

**Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP**

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

---

## **CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS RADARSAT-1 E LANDSAT-7 PARA O MAPEAMENTO DOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO NA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA.**

**Fabício Dias Gonçalves, Pedro Walfir Martins e Souza Filho.**

Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Laboratório de Análise de Imagens  
do Trópico Úmido, Av. Augusto Correa 1, CP. 8608, 66075-110, Belém-PA,  
fdias@ufpa.br, walfir@ufpa.br

**Resumo** – Uma rotina de técnicas e procedimentos foi estabelecida para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental (ISA) a derramamentos de óleo, a partir de dados de sensores remotos Landsat ETM+ 7, Radarsat-1 Wide 1, fusão de dados multisensores e sistema de informação geográfica. Desta forma, foram reconhecidas sete unidades de paisagem associadas à terra firme (tabuleiro costeiro com Estruturas Artificiais - ISA 8B e Muro de arrimo - ISA 1B) e aos ambientes sedimentares recentes, bem como, seus ISA (várzea – ISA 10A; Manguezal - ISA 10A; Banco Lamoso Vegetado - ISA 9B; Praia estuarina - ISA 4; Falésia - ISA 3). Estes resultados propiciarão à indústria petrolífera encarar novos desafios tecnológicos na área de segurança operacional e proteção do meio ambiente, destacando a avaliação de risco sócio-ambiental, tecnologias para emergências, monitoramento costeiro e sistemas de informação ambiental.

Palavras-chave: sensibilidade ambiental, sensoriamento remoto, Amazônia.

**Abstract** – A routine of techniques and procedures was established to map environmental sensitivity index (ESI) to oil spill from remote sensing data of Landsat ETM+ 7, Radarsat-1 Wide 1, multi-sensor data fusion and geographic information system. Hence, it was recognized seven landscape units related to high-land (coastal plateaus with artificial structures – ISA 8B and Estuarine wall - ISA 1B) and recent coastal environments, as well as their ESI (flood-plain – ISA 10A; Mangrove; Vegetated muddy banks - ISA 9B; Estuarine beach - ISA 4; Cliff - ISA 3). These results allow to oil industry to see new technologic challengers in the operational security and environmental protection, emphasizing the social-environmental assessment, technology for emergencies, coastal management and environmental information system.

Keywords: environmental sensibility, remote sensing, Amazon.

## 1. Introdução

Os vários casos de derramamentos de óleo ocorridos no mundo têm incentivado os órgãos e entidades envolvidas nestes episódios a aperfeiçoarem cada vez mais os métodos, tanto preventivos como corretivos, para a minimização dos danos gerados por estas ocorrências (Cunha et al., 2004). Dessa forma, a necessidade do monitoramento dessas áreas tem sido expressa pela legislação ambiental vigente (Lei nº 9.996/2000), que exige para certificação ambiental e liberação das atividades relacionadas com a indústria do petróleo, estudos de impacto ambiental (EIA) e planos de emergência. Dentro destas perspectivas, os mapas de sensibilidade utilizados desde a década de 70 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 tomada de decisões sobre a determinação de prioridades de proteção, para os ambientes de maior sensibilidade a derramamentos de óleo (NOAA, 2002).

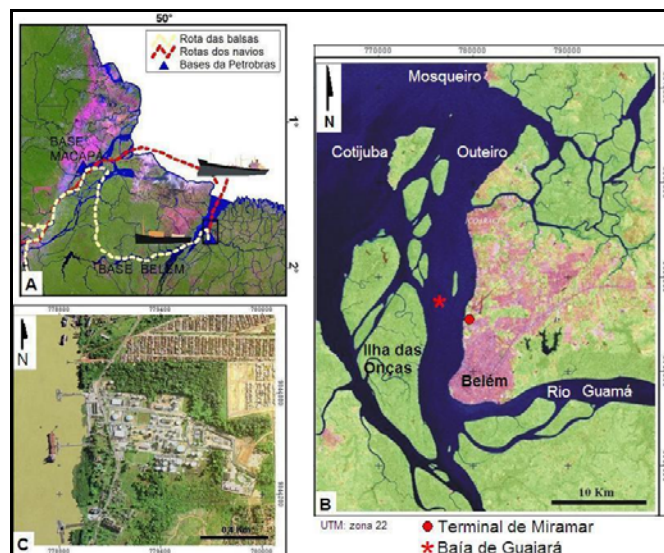
O objetivo deste trabalho é utilizar técnicas de classificação automática de imagens de satélite, para a geração de mapas de índices de sensibilidade ambiental (ISA) a derramamentos de óleo para os ambientes flúvio-estuarinos amazônicos, bem como, comparar estes resultados com a classificação visual. A região da Baía de Guajará (Belém-PA) foi escolhida como área teste, em função de sua importância econômica e social, e ainda, pela localização do Terminal Petroquímico Nicolau Bentes Gomes (MIRAMAR), que apresenta grande atividade de transporte de óleo e derivados na região amazônica, sendo uma fonte potencial para derramamentos de óleo, portanto, passivo de risco ambiental.

