

Monitoramento ambiental de áreas costeiras e oceânicas com múltiplos sensores orbitais

Cristina Maria Bentz¹
Alexandre Tadeu Politano¹
Patrícia Genovez²

¹ PETROBRAS/CENPES - Centro de Pesquisas
Cidade Universitária, Q.7, Ilha do Fundão – 21949-900 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
{cris.politano.gorceix}@petrobras.com.br

² PETROBRAS/Exploração & Produção – Controle de Contingências
Av. Amaral Peixoto, 11000, Imboassica - 27913-350 - Macaé - RJ, Brasil
genovez_salvaterra@petrobras.com.br

Abstract. Since May 2001 PETROBRAS is using spaceborne multi-sensor remote sensing for its sea surface monitoring program at the Campos, Santos and Espírito Santo basins, southeastern Brazilian coast. Ocean color (SeaWiFS and MODIS), thermal infrared (NOAA/AVHRR), scatterometer (QuikSCAT) and Synthetic Aperture Radar (RADARSAT-1 and ASAR/ENVISAT) data were integrated in order to detect and characterize different sorts of marine pollution and meteo-oceanographic phenomena. The near real time processing and delivery of the SAR data allowed the timely *in-situ* verification and sampling of the remotely detected events. The integrated analysis of these dataset presents an important decision tool for emergencies, as well for the elaboration of contingency plans and evaluation of the oil industry activity impacts.

Palavras-chave: orbital remote sensing, sensor synergy, synthetic aperture radar, ocean monitoring, sensoriamento remoto orbital, sinergia de sensores, radares de abertura sintética, monitoramento oceânico.

1. Introdução

Os hidrocarbonetos na forma de óleo são uma das principais fontes de energia para o mundo industrializado contemporâneo, estando desigualmente distribuídos ao redor do mundo. As maiores reservas podem estar longe das áreas onde o consumo é maior. Assim, tempo e recursos consideráveis são gastos no transporte de grandes quantidades de óleo através de embarcações ou dutos por longas distâncias na terra ou mar. Além do transporte, durante a exploração e produção de petróleo há sempre algum risco de acidente.

As regiões de plataforma continental e talude contêm alguns dos ecossistemas mais complexos e especializados com alto grau de sensibilidade a intervenção humana. A interação de complexos processos físicos e bioquímicos inter-relacionados, assim como a grande variabilidade da escala espacial e temporal dos fenômenos oceânicos apresentam desafios para o monitoramento ambiental eficiente destas regiões.

Com a crescente disponibilidade de satélites comerciais operando na faixa das microondas, o uso de imagens orbitais tem sido uma alternativa para otimizar o monitoramento de extensas áreas oceânicas e costeiras (Wahl et al., 1994 e 1996; Mendoza et al., 2003), apresentando vantagens quando comparado às observações localizadas de navios e aeronaves, ou mesmo ao uso de sensores aeroportados. Radares instalados em satélites são capazes de cobrir grandes extensões simultaneamente, podendo adquirir imagens durante o dia ou à noite, não sendo afetados pela cobertura de nuvens. As imagens geradas fornecem dados com resolução espacial suficiente para a detecção de uma série de ocorrências ambientais. O processamento e entrega das imagens em tempo quase real de alguns sistemas, viabiliza o uso desta tecnologia para orientar verificações de campo e ações de contingenciamento, quando necessário (Staples e Hodgins, 1998; Bentz e Miranda, 2001).

O mecanismo físico que permite a detecção de ocorrências ambientais com imagens de radar é a atenuação diferencial de ondas centimétricas (*Bragg Waves*), geradas pela ação do vento na superfície do mar. Modificações nas propriedades da camada superficial oceânica,

naturais ou devido à presença de poluentes; processos atmosféricos que controlam as condições do vento ou processos oceânicos que modulam diretamente as ondas *Bragg*, produzem assinaturas prontamente detectáveis por imagens de radar (Clemente-Colón e Yan, 2000). A interpretação de imagens de radar não é trivial visto que mais de um processo pode ocorrer simultaneamente e diferentes fenômenos produzem feições semelhantes, de difícil discriminação. Uma série de ambigüidades, inerentes ao processo de formação das imagens, pode induzir a interpretações equivocadas.

