## DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO E DE GEOPROCESSAMENTO PARA APOIO AOS PLANOS DE CONTINGÊNCIA DURANTE EVENTOS DE DERRAMAMENTOS DE ÓLEO EM REGIÕES COSTEIRAS: O CASO DO LITORAL NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

# SÁVIO LUIS CARMONA<sup>1,2</sup> DOUGLAS FRANCISCO MARCOLINO GHERARDI<sup>1</sup> MOYSES GONSALEZ TESSLER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil {savio, douglas}@ltid.inpe.br

<sup>2</sup>IOUSP - Universidade de São Paulo Praça do Oceanográfico, 191 - 05508-900 - São Paulo - SP, Brasil mgtessle@usp.br

Abstract. The north São Paulo State coast is characterized by a number of fragile ecosystems such as sandy beaches, rock shore, tidal flats, and mangroves. In the south portion of this coastline it is located one  $\boldsymbol{\sigma}$  the largest Petrobrás crude oil terminal. This area is considered to be of high risk for oil spill with a known historic of accidents dating back to the 70's. This paper presents preliminary results on the merging of digital image products and historic oil spill events data, which includes: a thematic base map derived from digital integration of spectral and panchromatic bands of ETM+ based on the use of IHS Transformation and geodatabase modeling of historic oil spill events attributes using Geographic Information System (GIS) technology for rapid access and query. This procedure has been successfully used to map oil sensitive environments and highlights the potential for operational use of remote sensing data and GIS in contingency planning and assessment of oil spill effects on a tropical environmental.

Keywords: remote sensing, geodatabase, oil spill, São Paulo State.

### 1. Introdução

Diversos episódios envolvendo derramamento de óleo na região costeira do litoral norte do Estado de São Paulo têm sido relatados desde a década de 70. A grande maioria é proveniente da lavagem clandestina de tanques e de operações rotineiras dos petroleiros. Recentemente, em 2001, uma falha durante a manobra do navio petroleiro Virginia 2 que se deslocava da Bacia de Campos para o Porto de São Sebastião, foi responsável pelo vazamento de 86 mil litros de óleo cru. Diversas praias e costões rochosos ao longo do canal de São Sebastião, e uma área de mangue na planície de Caraguatatuba, foram contaminadas pela mancha de óleo. A intensa movimentação de petroleiros no terminal de armazenamento de petróleo da Petrobrás no canal de São Sebastião confere uma constante situação de risco aos ecossistemas costeiros.

Os impactos causados à zona costeira como conseqüência da contaminação por óleo comprometem não só a integridade da paisagem natural, como também as atividades econômicas, os investimentos realizados pela sociedade, e o sustento das comunidades humanas locais. A ruptura de processos ecológicos, a obliteração e asfixia de habitats e organismos se somam aos prejuízos financeiros advindos da suspensão repentina de atividades econômicas e perda de equipamentos. A persistência do óleo nas praias arenosas e em sistemas internos abrigados das ondas, como estuários e canais, contribui para o agravamento do cenário da poluição.

Dessa forma, torna-se fundamental a elaboração de planos de contingência efetivos para o controle e combate da poluição por óleo, auxiliando as equipes de emergência para minimizar os impactos ambientais. O uso dos produtos e técnicas de sensoriamento remoto tem se mostrado de grande importância para a localização e o mapeamento dos principais recursos sensíveis (Jensen et al., 1990; Jansen et al., 1993). Os sistemas de informações geográficos - SIG vêm sendo incorporados como ferramentas de grande potencial para a tomada de decisão durante eventos de óleo no meio marinho. O armazenamento em um sistema de informação geográfica e sua interface de consulta com uma base de dados relacional permite um rápido procedimento de consulta dos atributos sobre os diferentes recursos, sua visualização, identificação e atualização. Este trabalho apresenta alguns resultados preliminares obtidos por uma rotina de processamento digital de imagens ETM+ do Landsat 7 para o mapeamento das praias, costões e sistemas internos, e a geração de um banco de dados geográficos (BDG) dos principais eventos de poluição por óleo. Estes procedimentos são parte da analise contextual para a modelagem do Banco de Dados da Sensibilidade Ambiental à poluição por óleo – BDG SAO, da zona costeira do Estado de São Paulo.