## 2. Área de Estudo

A área em estudo está situada na Região Amazônica, que constitui a maior e bem preservada região tropical úmida do planeta (Figura 1). Localizada no norte do Brasil, abrange os estados do Amapá, Pará e Maranhão, onde o principal processo condicionante da dinâmica ambiental é a energia das marés. A Baía de Guajará é uma região tipicamente flúvio-estuarina, situada em um domínio de mesomaré, com variação máxima de 3,8 m.

Na Baía de Guajará concentram-se indústrias e importantes núcleos habitacionais da região metropolitana de Belém com aproximadamente 1,5 milhão de habitantes. Esta área é constituída por ambientes de elevada sensibilidade ao derramamento de óleo, representados por várzeas e rios utilizados pela população local como fonte de subsistência alimentar e econômica (Gonçalves e Souza Filho, 2005).

Dentre as áreas com grande atividade de transporte de derivados de petróleo na Região Amazônica, destaca-se o Terminal Petroquímico de MIRAMAR, onde é predominantemente transportado óleo diesel, GLP (gás de cozinha), querosene para avião, gasolina comum e mistura MF-380. O tráfego de embarcações em MIRAMAR no ano de 2001 foi de 366 navios, movimentando 442.302 toneladas de produtos (informativo CDP, maio/2002), a maior parte destes produtos abastece a Região Metropolitana de Belém e parte do interior do Estado do Pará.



**Figura 1.** localização da área em estudo. A) Áreas de terminais de abastecimento e rotas de transporte na foz do Amazonas. B) Baía de Guajará vista através de imagens Landsat-7 ETM<sup>+</sup>. C) Terminal de Miramar em fotografia aérea de alta resolução.

## 3. Material e Métodos

Foram utilizadas neste trabalho imagens Wide 1 do satélite Radarsat-1 (banda C-HH), órbita descendente e imagem Landsat-7 ETM+, para elaboração de mapas de unidades de paisagem da área estudada. Dessa forma, as imagens Landsat-7 e Radarsat-1 foram ortoretificadas 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. Foi aplicado um filtro “enhanced frost” para redução do “Speckle” na imagem Radarsat-1, simultaneamente ao processo de ortoretificação, o que evita múltiplas reamostragens (PCI Geomatics, 2004). Na imagem Landsat-7 foi feita correção atmosférica pela subtração do pixel escuro, o que permite a diminuição do efeito da atmosfera (Chavez Jr., 1988).

A integração das imagens Radarsat-1 e Landsat-7 foi realizada pela técnica SPC-SAR (Souza Filho e Paradella, 2002). O método usado para classificação dos ambientes quanto aos ISA foi adaptado a partir da metodologia NOAA (2002). Este método é 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.

Para o desenvolvimento dos mapas de ISA é necessária a elaboração de mapas de unidades de paisagem, pois estes descrevem o ambiente no que diz respeito a seus componentes naturais (parâmetros físicos e biológicos) e dos componentes antropogênicos (parâmetros sócio-econômicos relacionando as atividades geradoras de risco) (NOAA, 2002). Assim, foram produzidos mapas de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo, a partir dos mapas de unidades de paisagem gerados pela classificação digital e visual das imagens. Ademais, os diferentes polígonos classificados foram identificados e corroborados pelos trabalhos de campo.

#### 4. Classificação automática dos produtos gerados

O objetivo da aplicação de técnicas de classificação automática é substituir a subjetividade da interpretação visual de imagens, por técnicas automáticas de identificação, que maximizam a extração de informações, de forma mais rápida e precisa. Isso é feito pela aplicação de regras de decisão, que são baseadas nos parâmetros estatísticos das imagens usadas (PCI Geomatics, 2004).