A PETROBRAS tem utilizado verificações de campo realizadas com helicópteros e informações meteo-oceanográficas, derivadas de sensores operando em diferentes faixas do espectro eletromagnético para auxiliar a interpretação das imagens de radar (Bentz et al., 2003). Sensores que operam no visível mostram variações da cor do oceano, oferecendo informações sobre a carga de sedimento em suspensão e fenômenos biogênicos associados à produção de clorofila ou florescimentos de algas. Radiômetros operando no infravermelho termal podem indicar a localização de frentes oceânicas, meandros e plumas de ressurgência. Escaterômetros permitem o acesso a informações superficiais de velocidade e direção do vento, essencial para a interpretação das feições das imagens.

2. Áreas Monitoradas

A área do monitoramento localiza-se na plataforma continental e talude das bacias de Campos, Santos e Espírito Santo, margem continental do sudeste brasileiro (**Figura 1**). A principal feição oceanográfica na região é a Corrente do Brasil (CB), com fluxo orientado de NE para SW durante a maior parte do ano. No entanto, a presença de meandros e vórtices de mesoescala pode induzir grandes variações no fluxo predominante (Stech et al., 1996). A porção principal da plataforma continental é dominada pelas Águas Costeiras (AC; $33 < S < 33.7$ e $4 < T < 21^{\circ}\text{C}$). Frequentes eventos de ressurgência induzida pelo vento são observados de setembro a abril, principalmente na bacia de Campos, associados à intrusão costeira da Água Central Atlântico Sul (ACAS; $34.5 < S < 36$; $6 < T < 20^{\circ}\text{C}$). Na quebra da plataforma e talude a massa d'água superficial é denominada Águas Tropicais (AT; $S > 36$ e $T > 20^{\circ}\text{C}$).

3. Metodologia

Os principais produtos utilizados no monitoramento são as imagens dos radares de abertura sintética a bordo dos satélites RADARSAT-1 e ENVISAT. As imagens são adquiridas nos modos de operação *ScanSAR Narrow A e B* e *Extended Low 1* do RADARSAT-1, e no modo *Wide Swath* do sensor ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) a bordo do ENVISAT. Tais modos apresentam ângulos de incidência e larguras de faixa mais efetivos para o monitoramento oceânico.

Os dados meteo-oceanográficos auxiliares incluem: cartas de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) obtidas de dados AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), a bordo dos satélites NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*); cartas de concentração clorofila-a derivados dos sensores SeaWiFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*), do satélite Orbview 2 e do sensor MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) dos satélites Terra/Aqua. Cartas de direção e intensidade dos ventos são produzidas a partir de dados do escaterômetro SeaWinds a bordo do satélite QuikSCAT. A **Tabela 1** apresenta as principais características dos sensores utilizados.