## 2. Área de Estudo

O litoral norte do Estado de São Paulo caracteriza-se pela presença da Serra do Mar que se projeta em direção ao Oceano Atlântico, encerrando planícies costeiras bastante restritas. A linha de costa é recortada por diversos esporões rochosos, predominando enseadas e praias de bolso, além de inúmeras ilhas e ilhotas, onde se destaca a ilha de São Sebastião (Ilhabela) com 336 km<sup>2</sup>. Esta ilha encontra-se separada do continente pelo canal de São Sebastião com 25 km de extensão e largura que varia de 6 a 7 km nas entradas até 2 km na parte central (**Figura 1**).

O canal abriga um dos mais importantes terminais petrolíferos do país o Duto e Terminais do Centro Sul – DTCS, da Petrobrás. A presença deste terminal resulta em uma constante movimentação de petroleiros, operações de limpezas dos tanques e operações de carga e descarga, que representam as principais situações de risco para a poluição por óleo, desde a década de 70 (Cetesb, 1996).



**Figura 1** - Linha de costa do litoral norte do Estado de São Paulo com imagem em detalhe do canal de São Sebastião e foto de navios petroleiros no DTCS.

#### 3. Materiais e Métodos

Foi utilizada uma imagem órbita/ponto 218/76 obtida pelo sensor ETM+ do Landsat 7 em 11/08/2000. Mapas geológicos e geomorfológicos em escala regional (Ross e Moroz, 1997), e mapas dos ecossistemas costeiros, em escala local (Cetesb, 1999), foram os principais dados auxiliares utilizados para a interpretação dos temas. Os dados foram interpretados e armazenados no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas SPRING, desenvolvido pelo INPE.

O enfoque da modelagem do BDG-SAO é baseado no modelo de dados em geoprocessamento Geo-OMT (Borges, 1997), visando atingir os níveis de abstrações conforme proposto por Câmara (1995). Neste trabalho serão abordadas apenas duas etapas desta modelagem: o modelo de dados do processamento da imagem orbital e o modelo de dados da representação espacial e consulta dos atributos dos eventos de derramamentos de óleo no litoral norte (**Figura 2** e **3**).



**Figura 2** – Modelo de dados Geo-OMT do processamento digital da imagem Landsat e geração do mapa base.

Inicialmente, as bandas espectrais foram corrigidas radiométricamente visando atenuar o efeito da atmosfera, via modelo 6S (Vermote et al., 1997) e as distorções relativas ao sensor, a partir do uso da técnica de restauração (Fonseca et al., 1993). Durante a restauração, o tamanho de *pixel* das bandas espectrais (30 m) e da banda pancromática (15 m) foram reamostrados para 15 e 5 metros, respectivamente. Este procedimento teve como objetivo aumentar a definição dos alvos, realçando contornos e bordas. As bandas espectrais foram corrigidas geometricamente segundo uma projeção UTM SAD69. Para a integração das bandas espectrais (15 m) com a banda pancromática (5 m) foram utilizadas duas composições RGB: bandas 453, selecionada via critério IOF (Chavez et al., 1982), e bandas 321, conforme proposto por (Carper et al., 1990; Edwards e Davis, 1994). A integração foi baseada na técnica da Transformação IHS (*Intensity, Hue, Saturation*), onde no espaço IHS, a banda pancromática de maior resolução espacial foi utilizada para modular o canal de intensidade. Um realce linear foi aplicado sobre os produtos finais maximizando o conjunto de informações para processo de interpretação visual.

O mapeamento dos temas foi realizado por edição vetorial a partir da interpretação visual sobre os produtos integrados. Durante este processo foram definidos 8 temas: 1) mangue, 2) embasamento, 3) planície costeira, 4) praia, 5) costão rochoso, 6) água (hidro), 7) área urbana,

e 8) acesso. Cada tema foi mapeado e editado em um plano de informação (PI) diferente, conforme a sua representação geométrica: polígonos e linhas. Após a edição vetorial os temas foram agrupados em um mesmo PI denominado de mapa base.