Nesse trabalho, foram usadas técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada, tanto para as imagens Landsat-7 como para o produto híbrido SPC-SAR, buscando avaliar a confiabilidade das técnicas de classificação de imagens de sensores remotos para área em estudo, considerando também, a facilidade e rapidez de geração de mapas de unidades de paisagem e seus respectivos ISA.

O procedimento para classificação das imagens digitais de sensores remotos usado neste trabalho foi executado em três etapas, começando com a delimitação do número de classes de interesse (várzea, terra firme, água e áreas urbanas), para a classificação não-supervisionada e supervisionada. Em seguida, foram delimitados polígonos das áreas de treinamento representativas das classes determinadas anteriormente (somente para classificação supervisionada), e por último, a aplicação de métodos de comparação, em outras palavras, uma avaliação da exatidão do mapeamento. Para a realização das técnicas e procedimentos de classificação foi utilizado o módulo *ImageWorks* e *Focus* do programa PCI Geomatica (PCI Geomatics, 2004). Assim, a técnica de classificação automática não-supervisionada Ioseg (ISODATA) foi aplicada nas bandas espectrais 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do Landsat-7 ETM+, enquanto que, no produto híbrido gerado, imagem SPC-SAR, foi utilizado o classificador K- médias (*K-means*). Além disso, tanto as imagens LANDSAT-7, quanto à imagem híbrida gerada, foram submetidas a uma classificação supervisionada usando o algoritmo da Máxima Verossimilhança - MAXVER (*Maximum Likelihood*).

Após esse primeiro passo foi feita uma etapa de pós-classificação para os produtos supervisionados e não-supervisionada. Nesta etapa foram realizadas uma edição e agregação de classes, tentando resolver possíveis confusões e erros de classificação, e por último, foi aplicado um filtro de moda com janela 3x3 com intuito de homogeneizar as classes geradas, resultando numa imagem com melhor aspecto para o usuário final. O processo de classificação automática esta sujeito a erros, devido à qualidade dos dados usados e dos métodos empregados, por isso, foi necessário realizar um procedimento para avaliação da acurácia do mapeamento, o que permitiu a quantificação dos erros, valorizando assim, a qualidade do mapeamento, justificando a confiabilidade e praticidade do método (Jensen, 1996).

Para a avaliação da acurácia do mapeamento, 100 pontos de referência foram distribuídos estocasticamente sobre a área estudada e comparados com a verdade terrestre, auxiliado pela experiência do analista e quando necessário um mapa de referência interpretado por Gonçalves e Souza Filho (2005). Ademais, foram calculadas as matrizes de confusão, que mostraram o percentual de pixels que foram mapeados de forma correta, e ainda, foi usado o índice *Kappa* usado na avaliação da concordância entre a verdade terrestre e o mapa temático gerado pela classificação (Congalton, 1991).

#### 5. Resultados e Discussão

As técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada usadas, tanto para a imagem LANDSAT-7 como para o produto híbrido gerado (SAR/ótico), foram de grande valia, considerando a acurácia e rapidez do

mapeamento das unidades de paisagem. Tais classificações foram avaliadas quanto à exatidão das classificações produzidas e sumarizadas segundo o índice *Kappa* na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação Resultado do teste *Kappa* para a classificação automática das imagens LANDSAT-7 e produto híbrido SPC-SAR e os conceitos das classificações.

Classificação	Índice Kappa	Desempenho da classificação
LANDSAT-7 (Isoseg)	0.816	Excelente
Imagem SPC-SAR (K-média)	0.602	Muito Bom
LANDSAT-7 (MAXVER)	0.774	Muito Bom
Imagem SPC-SAR (MAXVER)	0.729	Muito Bom

O método de amostragem aleatória é o mais apropriado para medir a acurácia dos mapeamentos gerados, pois avalia globalmente o resultado das classificações de unidades de paisagem na área. A análise estatística através dos cálculos da matriz de confusão, estatística *Kappa* e índice de exatidão geral, apontam bons desempenhos para as técnicas de classificação automática usadas, permitindo medir a boa acurácia dos mapeamentos automáticos realizados, como também, corroborando a rapidez e confiabilidade desses procedimentos para o mapeamento das unidades de paisagem na área, o que é a base para a confecção de mapas de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo (ISA), em um pequeno intervalo de tempo, dada a automação dos procedimentos.

