

## **Integração digital de imagens Radarsat-1 e Landsat-7 para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na Baía de Guajará (Belém-PA).**

Fabício Dias Gonçalves  
Pedro Walfir Martins Souza Filho

Universidade Federal do Pará, Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido -  
UFPA/LAIT  
Caixa Postal 1611 - 66075-110– Belém - PA, Brasil.  
{fdias,walfir}@ufpa.br

**Abstract.** Natural resources in the Guajará Bay (Belém-PA) are threatened by several human activity, stand out industrial pollution by heavy mineral and urban effluent that are dairy spilled on bay. However, the localization of Miramar oil terminal, which is responsible for oil storing derived around Belém city, is a danger for potential oil spills, moreover, the ships and tankers that crossing the bay every day are a threat too. The aim this paper is carry out an environmental sensitivity index (ESI) analysis of Amazon Coast for oil spills, and to provide a environmental sensitivity index map for the region, using for this, a hybrid image (SAR/optical). The digital integration of Radarsat-1 and Landsat-7 data allowed a better discrimination of the main coastal features and ESI.

**Palavras-chave:** remote sensing, environmental sensitivity index map, Amazon Region, sensoriamento remoto, mapa de índices de sensibilidade ambiental, Região Amazônica.

### **1. Introdução**

O aumento da segurança nas operações de exploração, produção e transporte de petróleo e derivados, que vem sendo implementado nos últimos anos pelas companhias de petróleo, tem diminuído os riscos de acidentes, mas ainda assim, estes têm ocorrido, e são ocasionados tanto pelo derramamento acidental, como intencional, durante os procedimentos de limpeza dos reservatórios dos navios petroleiros, e os danos decorrentes são, uma grave ameaça a conservação ambiental das áreas costeiras em todo mundo (Jensen *et al.*, 1993).

Estima-se que a quantidade de óleo derramado anualmente em todo o mundo ultrapasse 4,5 milhões de toneladas. Os maiores contribuintes para este número são as operações de limpeza dos reservatórios dos navios petroleiros, onde o óleo é despejado ilegalmente nos mares e oceanos, sendo responsável por cerca de 45% da poluição total por hidrocarbonetos no mundo (ESA, 1998).

A importância do monitoramento ambiental em áreas onde há atividades petrolíferas, é medida pelos vários casos de derramamentos de petróleo ocorridos no litoral brasileiro nos últimos anos, o que têm incentivado os órgãos e as entidades envolvidos nestes episódios a aperfeiçoarem cada vez mais os métodos, tanto preventivos como corretivos, para a minimizar os danos gerados ao ambiente (Kampel e Amaral, 2001; Carvalho, 2003).

Dentro destas perspectivas, os mapas de sensibilidade que vêm sendo utilizados desde a década de 70, quando primeiramente foram desenvolvido para a Baía Lower Cook, Alaska, representam uma importante ferramenta gerencial para priorização dos ambientes a serem protegidos (Gundlach e Hayes, 1978). Este método fornece informações necessárias em formato de fácil leitura e compreensão, sendo útil para subsidiar tomadas de decisões sobre a determinação de prioridades de proteção, para os ambientes de maior sensibilidade a derramamentos de óleo.

A utilização da tecnologia de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (SIG), podem auxiliar fortemente a elaboração de mapas de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo, principalmente em áreas de difícil acesso ou com base cartográfica desatualizada (Jensen *et al.*, 1993).

O objetivo deste trabalho foi realizar a análise dos índices de sensibilidade ambiental (ISA) dos ambientes estuarinos amazônicos a derramamentos de óleo, bem como, avaliar o produto gerado pela integração das imagens RADARSAT-1 e ETM+/Landsat-7 para essa finalidade. Desta forma, os ISA foram analisados para a região a partir do método proposto pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 2002).

