

## Detecção e classificação de exsudações de hidrocarbonetos *off-shore* por espectroscopia e sensoriamento remoto

Talita Lammoglia<sup>1</sup>  
Carlos Roberto de Souza Filho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP  
Caixa Postal 6152 – 13083-970 - Campinas - SP, Brasil  
{talita.lammoglia, beto}@ige.unicamp.br

**Abstract.** Remote sensing has been a key tool for oil monitoring and new discoveries based on offshore seepages detection. This work aims to study a seepage event that occurred at the Campos Basin (RJ – Brazil) and was recorded by an optical sensor: the Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). A theoretical detection model indicates that (i) oil and ocean water spectral responses in the VIS-NIR-SWIR-TIR interval differ and that (ii) there are dissimilarities on oil appearances depending on its thickness, exposition time, emulsification stage, environmental conditions and imaging geometry. For the study area, it is shown that emissivity, brightness and kinetic temperature values over sea sectors with thicker oil films are smaller than the surroundings areas lacking in oil. Quimiometric models using Principal Component Analysis and Partial Least Square Regression allowed an unprecedented remote characterization of oils qualitatively by satellite. The ASTER data was processed through Spectral Angle Mapper, Mixture Tuned Matched Filtering and Linear Spectral Unmixing, as well as by an unsupervised neural-network system. The last two techniques allowed not only oil detection, but also separation of thicker/thinner oil films. This work demonstrated the potential of ASTER data, quimiometric models, and spectral-spatial methodologies for low-cost offshore exploration and qualitative characterization of hydrocarbons.

**Palavras-Chave:** hydrocarbon, seeps, ocean, ASTER, VNIR/ SWIR /TIR, chemometrics, neural network, MTMF/SAM/Unmixing, hidrocarbonetos, exsudações, oceano, quimiometria, redes neurais.

### 1. Introdução

O petróleo é constituído por uma mistura de componentes químicos orgânicos (hidrocarbonetos) que pode ser classificado com base no grau API, viscosidade, teor de enxofre ou quantidade relativa dos componentes. Os sistemas petrolíferos em sub-superfície não são completamente selados e permitem o escape natural de hidrocarbonetos (HCs) em terra (*on-shore*) e no mar (*off-shore*), os quais são denominados exsudações. As imagens orbitais, que possibilitam a visão sinóptica de extensas áreas, facilitam a detecção e monitoramento das exsudações no mar. Importantes resultados são obtidos com uso de dados de radares e fluorosensores, principalmente quando integrados com outros tipos de dados de sensoriamento remoto. Todavia, não há um sistema único para caracterização de exsudações com imagens orbitais.

Considerando todos os esforços até hoje realizados para detecção de exsudações ou vazamentos de petróleo *off-shore*, nenhuma abordagem fez uso integrado de feições espectrais dos hidrocarbonetos considerando simultaneamente comprimentos de onda do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR), infravermelho de ondas curtas (SWIR) e infravermelho termal (TIR), bem como das propriedades óticas do óleo, sensíveis aos sensores óticos orbitais. Com o advento do sensor multiespectral ASTER, pela primeira vez na história do sensoriamento remoto orbital, foi possível o acesso a dados multiespectrais também no TIR, com razoável resolução espacial (90m) e cobertura global. Este sensor, em associação com técnicas atualmente disponíveis para caracterização espectral dos HCs, tornou possível o preenchimento de uma lacuna na literatura sobre detecção *off-shore* de exsudações.

Frente a este panorama, o presente trabalho buscou avanços na caracterização qualitativa de óleo exsudado e registrado por uma cena ASTER considerando a composição química dos óleos (i.e. API, viscosidade, etc). A detecção e mapeamento de exsudações nessa área focal calçaram-se nas técnicas *Spectral Angle Mapper* (SAM), *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF), *Linear Spectral Unmixing* (LSU) e redes neurais não-supervisionadas aplicadas aos dados ASTER.

## 2. Área de Estudo

Em novembro de 2004 uma extensa exsudação foi registrada pelo sensor/satélite ASTER/Terra. Esta exsudação, selecionada para estudo, situa-se sobre a bacia sedimentar de Campos, a maior província petrolífera em operação no Brasil, que se localiza na plataforma continental e talude da margem continental do sudeste brasileiro, entre a costa norte do RJ e ES. A principal feição oceanográfica na região é a Corrente do Brasil (CB), com fluxo preferencial orientado de NE para SW durante a maior parte do ano (Stech *et al.* 1996). Vale ressaltar que Bentz *et al.* (2007) e outros, discutem, numa abordagem diferente da aqui apresentada, a detecção de exsudações na Bacia de Campos dentro do projeto FITOSAT (PETROBRAS & INPE).