As matrizes de confusão, estatística *Kappa* e índice de exatidão geral referentes às classificações automáticas utilizadas neste trabalho, que obtiveram os melhores índices Kappa para o Landsat-7 e para a imagem integrada, são mostradas nas Tabelas 2 e 3. Dessa forma, a matriz de confusão é usada para avaliar o resultado da classificação, mostrando quantitativamente os pixels classificados de forma correta, a partir da comparação da verdade terrestre (dados de referência) com a classificação produzida.

Tabela 2. Matriz de confusão gerada para a classificação não supervisionada ISOSEG da imagem LANDSAT-7 (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7), destacando as amostras que foram classificadas corretamente (diagonal principal).

Classificado	Dado de Referência				Σ Linha	Comissão (%)
	Várzea	Terra Firme	Área Urbana	Água		
Várzea	<b>36</b>	4	2	0	42	14.3
Terra Firme	4	<b>16</b>	3	0	23	30.0
Área Urbana	0	0	<b>9</b>	0	9	0
Água	0	0	0	<b>26</b>	26	0
Σ Coluna	40	20	14	26	100	
<b>Omissão (%)</b>	10.0	20.0	35.7	0		
Índice Kappa = 0.816					Exatidão geral = 87/100 = 87%	

Tabela 3. Matriz de confusão gerada para a classificação supervisionada MAXVER da imagem LANDSAT-7 (bandas 1,2,3,4,5,7).

Classificado	Dado de Referência				Σ Linha	Comissão
	Várzea	Terra Firme	Área Urbana	Água		
Várzea	<b>36</b>	6	1	0	43	16.3
Terra Firme	3	<b>14</b>	3	0	20	30.0
Área Urbana	1	0	<b>10</b>	2	13	23.0
Água	0	0	0	<b>24</b>	24	0
Σ Coluna	40	20	14	26	100	
<b>Omissão (%)</b>	10.0	30.0	28.6	7.7		
Índice Kappa = 0.774					Exatidão geral = 84/100 = 84%	

Para a matriz de confusão da Tabela 2, os componentes da diagonal principal representam os pixels que foram classificados de forma correta, por exemplo, para classe várzea no mapa temático classificado, foram corretamente classificados 36 pixels, no entanto, 4 pixels classificados como várzea, na verdade quando observados os dados de referência pertencem à classe terra firme e dois pixels que também foram classificados como várzea, pertencem à classe áreas urbanas. Portanto, dos 42 pixels da classe várzea, 36 pixels (85 %) foram bem classificados, enquanto que, 6 pixels foram mal classificados (14 %). Este erro de classificação é chamado de erro de inclusão ou comissão, dado que, se incluem pixels em uma classe quando na realidade pertencem à outra classe.

Dentre os 14 pixels da classe área urbana, 9 foram classificados corretamente (64 %), 2 foram classificado como várzea (14%) e 3 pixels foram classificados como terra firme (21 %). Esse erro de classificação é chamado de erro de omissão, pois pixels pertencentes à classe área urbana foram atribuídos a outras classes (Tabela 2).

A partir dos produtos classificados, os mapas de unidades de paisagem foram produzidos automaticamente levando-se em conta os dados de campo. A classificação que apresentou o melhor índice Kappa para o Landsat-7 (Figura 2A), e ainda, o melhor índice Kappa para o produto integrado (Figura 2B), pôde ser comparado com o mapa de unidades de paisagem interpretado visualmente por Gonçalves e Souza Filho (2005) (Figura 3A).

