluções espaciais, espectrais e temporais (JERS-1 SAR, RADARSAT-1, MODIS, Landsat-7, SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e IKONOS), para avaliação dos complexos processos que atuam nesta região.

A metodologia de processamento aqui proposta é baseada na aplicação de diferentes técnicas a imagens de vários sistemas sensores, com o objetivo de melhor discriminar os diversos tipos de ecossistemas costeiros (Figura 5)

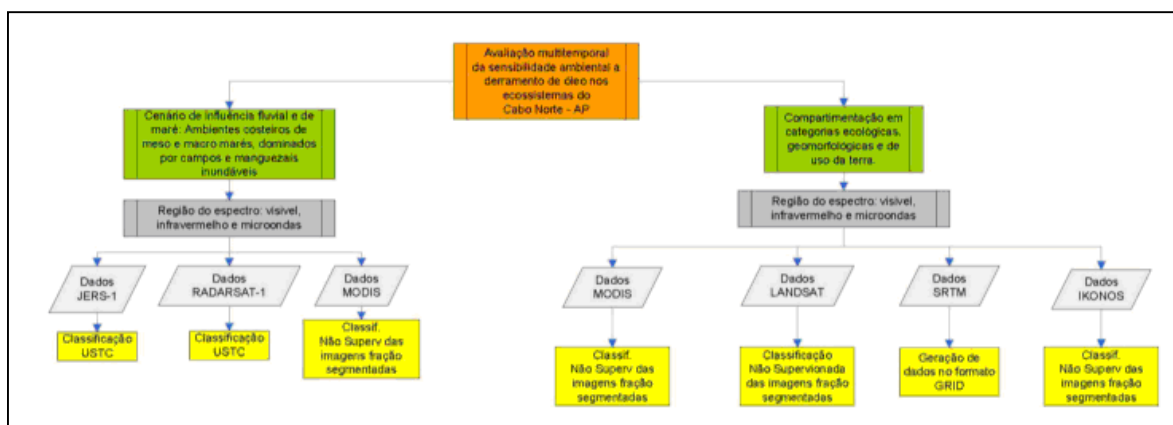


Figura 5. Etapas de processamento de imagens desenvolvidas neste trabalho.

Os resultados mais expressivos do processamento das imagens Landsat-7 ETM+ estão apresentados nas Figuras 6 e 7.

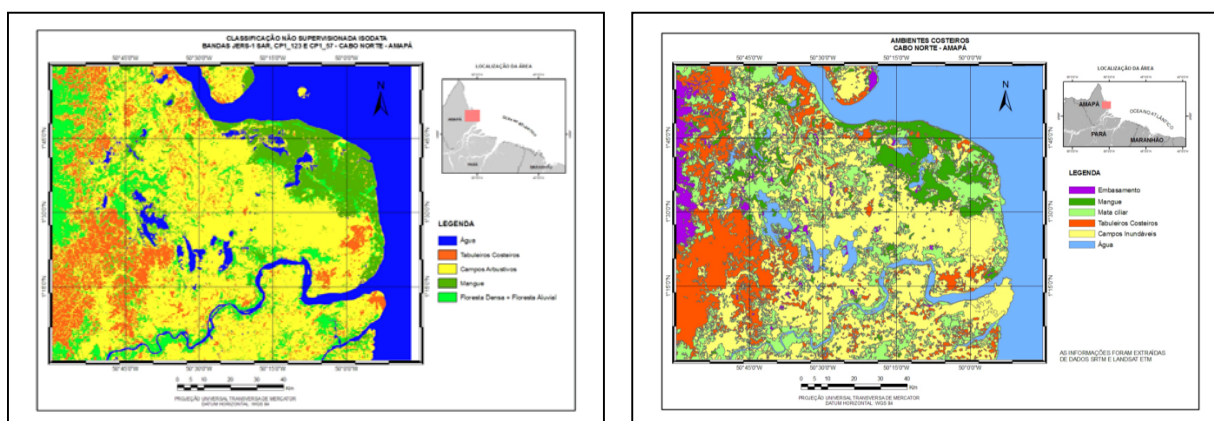


Figura 6. À esquerda, mapa de Ambientes Costeiros obtido pela interpretação do produto resultante da fusão da imagem JERS-1 SAR (09 de junho de 1996) com a imagem Landsat-7 ETM+ (18 de novembro de 2000 - principal componente seletiva) e à direita, Figura 7, mapa de Ambientes Costeiros obtido pela interpretação do produto resultante da fusão da imagem NDVI, com a imagem SRTM.