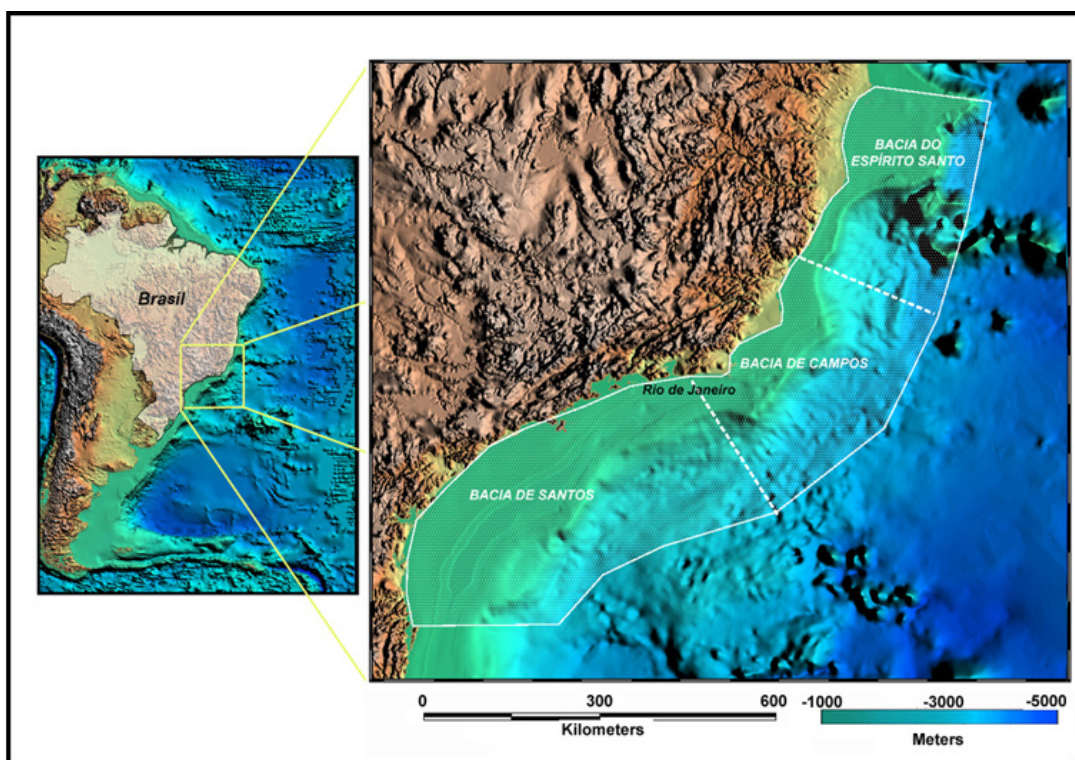


Figura 1. Localização da área do monitoramento.

Sensor/Satélite	Resolução (m)	Largura de Faixa (km)	Tempo de Revisita
SAR/RADARSAT-1	8-100	50-500	Variável
ASAR/ENVISAT	30-150	100-400	Variável
SeaWiFS/ORBVIEW-2	1100	2200	24 h
MODIS/TERRA E AQUA	500-1000	2300	24 h
AVHRR/NOAA	1100	2200	6 h
Seawinds/QuikSCAT	25000	1800	6 h

Tabela 1. Principais características dos sistemas sensores utilizados.

O programa de monitoramento envolve a recepção e processamento em tempo quase real dos dados orbitais, análise integrada e verificações *in situ* (Figura 2). Os satélites têm diferentes horários de passagem, não sendo possível a aquisição simultânea dos produtos utilizados. O tempo de disponibilização dos dados varia, dependendo da existência de antena receptora para a descarga dos dados e de estações de processamento. Para a maioria dos produtos meteo-oceanográficos há disponibilidade de antenas receptoras e estações de processamento no país. O mesmo não ocorre com os dados RADARSAT-1 e ENVISAT/ASAR, que levam atualmente aproximadamente seis horas para serem disponibilizados, no caso do RADARSAT-1 e mais de doze horas no caso do ASAR/ENVISAT. Apesar destas limitações, procura-se utilizar o conjunto de dados adquiridos com a menor diferença de tempo. Os dados são entregues via *File Transfer Protocol* (FTP) por diferentes fornecedores. A integração dos dados orbitais com informações meteo-oceanográficas e dados contextuais é realizada com o auxílio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Quando necessárias verificações *in situ* para a aquisição de amostras e registro fotográfico são realizadas.