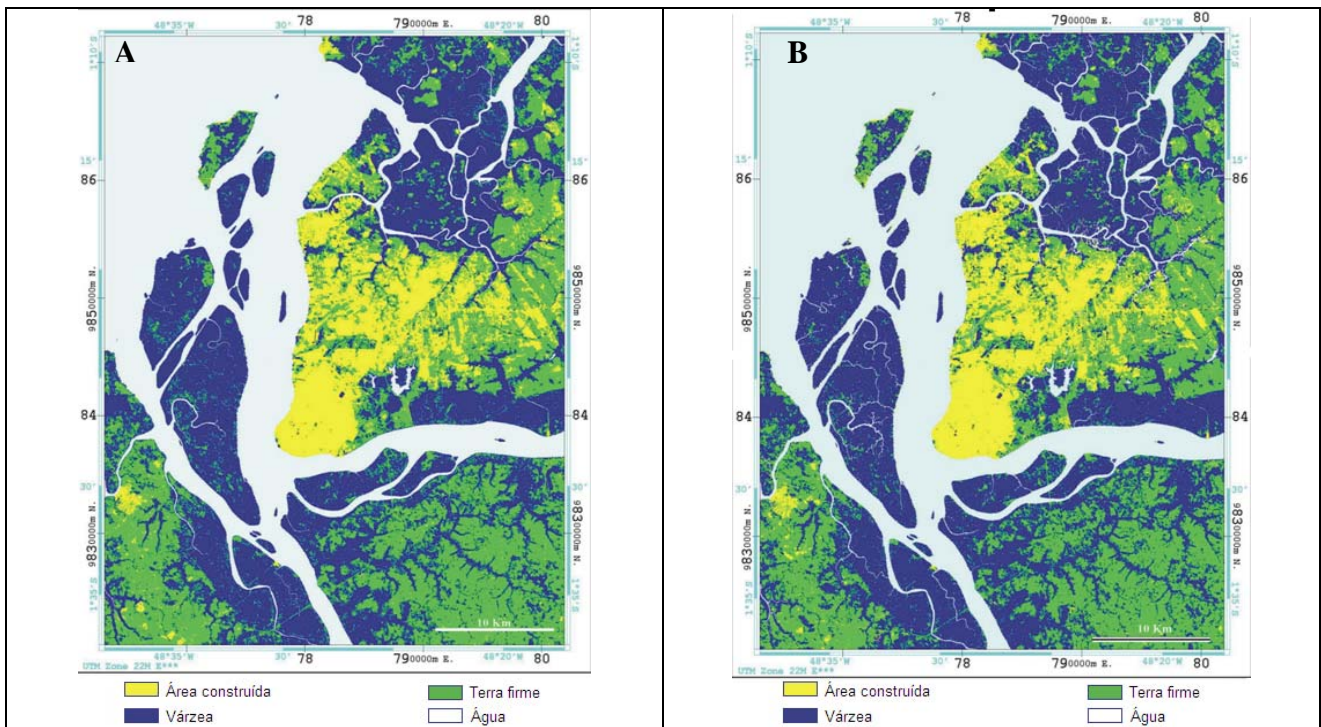


Figura 2. Mapa de Unidades de Paisagem gerado pela classificação automática não-supervisionada, que obteve o melhor índice *Kappa*, usando: A) o algoritmo de classificação Iseg (ISODATA), nas imagens LANDSAT-7 (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7); B) algoritmo de classificação MAXVER nas imagens integradas SPC-SAR.