## 2. Área de Estudo

A área em estudo esta situada na Região Amazônica, que constitui a maior e bem preservada região tropical úmida do planeta (**Figura 1A**). Assim, a costa amazônica, localizada no norte do Brasil, abrange os estados do Amapá, Pará e Maranhão, e onde o principal processo condicionante da dinâmica ambiental é a energia das marés. Dentro disso, a Baía de Guajará é tipicamente uma região estuarina, estando situada em um domínio transicional, dominado por mesomaré, com alcance médio de 3m. Na Costa Amazônica, quando há ação das marés mais altas, as áreas inundáveis, tais como, manguezais, pântanos e várzeas, estendem-se por mais de 30 km de extensão, sendo essa região, uma das maiores áreas de manguezais do mundo (Souza Filho *et al.*, 2004).

A Baía de Guajará está localizada numa região estuarina, parte integrante de um outro estuário maior, o Golfão Marajoara situado na foz do Rio Amazonas. O Estuário Guajarino é caracterizado como um ambiente fluvial com influência marinha, formado na confluência dos Rios Pará, Acará e Guamá, este limita a área pelo sul, dando origem à Baía de Guajará que ao norte confunde-se com a Baía de Marajó, no Rio Pará. A área é composta de uma parte continental e uma região insular separadas por inúmeros rios, furos, igarapés e canais de maré.

Na Baía de Guajará (Lat. 01° 28'03'' S, Long. 48° 29'18'' W), concentram-se indústrias e importantes núcleos habitacionais da região metropolitana de Belém. Esta área é constituída por ambientes de elevada sensibilidade ao derramamento de óleo, representados por várzeas e rios, e que são utilizados pela população local como fonte de subsistência alimentar e econômica, destacando-se o aproveitamento dos recursos hídricos pelo sistema de captação de água potável que abastece a cidade de Belém. Assim, a Baía de Guajará esteve e continua envolta por um processo, talvez lento, mas bastante antigo de degradação ambiental, que nas últimas décadas vem sendo acelerado em função da expansão urbana e das atividades industriais e portuárias.

Assim, dentre as áreas com grande atividade de transporte de derivados de petróleo na Região Amazônica, destaca-se o Terminal Petroquímico Nicolau Bentes Gomes (MIRAMAR), situado na Baía de Guajará e que é fonte potencial para derramamentos de derivados de petróleo na região, portanto passivo de risco ambiental.

Para geologia das margens estuarinas assume-se uma coluna estratigráfica para a região de Belém e adjacências, onde à cerca de 100-120 m da superfície encontram-se sedimentos Oligo-Miocênicos atribuídos a Formação Pirabas. Sobrepostos, em profundidades entre 100-150m encontram-se sedimentos Terciários correlacionáveis ao Grupo Barreiras. Em seguida, no Quaternário, estaria repousando uma unidade atribuída ao Pleistoceno / Holoceno Médio-Inferior, correlacionada aos "Sedimentos Pós-Barreiras". Finalmente, no topo da seção, estariam os sedimentos recentes. Estas Unidades estratigráficas estariam estruturadas de modo interdigitado, sem que as camadas apresentem, aparentemente grandes continuidades (Pará, 1995).

A alta energia hidráulica do estuário ocasiona não apenas mudanças na fisiografia regional, bem como, no próprio relevo da calha estuarina, que está sujeito a modificações periódicas relativamente rápidas (Pinheiro, 1998).

Segundo Pará (1995), a geomorfologia da região é representada por duas grandes regiões de acordo com o posicionamento na fisiografia regional: a região de Terra Firme e a região

das Várzeas, que se diferenciam por um conjunto de elementos antrópicos, bióticos e sócio-econômicos.

A configuração atual da paisagem regional tem seus regimes condicionados ao fluxo e refluxo das marés e, por conseguinte, o processo de agradação e degradação da paisagem também têm grande relacionamento com esta energia hidrodinâmica. As marés são o principal elemento transportador da cobertura aluvionar, preenchendo a planície de inundação das margens fluviais com sedimentos e material orgânico em suspensão, constituindo assim, a Região das Várzeas (Pinheiro, 1998).