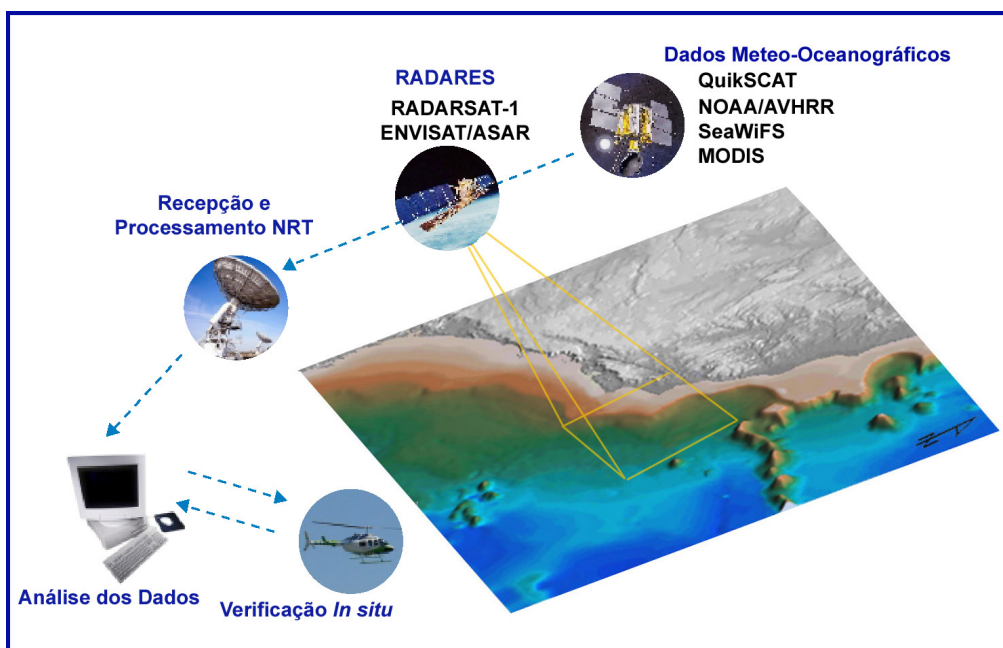


Figura 2. Etapas do monitoramento.

4. Resultados

Normalmente nas imagens de radar as principais feições são áreas escuras provocadas pela redução local do retroespalhamento do pulso emitido. A análise do tamanho, forma, textura e contexto espacial destas áreas de baixo retroespalhamento é fundamental para a inferência do fenômeno causador. Por exemplo, a **Figura 3** apresenta feição associada a descarte de óleo a partir de um navio em movimento. Este tipo de evento provoca feições alongadas conforme a trajetória do navio, que com o passar do tempo são espalhadas pela ação do vento, formando terminação na forma de pena em uma das bordas da mancha. Neste exemplo pode-se inferir que a trajetória do navio era no sentido SW, uma vez que a porção NE da mancha está mais espalhada, pelo vento com intensidade média de 5 m.s^{-1} e direção 85° , quase perpendicular à direção principal da mancha.

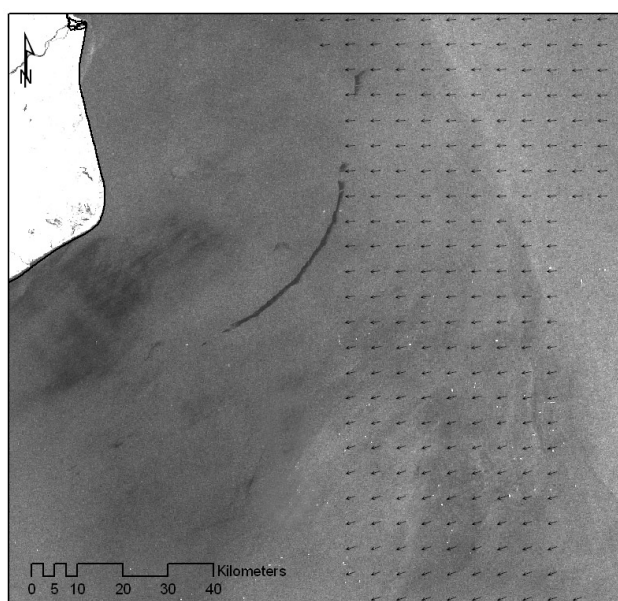


Figura 3. Imagem RADARSAT-1 descendente (16/08/2002 - 08:10 GMT), com setas representativas da direção do vento (QuikSCAT) sobrepostas.