Assim, para a região do Cabo Norte, a presente pesquisa redefiniu o Índice de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (Tabela 1), promovendo uma adaptação local das feições dos ambientes costeiros amazônicos. Nesse processo, foram levadas em consideração as singularidades de tal porção do litoral do Amapá, o que contribuiu para o refinamento da abordagem proposta por Souza Filho *et al.* 2004.

Tabela 1. Índice de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo para os ambientes costeiros do Cabo Norte, Amapá. Os manguezais (10 D) são os mais sensíveis. \*Tabela de cores no sistema R = red, G = green, B = blue.

Ranking ESI Índice de Sensibilidade	Ambientes Costeiros	Código de cores NOAA - Sistema RGB*
1 B	Habitações ribeirinhas	(119,38,105)
7 A	Planície de maré lamosa exposta	(214,186,0)
8 A	Tabuleiros Costeiros e Colinas (paleofalésia)	(225,232,0)
9 A	Lagos	(255,211,127)
9 B	Planície de Inundação	(255,255,115)
9 C	Paleocanais	(247,161,0)
10 B	Campos Inundáveis	(255,184,0)
10C	Campos Arbustivos Inundáveis	(214,110,24)
10D	Manguezal	(214,0,24)

O mapa de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo na região do Cabo Norte, Escala Estratégica 1:250.000 (Figuras 8), incluiu os ambientes costeiros ainda não ranqueados até o momento, por trabalhos anteriores, através da metodologia ESI (Environmental Sensitivity Index; NOAA, 2002).