O quadro natural que compõem a paisagem regional, portanto, encontra-se representado pela Região de Terra Firme e Região das Várzeas. Com características gerais, que desempenharam um importante papel no processo de organização sócio-econômica da região, seja como produtoras de incontáveis bens de interesse econômico, seja como elementos que compõem as áreas de fronteira de ocupação.

### 3. Materiais e Métodos

Foram utilizadas neste trabalho uma imagem Wide 1 do satélite Radarsat-1 (banda C-HH), órbita descendente e uma imagem Landsat-7 ETM+, para elaboração de um mapa de unidades de paisagem da área. Assim, As características dos dados utilizados são descritos na **Tabela 1**.

<i>Plataforma</i>	<i>Sensor</i>	<i>Data de Aquisição</i>	<i>Angulo de incidência</i>	<i>Condição de maré</i>	<i>Resolução Espacial</i>	<i>Tamanho Pixel (m)</i>
Landsat- 7	ETM+	3 Agos, 2001	---	Alta	30- multi 15- pan	30- multi 15- pan
RADARSAT-1	Wide 1	5 Jan, 2003	20-31°	Baixa	35x27	12,5

Tabela 1. Principais características das imagens usadas.

Dessa forma, foi gerada uma base de dados digital, usando para isso o programa PCI V.9.1, onde foram inseridas as imagens Landsat-7 e Radarsat-1. Primeiramente, a imagem Radarsat-1 (**Figura 1B**) foi reescalada de 16 para 8 bits, e em seguida orto-retificada no programa OESI (*OrthoEngine Satellite Edition*), usando o modelo digital de elevação adquirido pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e pontos de controle obtidos a partir de cartas digitais do IBGE na escala 1:100.000. De acordo com Rabus et al. (2003), os dados SRTM têm possibilitado a orto-retificação de vários tipos de imagens SAR. Além disso, foi aplicado um filtro para redução do *Speckle*, simultaneamente ao processo de orto-retificação, o que evita múltiplas reamostragens (PCI Geomatics, 2004), assegurando a padronização dos dados dos sensores remotos, a manipulação e a comparação deste em uma base de dados pixel-a-pixel (Souza Filho e Paradella, 2002).

Já a imagem Landsat-7 (**Figura 1C**) foi pré-processada através das técnicas de correção atmosférica, pela subtração do pixel escuro, o que permite a diminuição do efeito da atmosfera, Chavez Jr. (1998). Para escolha da melhor tríade de bandas espectrais para uma composição colorida, obtendo um conjunto de dados com a menor correlação e máxima variância, foi usado o OIF (*Optimum Index factor*) criado por Chavez Jr. et al. (1982). Em seguida, foi realizada uma orto-retificação usando também os modelo digital de elevação do SRTM e pontos de controle obtidos a partir de cartas digitais do IBGE na escala 1: 100.000.

A transformação IHS tem sido usada com sucesso como uma técnica de integração digital de dados de sensores remotos (Chavez, 2002; Paradella et al., 2001; Souza Filho e Paradella, 2002). A Transformação IHS foi a técnica usada neste trabalho para integração digital das imagens Radarsat-1 e Landsat-7. Assim, as tríades de bandas escolhidas serviram como dado de entrada para transformação RGB-IHS, com subsequente cálculo dos componentes I

(Intensity), H (hue) e S (saturation) a partir das três bandas originais. Em seguida, foi aplicado um aumento linear de contraste na imagem Radarsat-1, e em seguida, executada a transformação inversa do espaço de cores IHS para o RGB, substituindo a componente I (intensidade) pela imagem Radarsat-1 realçada, mantendo a componente H constante e na componente S foram testadas várias máscaras sintéticas com valores digitais de 40, 60 e 80, sendo que, a substituição do componente S por uma máscara com números digitais constantes, permite uma mistura proporcional da matiz e da intensidade (Paradella *et al.*, 2001).