A análise da imagem de radar da **Figura 4A** revela a presença de três feições de baixo retroespalhamento (I, II e III) e outras áreas escuras, com contornos difusos. O campo de ventos (**Figura 4B**) mostra valores que variam entre 3 e 6 m. s⁻¹, vindos de Leste. De acordo com Staples e Hodgins (1998) a capacidade de detecção das imagens de radar depende da presença de condições de vento adequadas ($3\text{m.s}^{-1} < \text{intensidade do vento} < 8\text{m.s}^{-1}$). Observa-se claramente na imagem de radar (**Figura 4A**) a influência das condições de vento. A forma das feições I e II estava sendo controlada pela direção do vento (90°). Uma região de baixo retroespalhamento, acima do Cabo de São Tomé é coincidente com uma área de baixa de vento local (**Figura 4B**).

A comparação com os dados de TSM (**Figura 5A**) mostra variações no retroespalhamento causadas por diferenças na temperatura da camada superficial oceânica. Tais variações podem ser geradas por mudanças na estabilidade da camada limite marinha e indiretamente devido a maior viscosidade e produtividade biológica, normalmente associada às águas mais frias. Frentes oceânicas são zonas de convergência que tendem a acumular filmes naturais ou poluentes, permitindo a observação do padrão de circulação superficial (Gagliardini et al., 2001). A comparação dos dados SAR com os de TSM indica que provavelmente a feição III (**Figura 4A**) é causada por uma célula convectiva, visto que há nuvens no local (**Figura 5A**). Células convectivas podem produzir áreas de baixo retroespalhamento devido à atenuação das ondas Bragg pelo impacto dos pingos de chuva e devido à atenuação atmosférica (Clemente-Colón e Yan, 2000). Na carta de concentração de clorofila-a (**Figure 5B**), valores mais altos são detectados sobre a plataforma. Na direção das águas mais profundas, os valores de clorofila-a decrescem e aumentam subitamente na região coincidente com a feição I da imagem de radar (**Figura 4A**). A interpretação conjunta dos dados SAR, TSM e de concentração de clorofila-a indicam que esta feição foi causada por florescimento de algas, associada ao aumento da produtividade biológica na superfície do oceano. Alguns tipos de algas flutuam na forma de extensos agregados, prontamente detectáveis nas imagens de radar. Dados de campo confirmaram a interpretação.

5. Conclusões

A utilização de dados de sensores remotos orbitais tem demonstrado grande eficiência para o monitoramento sistemático de grandes extensões oceânicas, fornecendo uma visão sinótica de diferentes fenômenos meteo-oceanográficos e associados à atividade antrópica.

Os radares de abertura sintética disponíveis comercialmente permitem a aquisição de imagens quase diárias, independentemente das condições meteorológicas ou de iluminação, com resolução espacial efetiva para a detecção de fenômenos em diversas escalas. Imagens com resolução baixa à média, adquiridas por sensores que operam no visível e infravermelho termal; assim como dados de escaterômetros, permitem a identificação dos diferentes processos físicos-químicos e biológicos responsáveis por variações do retroespalhamento nas imagens de radar de mais alta resolução.

O uso de vários sensores, com diferentes larguras de faixa, resoluções espaciais e temporais constitui uma abordagem de observação efetiva para integrar fenômenos oceânicos de larga, média e pequena escala. Esta sinergia também oferece oportunidades para se efetivar o uso de dados de sensores remotos em sistemas de predição, combinados a medições *in situ* e modelos numéricos de alta resolução.