## 3. Modelo Teórico de Detecção

As exsudações ou vazamentos de HCs que ocorrem no mar podem se espalhar, frações leves podem evaporar, se dispersar, emulsificar, passar por oxidação fotoquímica e biodegradação, a depender dos fatores ambientais (i.e. agitação da água) e do tipo de óleo. Estes processos interferem diretamente na resposta espectral do tipo de óleo exsudado, muitas vezes camuflando suas propriedades físico-químicas e feições espectrais (CEDRE 2004). Considerando estas variáveis, um modelo teórico de detecção de óleo *off-shore* foi aqui estabelecido:

Resposta espectral do petróleo e da água. No espectro do visível, o óleo tem maior reflectância que a água, mas apresenta tendências de absorção limitadas e não específicas. No intervalo do NIR-SWIR, as feições diagnósticas devem-se principalmente às ligações Carbono-Hidrogênio (C-H, C-H<sub>2</sub> e C-H<sub>3</sub>), grupos hidroxila (O-H), ligações duplas e triplas de asfaltenos e aromáticos, grupos carboxila (C=O), éteres (C-O-C), grupos amino (N-H) e outros grupos orgânicos. No intervalo da janela atmosférica do termal (8-14 μm) observa-se essencialmente a variação do patamar de emissividade entre a água do mar e os óleos, uma vez que os óleos têm menor emissividade que a água (**Figs. 1a e 1b**).

Propriedades físico-químicas e diferença no tempo e distribuição da exsudação. Segundo Lammoglia & Souza Filho (2009): (i) é possível diferenciar espectralmente os tipos de óleo (i.e. leves ou pesados) sobre água; (ii) as feições espectrais características do óleo começam a ser registradas somente com camadas de óleo de espessura igual ou maior que ~20 μm sobre a água do mar, (iii) é possível identificar as principais feições de absorção do óleo quando o mesmo está emulsificado com a água. Para o intervalo do TIR registrou-se que mesmo espessuras bastante finas (i.e. <15 μm) mostram feições espectrais diagnósticas de HCs (i.e. 3,3 e 3,5 μm e próximo de 6,8 μm). Já as feições entre 4 e 6 μm são camufladas quando o óleo está sobre a água. Para a janela atmosférica (8 – 14 μm) observa-se um patamar constante de emissividade menor que a água. Em paralelo, Tseng & Chiu (1994) apontam que a temperatura aparente da superfície com óleo de espessura maior que 500 μm é 2-4°C superior à temperatura aparente da água. Esta variação deve-se a maior absorção da luz solar do óleo em relação à água, a despeito da menor emissividade do óleo. O óleo, em relação à água, apresenta menor condutividade, maior

absorção, maior capacidade calorífica e baixa inércia termal; conseqüentemente, nota-se maior variação da temperatura entre o dia e a noite para os óleos do que para a água (Grierson 1998).

Condições ambientais e geometria de imageamento. A presença do óleo exsudado na água amortece as ondas capilares causadas pelo vento através de um fenômeno conhecido como “*damping*” (Hühnerfuss *et al.* 1986), que provoca variação na quantidade de luz refletida por regiões com/sem presença de filmes de óleo.

Efeitos meteorológico-oceanoográficos e óleo biogênico. Óleos de origem biogênica, produzidos por peixes e pelo plâncton, podem produzir efeito semelhante ao dos óleos petrogênicos (Hühnerfuss *et al.* 1986). Diferente dos óleos petrogênicos/minerais (HCs), óleos de origem biogênica costumam ter expressão temporal maior e sua forma quase nunca é discreta, limitada e alongada. Ademais, podem mostrar assinatura espectral de algas/fitoplânctons associada, tal como assinatura de clorofila e alto de reflectância no intervalo NIR (Berry & Prost 1999), as quais podem ser detectadas pelo sensor ASTER (**Fig. 2b**). Os óleos minerais, ao contrário do biogênico, mostram-se com a mesma cor, independente da composição colorida para o intervalo do VIS, pois neste intervalo o óleo mineral (HCs) têm apenas um patamar constante de baixa reflectância, sem mínimos e máximos relativos.

#### **4. Materiais & Pré-Processamento**

Para este trabalho, a cena do sensor ASTER foi obtida em 23/nov/2004, às 12:55 hs e cobre uma área de aproximadamente 60 x 60 km. Os dados foram requisitados à NASA em nível de processamento 1B, bem como os produtos AST\_04 (temperatura de brilho), AST\_05 (emissividade) e AST\_08 (temperatura cinética) (Abrams *et al.* 2002). Para esta pesquisa contou-se também com a caracterização e dados/modelos espectrais e dados do SeaWinds. O SeaWinds a bordo do satélite QuikSCAT é um tipo de radar especializado para medidas da velocidade do vento e direção em qualquer situação climática (QuickSCAT 2007). Dados gerados por este radar mostram que, na data de aquisição da imagem ASTER, a velocidade dos ventos era de 10 nós.