O método usado para classificação dos ambientes quanto os índices de sensibilidade ambiental foi o desenvolvido pela NOAA. Este método mundialmente empregado na elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo, que utiliza uma escala variando de 1 a 10, sendo que a sensibilidade é tanto maior, quanto maior for seu índice. Este método considera principalmente as características geomorfológicas da área, pois estas, condicionam a densidade e o tipo de comunidade biológica existente, sendo imprescindível para determinar o tempo de permanência e o grau de impacto do óleo derramado (NOAA, 2002). Essa abordagem pode parecer, a primeira vista, demasiadamente simples, mais é essa simplicidade que possibilita decisões rápidas e abalizadas, no caso de um derramamento de óleo, Beisl *et al.*, (2003). Já o método para elaboração do mapa de índice de sensibilidade foi baseado na proposta de Jensen *et al.* (1993), que utiliza a integração de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas, para esse fim.

#### 4. Resultados e Discussões

Para a imagem Radarsat-1 o filtro adaptativo que apresentou melhor resultado foi o EnhancedFrost com janela 5x5, pois preservou as características texturais e as feições de bordas da imagem original.

A tríade de bandas escolhida pelo cálculo estatístico IOF com o melhor índice foi 753 para área em estudo, que serviu como dado de entrada na transformação IHS, durante o processo de integração. A outra tríade escolhida por análise visual do produto gerado foi a 345. Ademais, a técnica de integração digital via transformação IHS mostrou ser apropriada para área, conseguindo um produto superior para interpretação dos ambientes costeiros Amazônicos.

A partir da interpretação do produto híbrido gerado (**Figura 2A**), aliada as informações de campo, foi possível identificar sete índices de sensibilidade ambiental (ISA) ao derramamento de óleo, na área estudada. Desta forma, os ISA foram analisados para a região a partir do método proposto pela NOAA (2002). Para tanto, verificou-se a necessidade de adaptação dos índices de sensibilidade propostos pela NOAA, em função de que, os ambientes e feições da área, possuem peculiaridades inerentes aos ecossistemas costeiros tropicais da Amazônia, e que não são discutidos neste método.

Nos estuários Amazônicos, o principal processo que condiciona a dinâmica dos ambientes é o regime das águas, que altera e regula os processos biológicos, químicos e físicos atuantes nas áreas inundáveis, sendo que, estes são condicionados pela interação de diversos fatores sazonais agindo diferentemente, em função da posição geográfica com uma maior ou menor influência das marés.

Assim, os ambientes foram ordenados de acordo com sua sensibilidade a derramamentos de óleo, em: i) Muro de arrimo - ISA 1B; ii) Falésia - ISA 3; iii) Praia - ISA 4; iv) Estruturas Artificiais - ISA 8B; v) Banco Lamoso Vegetado - ISA 9B; vi) Manguezal - ISA 10A; vii) Várzea - ISA 10B. Na **Tabela 2** é possível observar a descrição resumida de cada ambiente e seus respectivos índices de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo. A **Figura 2B** ilustra os diferentes índices de sensibilidade ambiental cartografados a partir da análise do produto integrado.

<i>Índices</i>	<i>Classificação para o Estuário Guajarino</i>
1B	✓ Muro de Arrimo (paredões artificiais). Estrutura artificial lisa exposta, de declividade alta a média.
3	✓ Escarpas e falésias íngremes expostos (Grupo Barreiras). Reflexão média das ondas e marés, com sedimentos sujeitos a remobilização freqüente por ação das ondas e marés.
4	✓ Praia de areia média a grossa, abrigada. Região de uso recreacional.
8B	✓ Estruturas Artificiais, incluindo, píeres, docas.
9B	✓ Banco lamoso e barras de rio vegetadas. Possuem substrato sub-horizontal com baixa declividade
10A	✓ Manguezal Zona salobra ou de água salgada, formado em planícies de maré e com grande diversidade biológica.
10B	✓ Região de Várzea Terraços alagadiços formados a nas margens dos rios, controlado pela ação das marés.

Tabela 2. Classificação dos índices de sensibilidade ambiental para os ambientes mapeados na Baía de Guajará. Modificado de NOAA (2002).