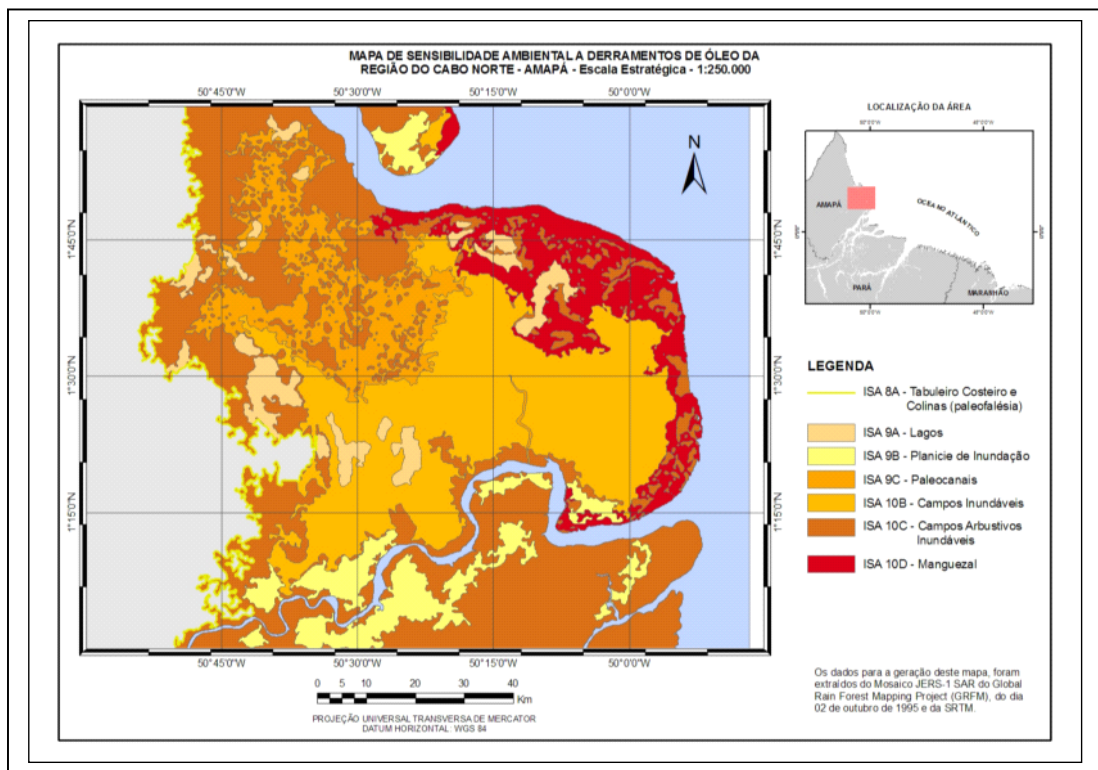


Figura 8. Mapa de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo da Região Costeira do Cabo Norte – Amapá, a partir da interpretação de produtos de sensores remotos (Landsat-7 ETM<sup>+</sup>, JERS-1 SAR, SRTM e produtos integrados SAR/TM). Escala Estratégica de 1:250.000.

## Conclusões

O presente trabalho apresentou uma abordagem inovadora no uso integrado da tecnologia de sensores remotos ópticos e de microondas, visando ao conhecimento da sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo dos ecossistemas costeiros da região do Cabo Norte, Amapá.

No ambiente de alta complexidade do Cabo Norte, que ainda necessita de caracterização para o entendimento de seus processos, as informações extraídas a partir de produtos de sensores remotos são fundamentais. Tal tecnologia permite a observação desta área sob diferentes pontos de vista, através de sensores diversos, possibilitando o entendimento em múltiplas escalas dos processos que nela operam. Foi elaborada uma metodologia para o monitoramento dos cenários hidrológicos e ambientais, considerando influência fluvial e de marés, na planície de inundação do Cabo Norte. Nesse estudo, levou-se em consideração as variações sazonais de alguns ambientes costeiros, que apresentam diferentes graus de sensibilidade a derramamentos de óleo, em função da época do ano.

As imagens SAR contribuíram com informações relacionadas a diferenças na altura e estrutura da vegetação costeira, assim como na presença de inundação, possibilitando o mapeamento dos ecossistemas em diferentes condições ambientais. Por exemplo, foi possível a delimitação de ambientes não anteriormente identificados, como também seu enquadramento segundo índices de sensibilidade ambiental a

derramamentos de óleo na região do Cabo Norte. Os dados na faixa de microondas permitiram ainda, o monitoramento de áreas alagáveis, visto que as imagens, JERS-1 SAR e RADARSAT-1 foram adquiridas em condições hidrológicas bastante distintas.

Foi possível também mapear com precisão os cinturões de lagos, que se apresentam como superfícies visíveis nas imagens SAR com tonalidades escuras, devido à reflexão especular do pulso de radar. Outro padrão identificado pelas imagens JERS-1 SAR são as feições de paleocanais na região do Rio Macarry. Informações altimétricas geradas pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foram igualmente fundamentais para a delimitação destas feições morfológicas.

Como fonte adicional de informação, foi utilizada a fusão de imagens SAR/Ópticas, configurando produtos híbridos. Tais produtos agregam valor ao processo de interpretação, no qual os dados SAR contribuem com a informação espacial (estruturas, texturas) e as imagens ópticas controlam a informação espectral (cromaticidade). Esta última está ligada à absorção dos pigmentos de clorofila, estrutura celular das folhas e influência de seu conteúdo de água, bem como à composição mineralógica de solos e rochas expostos.

Os produtos híbridos que apresentaram melhores resultados consistiram na fusão de imagens JERS-1 SAR com Landsat-7 ETM+, na principal componente seletiva R(SAR), G(CP1\_123-VIS), B(CP1\_57-IV), e na fusão digital da imagem NDVI, no canal matiz (H), com a imagem SRTM, no canal intensidade (I). O canal saturação (S) foi mantido com valor constante. Tais produtos apresentaram excelente desempenho no reconhecimento de ambientes costeiros, permitindo delimitá-los com maior precisão.

O algoritmo de classificação textural utilizado (*USTC-Unsupervised Semivariogram Textural Classifier*), produziu com facilidade e rapidez, mapas de ambientes costeiros com acurácia cartográfica, servindo assim como base para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo. As áreas de maior sensibilidade, no caso os manguezais, foram bem delimitadas. A interpretação visual, por sua vez, permitiu o reconhecimento de um número adicional de ambientes costeiros, complementando os resultados da classificação automática. Os melhores resultados da classificação USTC para os dados JERS-1 SAR provieram da incorporação de uma banda textural SRTM.