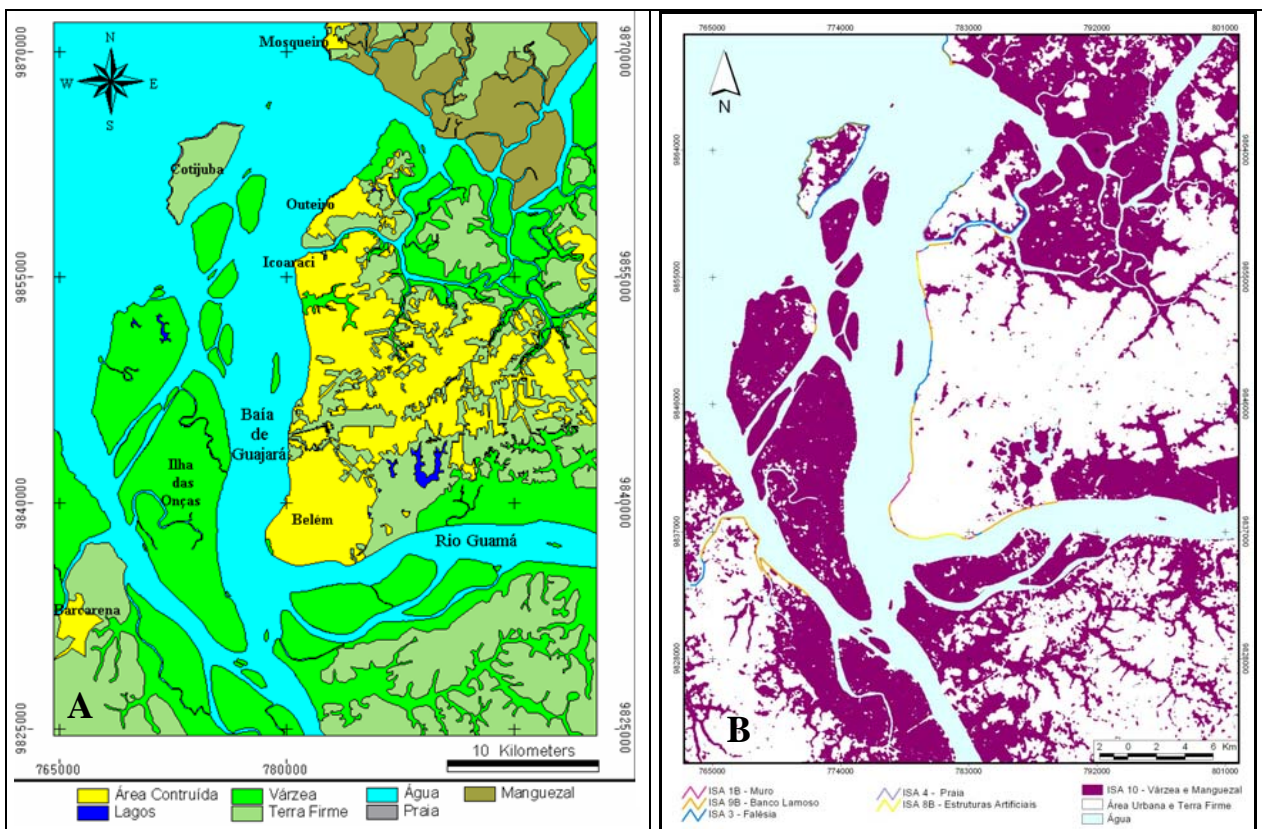


Figura 3. Mapas gerados. A) Mapa de Unidades de Paisagem elaborado a partir da interpretação visual do produto integrado, pan x mult do LANDSAT-7; B) Mapa de ISA elaborado pela classificação automática não-supervisionada,

que obteve o melhor índice *Kappa*, usando o algoritmo de classificação Ioseg (ISODATA), a partir das imagens LANDSAT-7.

A partir da interpretação dos produtos gerados pelo processamento digital de imagens e classificação, aliados com as informações de campo, foram identificados sete índices de sensibilidade ambiental (ISA) ao derramamento de óleo, na área estudada. 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. A Figura 3B mostra o mapa de índices de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo elaborado a partir do mapa de unidades de paisagem gerado pela classificação automática não-supervisionada das imagens Landsat-7.

## 6. Conclusões

Técnicas de classificações supervisionadas e não-supervisionadas mostraram ser importantes, em função da facilidade e rapidez para o mapeamento das unidades de paisagem, obtendo resultados confiáveis, num pequeno intervalo de tempo, subsidiando dessa forma, a elaboração de cartas de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo. Além disso, em situações emergenciais em áreas cujas variáveis ainda não são bem conhecidas, a agilidade no procedimento é chave para uma estratégia de resposta eficaz preliminar, com a proteção dos ambientes ameaçados e mitigação dos danos gerados. Doravante, é possível estender os principais resultados obtidos neste trabalho para outras áreas da costa amazônica, a partir da rotina de procedimentos aqui traçada para o mapeamento e identificação dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo, objetivando dessa maneira, um maior grau de conhecimento da região.

## 7. Agradecimentos

O primeiro autor agradece a 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).

## 8. Referências

- 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, 1988.
- CONGALTON, R. A review of assessing the accuracy of classification or remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, v. 37, p. 35- 45, 1991.
- CUNHA, E.R.S.P.; SOUZA FILHO, P.W.M.; MIRANDA, F.P.; SALES, M.E.C.; LANDAU, L. O Projeto Piatam Mar e a gestão ambiental e social da zona costeira amazônica. In: *Rio Oil & Gás Expo and Conference 2004*. Rio de Janeiro, Brasil: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, out., 2004.
- GONÇALVES, F.D.; SOUZA FILHO, P.W.M. 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). In: *XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Goiânia, Brasil, abril, 2005.
- 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.. *Introductory digital image processing - A remote sensing perspective*. Prentice Hall: New Jersey, second edition, 1996.
- NOAA. PETERSEN, J; MICHEL, J; ZENGEL, S.; WHITE, M.; LORD, C.; PLANK, C. *Environmental sensitivity index guidelines*, NOAA: Seattle. Version 3.0. 89p, 2002.
- PCI GEOMATICS. *Geomatica: User Manual*. PCI geomatics, Version 9.1, 129p, 2004.
- SOUZA FILHO, P.W.M., PARADELLA, W.R., W.R. 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.