## 5. Conclusões

O uso da tecnologia de sensoriamento remoto e SIG aliadas a informações de campo, mostraram ser uma combinação poderosa para a identificação e compartimentação da paisagem e conseqüente hierarquização dos diferentes índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo em ambientes costeiros amazônicos. Destacando-se a atuação das imagens SAR, dada sua possibilidade de imageamento independente das condições atmosféricas, o que é especialmente importante nas regiões tropicais úmidas Amazônicas, onde a utilização de dados obtidos com sensores óticos sofre grandes restrições devido a grande cobertura de nuvens na região.

O uso de diferentes técnicas de processamento digital de imagens objetivando a integração entre dados complementares (radar/ótico), permitiu uma melhor discriminação dos ambientes costeiros Amazônicos, evidenciando feições de difícil reconhecimento nas imagens, separadamente.

Ademais, a rapidez, precisão e periodicidade de obtenção desses dados, permitem a produção de mapas atualizados, em escala adequada, com maior rapidez, acurácia e menor custo. A visão sinóptica obtida com esses sensores propicia o melhor entendimento dos processos atuantes nos ambientes costeiros tropicais amazônicos, bem como, suas inter-relações.

## Agradecimentos

O primeiro autor agradece à CAPES pela concessão de uma bolsa de mestrado. Ao Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT/UFPA) pela infra-estrutura para o processamento digital das imagens, bem como, aos projetos PIATAM mar I e PETRORISCO financiados respectivamente pela PETROBRAS e FINEP, pelo suporte à

realização desse estudo. O segundo autor agradece ao CNPq pela concessão de uma bolsa de produtividade em pesquisa (Proc. # 303238/2002-0).

## Referências

Beisl, C.H.; Miranda, F.P.; Pedroso, E.C.; Landau, L. 2003. Generation of oil sensitivity index information in western Amazonia, Brazil, using dual season SAR image mosaics of the global rain forest mapping project. In Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, Belo Horizonte, **Anais...INPE**: p. 823-830. Repositório da URLib: <ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.22.14.46>.

Carvalho, M. **Mapeamento da sensibilidade ambiental ao impacto por óleo de um segmento da costa entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará utilizando imagens ETM+/LANDSAT-7 e geoprocessamento**. 2003. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Dissertação de mestrado, 186 p.

Chavez, J.M. **Discriminação de litotipos com base em dados de radar de abertura sintética e sinergismo radar/ sistema óptico**. 2002. Brasília-DF, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Tese de Doutorado, 154 p.

Chavez Jr., P.S. An Improved Dark-object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 459-479, 1998.

Chavez Jr., P.S.; Berlin, G.L.; Sowers, L.B. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. **Journal of Applied Photographic Engineering**, v. 8, p. 23-31, 1982.

European Space Agency (ESA). **ERS and it's Marine Application**. Noordwijk, 1998.

Gundlach, E.R. & Hayes, M.O. Classification of coastal environments in terms of potential vulnerability to oil spill impact. **Marine Technology Society Journal**, 12: p. 18-27, 1978.

Jensen, J.R.; Murday, M.; Sexton, W.J.; Green, C.J. Coastal environment sensitivity mapping for oil spills in the United Arab Emirates using remote sensing and GIS technology. **Geocarto International**, 2: p. 5-13, 1993.

Kampel, M. & Amaral, S. Imagens TM/LANDSAT na Detecção de Mancha de Óleo na Baía da Guanabara - RJ - Brasil. 2001. In Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, Foz do Iguaçu, **Anais...INPE**: p. 801-809. Repositório da URLib: <<dpi.inpe.br/lise/2001/09.19.12.23>

MMA. Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo (cartas SAO). Rio de Janeiro: MMA, 2002, 22p.

NOAA. **Environmental sensitivity index guidelines**. Version 3.0. Seattle. NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 11, 2002.