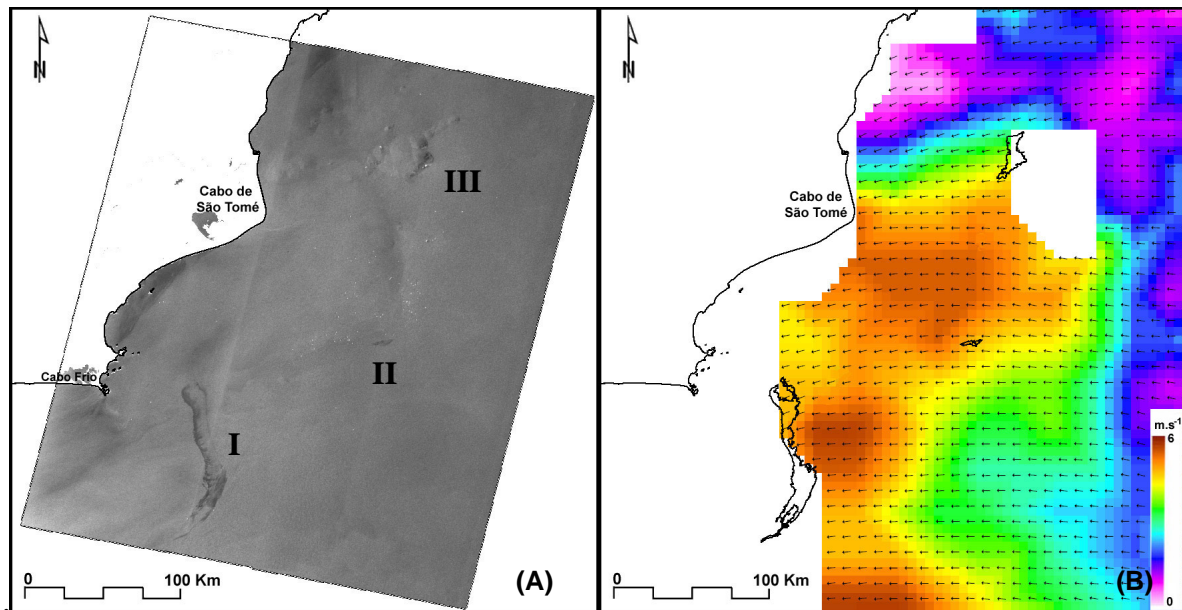


Figure 4. (A) Imagem RADARSAT-1 *ScanSar Narrow B* descendente (15/10/2001, 08:23 GMT) com as principais feições (I, II, e III) observáveis. (B) Velocidade (cores) e direção do vento (setas) QuikSCAT (15/10/2001, 09:03 GMT) com os polígonos das principais feições observáveis na imagem de radar