## **Bibliografia**

- ALMEIDA, E.F., 2008, “Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo dos Ecossistemas Costeiros da Região do Cabo Norte, Amapá: A Contribuição do Sensoriamento Remoto”. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 202p.
- ARAÚJO, S.I., SILVA, G.H., MUEHE, D.C.E.H., 2002, “Manual básico para elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo no sistema Petrobras: ambientes costeiros e estuarinos”. Petrobras, Rio de Janeiro, 133 p.
- GERCO-MMA, 1996 – “Macrodiagnóstico da Zona Costeira do Brasil na Escala da União”. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal – MMA, Secretaria de Coordenação dos Assuntos de Meio Ambiente – SAC, Programa Nacional do Meio Ambiente – PNMA, Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro – GERCO.
- GUNDLACH, E.R., HAYES, M.O., 1978, “*Classification of coastal environments in terms of potential vulnerability to oil spill impact*”. Marine Technology Society Journal, 12, p. 18-27.



- HAYES, M.O., GUNDLACH, E.R., 1975, “Coastal geomorphology and sedimentation of the Metula oil spill site in the Strait of Magellan”, Columbia, South Carolina: University of South Carolina, Department of Geology, 103 p.
- HESS, L.L., MELACK, J.M., SIMONETT, D.S., 1990, “Radar detection of flooding beneath the forest canopy”: a review. *International journal of Remote Sens.* 11: 1313–1325.
- JENSEN, J.R., RAMSEY, E.W., HOLMES, J.M., MICHEL, J.E., SAVITSKY, B., DAVIS, B.A., 1990, “Environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil spills using remote sensing and geographical information systems technology”. *International Journal of Geographical Information Systems*, (2), p. 181-201.
- JENSEN, J.R.; MURDAY, M.; SEXTON, W.J.; GREEN, C.J., 1993, “Coastal environment sensitivity mapping for oil spills in the United Arab Emirates using remote sensing and GIS technology”. *Geocarto International*, 2: p. 5-13.
- NOVO, E.M.L.M., COSTA, M.P.F., 2005, “Fundamentos e aplicações de radar no estudo de áreas alagáveis”, In: Souza, R.B. *Oceanografia por satélite*, Cap. 16, 2005, p. 236-258.
- NOAA. 2002, “Environmental Sensitivity Index Guidelines”, *National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum NOS OR&R 11*, version 3.0, 192 p.
- SOUZA FILHO, P. W. M., EL-ROBRINI, M., 2000. “Geomorphology of the Bragança coastal zone, northeastern Pará State”. *Revista Brasileira de Geociências* 30: 522-526.
- SOUZA FILHO, P.W.M., MIRANDA, F.P., BEISL, C.H., ALMEIDA, E.F., GONÇALVES, F.D., 2004, “Environmental sensitivity mapping for oil spill in the Amazon coast using remote sensing and GIS technology”, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. In: Anchorage, Alaska, IGARSS, pp. 1565-1568.
- SOUZA FILHO, P. W. M., 2005, “Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia: Cenários Morfológicos, Mapeamento e Quantificação do Maior Cinturão Contínuo de Manguezais do Mundo”, *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(4): 427-435.
- SOUZA FILHO, P.F.M., MIRANDA, F.P., VARGAS, H., ROCHA, W., BOULHOSA, M., TEIXEIRA, S., RODRIGUES, S., SANTOS, V., SILVA, M., 2007, “Projeto Piatam mar II – Potenciais Impactos Ambientais do Transporte de Petróleo e Derivados na Zona Costeira Amazônica” – Relatório Meta 2: Geração das Cartas de Sensibilidade na Zona Costeira Amazônica em escala regional (1:250.000), 64 p.
- TORRES, A.M. & EL-ROBRINI, M., 2006, Amapá, in: Muehe, D., organizador, *Erosão e progradação do litoral brasileiro – Brasília:MMA*, 11-40;