**Figura 3** – Modelo de dados Geo-OMT para a modelagem dos atributos dos eventos de óleo no litoral norte do Estado de São Paulo no BDG-SAO.

O esquema de dados dos eventos de derramamento de óleo foi elaborado a partir das informações cadastradas pela Cetesb (1996). Nestes trabalhos foram feitos levantamentos dos principais atributos dos diversos eventos de poluição por óleo, ocorridos desde a década de 70 até o ano de 2000. Dados de praias atingidas, tipo e volume de óleo vazado, duração do evento, deslocamento da mancha, dados meteorológicos predominantes, entre outros, foram armazenados em forma de tabelas relacionais e associados com as entidades espaciais. Os dados de morfologia praial e de seus atributos estão sendo atualizados através de visitas à área de estudo. Este esquema é condicionado pela modelagem contextual do comportamento do óleo nos ambientes costeiros visando representar o nível de abstração do mundo real, ou seja, a sensibilidade dos ambientes costeiros à poluição por óleo em um ambiente de SIG.

#### 4. Resultados e Discussão

Com o processamento da imagem ETM+ Landsat 7 foi possível realçar e mapear as feições geomorfológicas e antrópicas relevantes à determinação da sensibilidade ambiental ao impacto por óleo. As feições mais importantes identificadas foram:

- 1) pequenos bosques de mangues preservados principalmente no setor sul do litoral norte, região da Boracéia Guaratuba;
- 2) bancos arenosos/lamosos junto a barra do Juqueriquerê;
- planície de maré, próxima a desembocadura do rio Juqueriquerê, na região abrigada pelo morro da Serra do Dom;
- 4) delta de maré em desenvolvimento junto a desembocadura do rio Juqueriquerê;
- 5) costões rochosos ao longo da linha de costa, definindo enseadas e praias; e,
- 6) estruturas antrópicas como marinas, portos e o terminal petrolífero no canal de São Sebastião.

O realce destas feições reflete o bom desempenho das técnicas utilizadas para a obtenção dos produtos finais. A correção atmosférica foi fundamental para melhorar o contraste e o brilho da imagem. O processo de restauração se mostrou uma ferramenta potencial para a obtenção de imagens com melhor definição dos alvos, realçando contornos e bordas. A integração no espaço IHS forneceu produtos nos quais, as informações texturais e espectrais dos

alvos foram otimizadas em um único produto. As **Figura 4** e **5** representam os produtos integrados ETM3,2,1-Pan e ETM4,5,3-Pan com 5 metros de resolução e os mapas dos principais temas interpretados, respectivamente.



**Figura 4** – Produto integrado das bandas ETM3, 2, 1 com a banda pancromática e os principais temas mapeados.

Quanto ao desempenho isolado dos produtos integrados, a integração ETM3,2,1 com a banda pancromática forneceu um maior realce e definição de feições lineares, como as estradas, área urbana, estruturas antrópicas e o segmento da linha de costa (Figura 4). Este produto também apresentou uma boa eficiência no mapeamento das praias, e de feições decorrente da ação hidrodinâmica sobre a linha de costa, relacionadas às zonas de arrebentação e de *surf*. Além das feições acima realçadas, o produto ETM4,5,3 com a banda pancromática apresentou um melhor desempenho no realce da vegetação, principalmente no que se refere a diferenciação das áreas cobertas por vegetação de mangue (Figura 5). Isso demonstra a necessidade do uso combinado destes produtos para a interpretação visual, no sentido de adquirir as melhores informações de cada um.