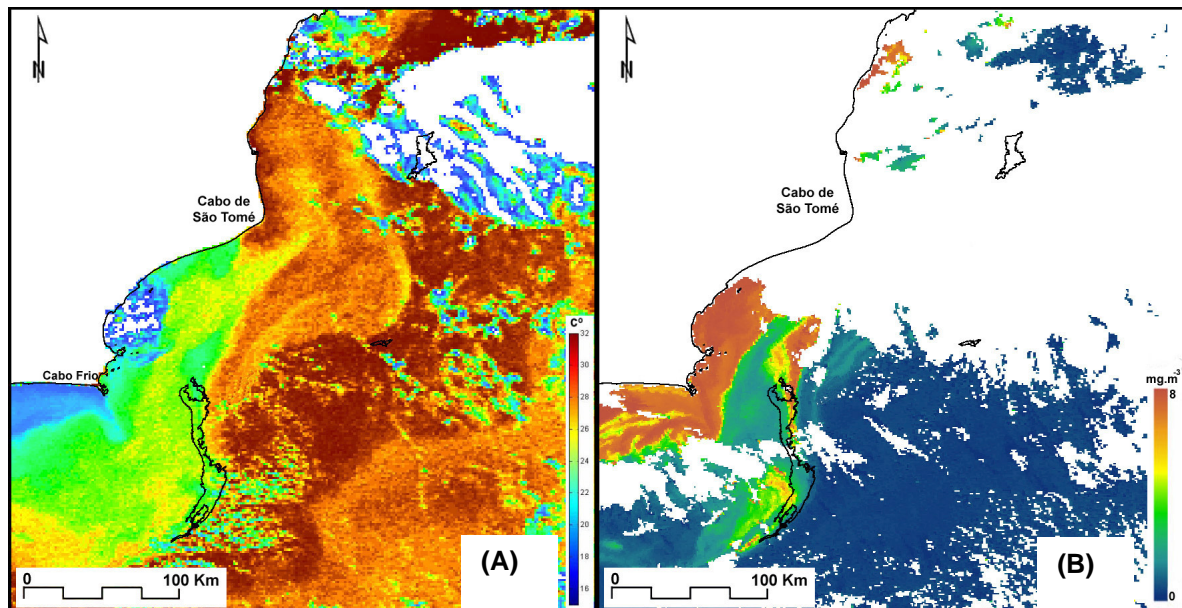


Figure 5. (A) Temperatura da Superfície do Mar (NOAA/AVHRR - 15/10/2001 - 08:03 GMT) e (B) carta de concentração de clorofila-a (SeaWiFS - 15/10/2001 - 14:05 GMT) com os polígonos das feições observáveis na imagem de radar.

Referências

- Clemente-Colón, P.; Yan, X. Low-Backscatter Ocean Features in Synthetic Aperture Radar Imagery, **Johns Hopkins Applied Technical Digest**, v. 21, p. 116-121, 2000.
- Bentz, C. M.; Lorenzetti, J.A.; Kampel, M. Multi-sensor synergistic analysis of mesoscale oceanic features: Campos basin, South-eastern Brazil. **Proceedings, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2003)**, Toulouse, June, 2003, IEEE, Piscataway, USA.

Bentz, C.M.; Miranda, F.P. Application of Remote Sensing Data for Oil Spill Monitoring in The Guanabara Bay, Rio De Janeiro, Brazil. **Proceedings, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2001)**, Sydney, June, 2001, IEEE, Piscataway, USA.

Gagliardini, D.A.; Clemente-Colón, P.; Bava, J., Milovich, J.A.; Frulla, L.A. Complementary use of SAR and thermal IR observations in the Brazil-Malvinas confluence region. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 27, p. 643-650, 2001.

Mendoza, A.; Pedroso, E. A.; Beisl, C.H.; Caceres, R.G.; Miranda, F.P.; Bannerman, K.; Welgan, P.; Castilli, O.L. Operational application of RADARSAT-1 for the monitoring of natural oil seeps in the South Gulf of Mexico. **Proceedings, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2003)**, Toulouse, June, 2003, IEEE, Piscataway, USA.

Staples, G.C.; Hodgins, D.O. RADARSAT-1 emergency response for oil spill monitoring. **Proceedings, Fifth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments**, CA /USA, October, 1998.

Stech, J.L.; Lorenzetti, J.A.; de Souza, J.M.C.; Araujo, C.E.S. A mesoscale Brazil Current eddy observed through AVHRR images and current meter moorings. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. Vol. XXXI, Part B7. Vienna, p. 650-653, 1996.

Wahl, T.; Skely, Á.; Pedersen, J. Practical use of ERS-1 SAR images in oil spill pollution monitoring. **Proceedings, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'94)**, vol. 4, IEEE, Piscataway, USA, pp. 1954-1956, 1994.