Pará. **Plano Diretor de Mineração em Áreas Urbanas: Região Metropolitana de Belém**. Belém, Governo do Estado do Pará/IBGE, 2002, 157p.

Paradella, W.R.; Santos, A.R.; Veneziani, P.; Moraes, M.C. O Sinergismo de imagens standart descendente do Radarsat-1 e Thematic Mapper do Landsat-5 em aplicação geológica na Amazônia. 2001. In Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, Foz do Iguaçu, **Anais...INPE**: p. 315-322. Repositório da URLib: <dpi.inpe.br/lise/2001/09.14.11.53>.

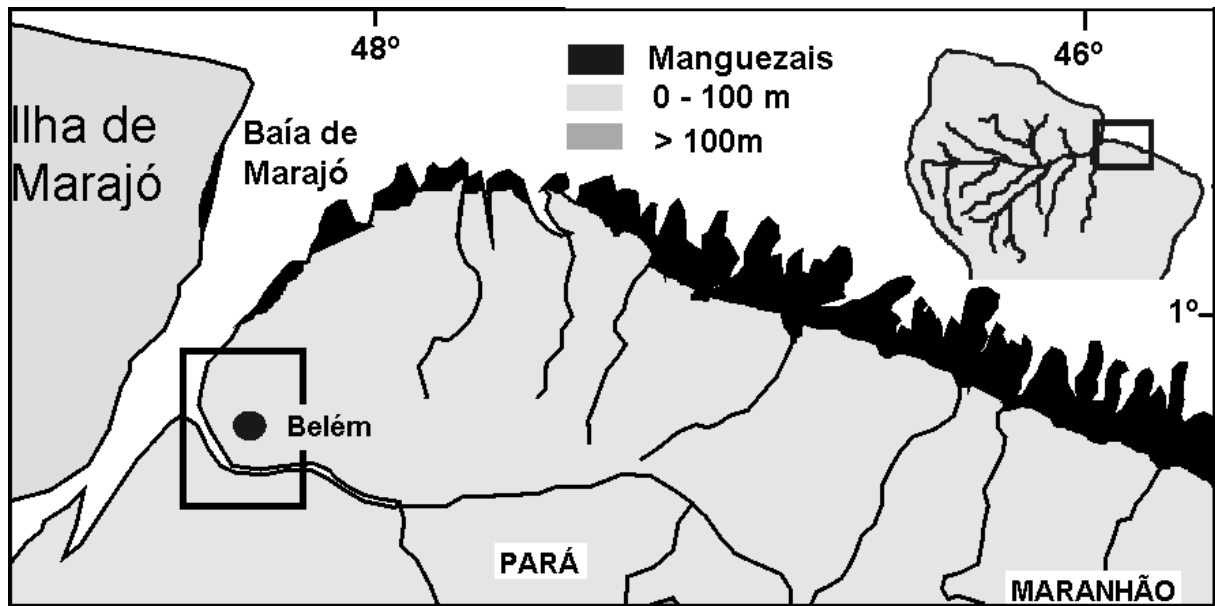
PCI Geomatics. 2004. **Geomatica: User Manual**. PCI geomatics, Version 9.1, Canada.

Pinheiro, R.V.L. **Estudo hidrodinâmico e sedimentológico do Estuário Guajará – Belém/PA**. 1987. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Dissertação de Mestrado, 164p.