**Figura 5** – Produto integrado das bandas ETM 4,5,3 com a banda pancromática e os principais temas mapeados.

Através da espacialização dos eventos de derramamento de óleo no Canal de São Sebastião dentro do BDG-SAO é possível visualizar o histórico de diversos eventos, suas causas, tipo e volume do óleo vazado, praias atingidas, condições meteorológicas durante o evento, etc. Uma série de consultas sobre estes dados permite a visualização de diferentes cenários do tipo: 1) a concentração dos eventos no TEBAR como resposta às falhas operacionais durante o transbordo do óleo e a defeitos nas válvulas de fundo dos navios; 2) tendência de contaminação das praias que se localizam ao longo dos setores Ilhabela norte e continente norte como resposta das características hidrodinâmicas do canal; 3) deslocamento das manchas para os setores de Ubatuba, no caso dos grandes acidentes (volume vazado acima de 1000 m<sup>3</sup>), condicionado pelas forcantes meteorológicos e hidrodinâmicas.

A **Figura 6** representa a visualização das praias (representadas por pontos) que foram atingidas por um dos maiores eventos de vazamento de óleo no litoral norte, conhecido como operação TEBAR V. O rompimento do oleoduto que faz a ligação entre o Terminal de São Sebastião e a Refinaria Presidente Bernardes, em Cubatão, resultou no vazamento de aproximadamente 2700 m<sup>3</sup> de óleo. A mancha de óleo inicial foi detectada nas proximidades da praia Brava, região de Maresias, e espalhou-se conforme a ação do padrão de circulação do canal. Durante o período de 20 dias, esta mancha se deslocou e se fragmentou em diversas manchas que atingiram várias praias e costões rochosos até a região de Ubatuba. A **Tabela 1** representa os principais atributos deste evento. A **Figura 7** representa um procedimento de consulta das praias mais próximas ao ponto inicial do vazamento e alguns de seus atributos.

<mark>⊯ Tebela: pontosvazil</mark>									
DATA CAUSA									
1	19940515	rompimento do oleoduto OSBAT, o produto escoou por valas naturais							
0									
演 rabeta. pomosyazit									
Arquivo Mostrar Ajuda									
	TIPO_OL		VOLU_VAZ	OPERACAO	DURAC				
1	Sergipano terra		2700.0000000	TEBAR V	20				
0				0					

Tabela 1 – Atributos	cadastrados o	da operação	TEBAR	V
----------------------	---------------	-------------	-------	---

State Strategistered	and the state of	P40					ALC: N
Basis Life Cdp	party in	ete dest	1000	10000	111111	The second se	
● 新聞 M (P) (**) II NUMBER (*** II III N + N) H (N)	10 C	TOTAL LAN	NOR ITA	1127	tere wa	[]arrae is	
	1 100	AND	15.2645	18.	Marki	198.000	
	1.000	1000000	14/14/97	196	Permit/Act	199509	
	1 200	Stars	- Statistics	10	10em	1669%2	
	4 100	Cebe Tarts	58/564781		Sakitak	1190525	
	4	See.	38/54##		(apro)	14900	
	1 200	Earth	18-falates	195	Deserve	Nik met	
	1 200	Engris Hain	Res.	- 20	Ergenie officen	Win text.	
	1 200	fame:	Union	10	list.	Ma rev	
	4 128	See.	Te leaster	18	See 2	1860/18	
	11 275	(Falsons)	Usees	120	Baritulate	The case	
Contraction of the second s	(1) 200	the days.	(Palely	14	Burber	Nik bend.	
A DECEMBER OF THE OWNER	N. 1880	do in term	(faire	7	Belleciden	1999/02	
Martine N. Steal W. C. C. C.	11 200	Photo State State	Unese	12	BLANCOST.	188224	
BEAUTION AT A STATE OF	14 Dec.	148	MMR.	191	108	19900	
State of the second	- H - [240	Mangelo-	Separate	15	Ad-apoint.	10000	
	4. 28	Date: 1		10	Sec. 10.0	18505	
	171 (00)	Taxas:	- Degelation	91	Tuhura-	19AES	
	N	First Mideo	Page 1	14	Patra Malia	19962	
The second se	11 200	Pease	inese	R. 1	Press	resize.	
	34 · 128	Politika Dec	Th beatly	20.	Pprintik Dar	LAND D	
	21.200	Travitana .	· Steletalds	10	1002010	No. 101	
	21 200	free	10-bladb	Mr.	Pale	196523	
Press And Contraction of the Con	23 28	lais limit:	Table -	0	(and or the	Nik and	
	100 T						
	1.1						
	224 888						
							_
					-		
				_			
						1	
A DECK AND A DECK	with the lot of the				Street Street		
and the second s	and story of	CONTRACTOR OF THE OWNER.	and the second second	I shield manual	I when the lot of the	the second second second second	STREET, STREET

**Figura 6** – Visualização das praias atingidas durante o evento de vazamento de óleo TEBAR V, no ano de 1994, e alguns de seus respectivos atributos.



**Figura 7** – Praias localizadas dentro de um raio de 10 km do ponto inicial do acidente (pontos em amarelo = praias; ponto em vermelho = local do vazamento).

O armazenamento, representação e recuperação das entidades e atributos dos eventos de vazamento de óleo em um SIG são de fundamental importância aos planos de contingência à poluição por óleo. Os cenários possíveis de serem consultados permitem a elaboração de estratégias e ações a partir de um conhecimento *a priori* das seguintes características: (a) inventario das características geomorfológicas da linha de costa; (b) condições climáticas dominantes; e, (c) histórico dos eventos de derramamento de óleo. Os resultados mostram o grande potencial do uso das ferramentas de geoprocessamento para analises pré-evento em área de risco e na tomada de decisão durante um evento de derramamento de óleo.

### 5. Conclusões

- O uso da técnica de restauração e da transformação IHS foi eficiente para a geração de produtos com maior detalhamento das diversas feições geomorfológicas e antrópicas da região costeira, aumentando a precisão da interpretação visual.
- 2) O uso combinado dos dois produtos foi fundamental para potencializar o mapeamento dos temas relativos a sensibilidade ambiental a poluição por óleo.
- 3) A disponibilidade e acesso de dados de eventos históricos de derramamento de óleo armazenados em um SIG, de forma compreensiva, podem ajudar a identificar e avaliar as opções de respostas viáveis durante a tomada de decisão e a elaboração de um plano

gestor para as áreas de grande risco, como por exemplo, na região do canal de São Sebastião.

#### Referências

Borges, K. *Modelagem de dados geográficos: uma extensão do modelo OMT para aplicações geográficas.* (Mestrado) - Escola de Governo, Fundação João Pinheiro, Belo Horizonte, 1997, 128p.

Câmara, G. *Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos.* Tese. INPE – São José dos Campos, 1995, 242p.

Carper W.J.; Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. The use of Intensity – Hue – Saturation Transformation for merging SPOT Panchromatic and multispectral image data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v.56, n.4, p. 454-467, 1990.

Cetesb. Dinâmica dos vazamentos de petróleo no canal de São Sebastião, São Paulo, 1996. 120p.

Cetesb. *Mapeamento dos Ecossistemas Costeiros do Estado de São Paulo*, São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 1999, 103p.

Chavez Jr., P.; Berlim, G.L.; Sowrs, L.B. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photografic Engineering*, n. 8, p. 23-30, 1982.

Edwards, K.; Davis, P. A. The use of Intensity-Hue-Saturation Transformation for producing color shaded-relief images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 60, n. 4, p.1360-1374, 1994.

Fonseca, L.M.G.; Prasad, G.S.S.D.; Mascarenhas, N.D.A. Combined interpolation-restoration of Landsat images through FIR filter design techniques, *International Journal of Remote Sensing*, v. 14, n.13, p. 2547-2561, 1993

Jensen, R. J.; Ramsey, E. W.; Holmes, J.M.; Michel, J.; Savitsky, B.; Davis, B. Environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil spills using remote sensing and geographic information system technology. *International Journal of Geographic Information System*, v.4, n.2, p. 181-201, 1990.

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

Rozz, J.L.S.; Moroz, I.C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo, São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1997, 65p.

Vermote, E.F.; Tanre, D.; Deuze, J.L.; Herman, M.; Morcrette, J.J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview, *IEEE Transactions in Geosciences and Remote Sensing*, vol. 35, n. 03, p. 675-686, 1997.