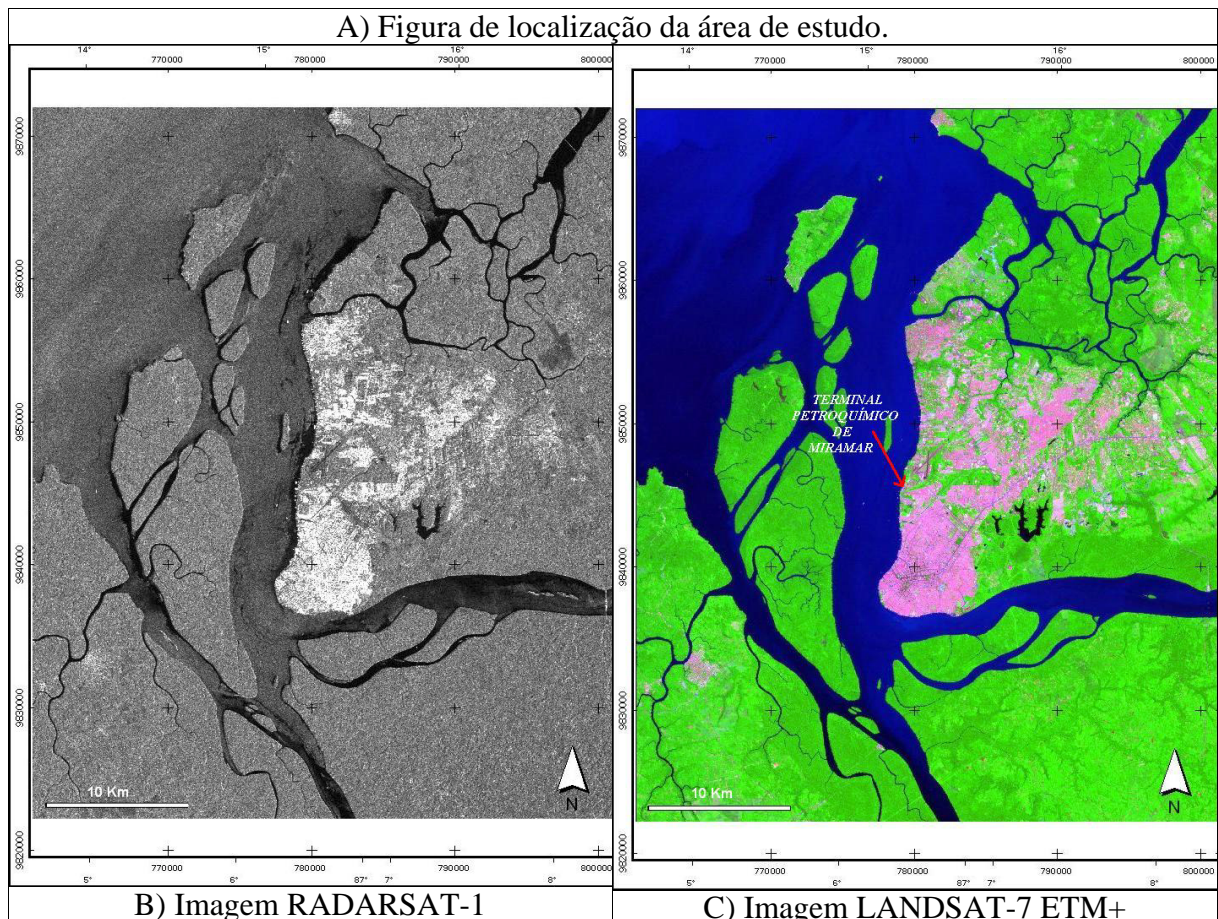
Rabus, B.; Eineder, M; Roth, A.; Bamler, R. The shuttle radar topography mission- a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPR Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p 241-262, 2003.

Souza Filho, P.W.M; Miranda, F.P.; Beisl, C.H., Almeida, E.F.; Gonçalves, F.D. Environmental sensitivity mapping for oil spill in the amazon coast using remote sensing and GIS technology. 2004. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS 2004, Anchorage-Alaska, **Proceedings... IEEE**: CD-ROM.

Souza Filho, P.W.M.; Paradella. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data. **Wetlands Ecology and Management**, v. 10, p. 123-132, 2002.



A) Figura de localização da área de estudo.



B) Imagem RADARSAT-1

C) Imagem LANDSAT-7 ETM+

Figura 1- (A) Costa equatorial amazônica e delimitação da área em estudo (Baía de Guajará). (B) Imagem RADARSAT-1 wide-1. (C) Imagem LANDSAT-7/ETM+, composição 753 em RGB, destacando a localização do terminal petroquímico de MIRAMAR, seta vermelha.



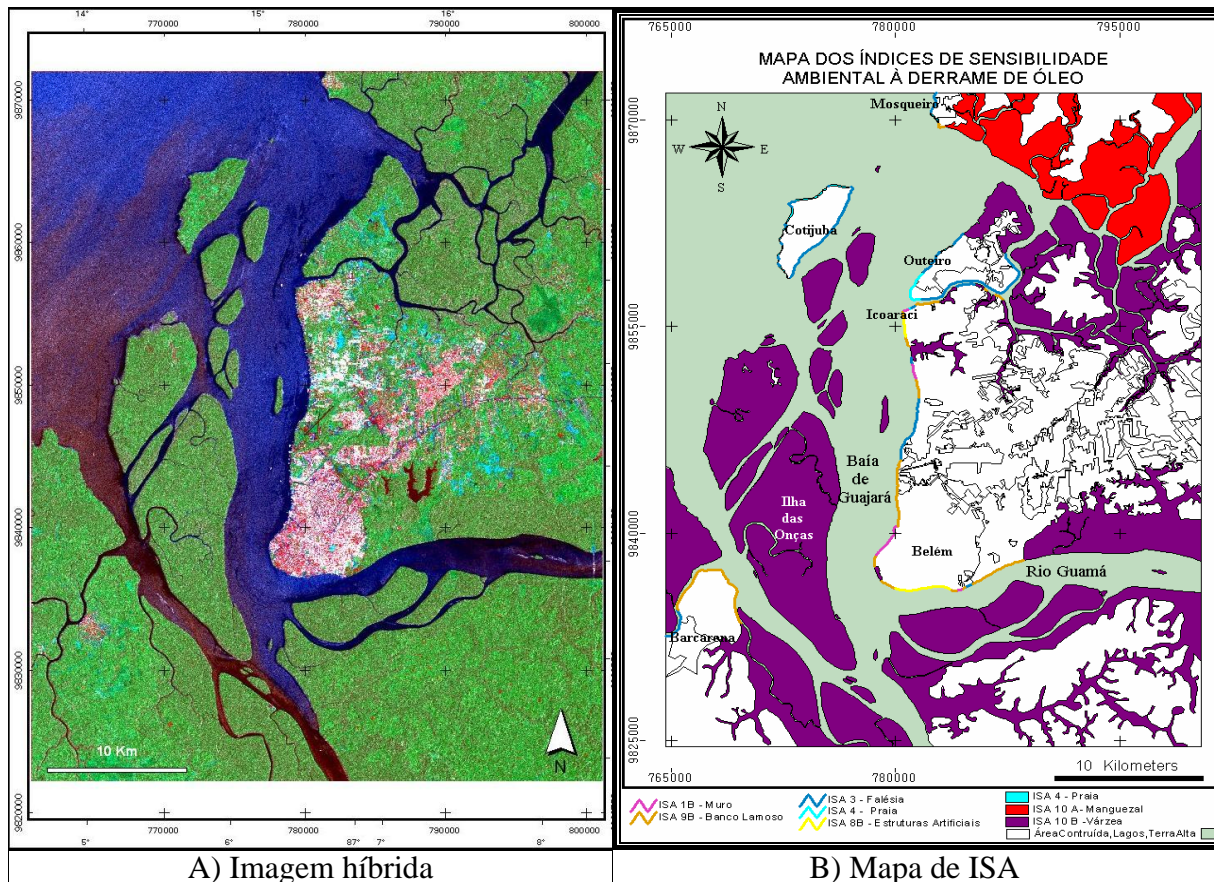


Figura 2- (A) Imagem híbrida gerada pela integração digital da imagem RADARSAT-1 com a imagem LANDSAT-7, através da transformação IHS. (B) Mapa de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo gerado pela interpretação visual do produto híbrido gerado, mostrando os ambientes mais sensíveis a possíveis derramamentos de óleo na zona estuarina amazônica, como também, as principais cidades localizadas na área em estudo.