##### **4.1. Pré-Processamento VNIR-SWIR**

O primeiro passo incluiu a correção do efeito de *cross-talk* (Iwasaki *et al.* 2001), seguido da correção atmosférica e conversão dos dados ASTER para reflectância na superfície, utilizando-se o software *Atmospheric Correction Now* (ACORN), baseado no modelo atmosférico MODTRAN-4 (Imspec 2001). Previamente à aplicação dos métodos para caracterização da exsudação no mar, é necessário descartar a possibilidade de origem biogênica do óleo. Para tal, foram efetuadas duas composições coloridas com as bandas ASTER 321 e 211 em RGB, tal como indicado no modelo teórico. Não foram observados indícios tonais de origem biogênica em nenhum setor do recorte da cena ASTER investigada. Considerando adicionalmente a forma da macha na cena e a existência de uma região a partir da qual a mesma se origina, não dúvida que se trata de uma exsudação de óleo petrogênico.

##### **4.2. Pré-Processamento TIR**

Uma superfície irradia energia proporcionalmente a sua temperatura e emissividade. O processamento para cálculo e separação da emissividade e temperatura é possível a partir do algoritmo ASTER TES aplicado aos dados de radiância da superfície ( $L_{s\lambda}$ ) (Gillespie *et al.* 1998). Após o pré-processamento para intervalo do infravermelho termal coberto pelo sensor ASTER (8-12  $\mu$ m), foi possível o cálculo da temperatura cinética da água. Os resultados indicam que a temperatura da água do mar está entre 24°-25 °C, a temperatura da água trazida pelo vórtice da corrente do Brasil varia entre 23°-24 °C e a temperatura nos setores com filmes de óleos mais

esessos varia entre 21,8°-23 °C. Este resultado é contrário ao que se espera considerando-se o modelo teórico e propriedades físico-químicas do óleo. No entanto, tal como relatado por Tseng & Chiu (1994) e Fingas e Brown (1998), este efeito pode ser observado quando o óleo tem espessura entre 100-300µm ou 50-150µm sobre água do mar, respectivamente.

Para o intervalo de 8 a 12 µm, com base em dados experimentais, um filme de óleo apresenta emissividade entre 0,94-0,96, enquanto a água do mar apresenta emissividade entre 0,97-0,98. Para a área de estudo, os dados remotos mostram valores de emissividade entre 0,984-0,992 para o filme de óleo, enquanto a água pura mostra valores entre 0,992-0,998 (**Fig. 5**). Percebe-se que a diferença de emissividade entre a área com filme de óleo e a água limpa observada na cena ASTER é mais sutil que a diferença observada em laboratório.

## 5. Métodos

### 5.1. Análise de Componentes Principais (ACP)

Medidas espectrais de laboratório tornaram possível a caracterização de diversas amostras de HCs de bacias produtoras brasileiras (Lammoglia & Souza Filho 2009). Estes dados e a análise de componentes principais permitiram a geração de modelos para caracterização qualitativa das amostras de HC, bem como de novas amostras (ou espectros) que venham a ser inseridos nos modelos. Tal feito foi possível considerando que a ACP possibilita a redução de um grande número de variáveis espectrais a poucas variáveis ortogonais e contribui para análise exploratória dos espectros de reflectância (Davis 2002). Estes modelos indicam também que os modelos construídos com espectros re-amostrados para o sensor ASTER igualmente permitem caracterização qualitativa dos óleos.

### 5.2. Classificação Espectral

A classificação espectral compreende a comparação entre a assinatura espectral de cada pixel da imagem, ou seja, de composição desconhecida, com a assinatura espectral de materiais de referência (*endmembers*). Muito embora desenvolvida para dados específicos, a classificação espectral do tipo hiperespectral pode ser adaptada para dados multiespectrais de mais alta resolução espectral, como é o caso dos dados do ASTER, preferencialmente convertidos para reflectância. A classificação dos dados foi realizada com base em (i) *endmembers* de referência derivados de locais específicos de alta concentração de HCs na própria cena; (ii) *endmembers* de HCs medidos em laboratório.

A classificação propriamente dita foi efetuada pelos algoritmos *Spectral Angle Mapper* (SAM) (Kruse *et al.* 1993), *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF) (Boardman *et al.* 1995) e *Linear Spectral Unmixing* (LSU) (Boardman 1992). A técnica SAM compreende uma classificação supervisionada na escala do pixel, calculada com base na similaridade entre o espectro de cada pixel na imagem e os espectros de referência (*endmembers*). O algoritmo determina a similaridade entre os dois espectros através do cálculo do ângulo entre os mesmos. A técnica *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF) é uma classificação espectral na escala do subpixel, ou seja, é um algoritmo que procura nos pixels da imagem as abundâncias dos espectros de referência. Para tal, este algoritmo utiliza-se de uma “desmistura” parcial através de um filtro (*Matched Filtering*) de coincidência, que maximiza a resposta dos espectros de referência conhecidos (*endmembers*), ao mesmo tempo em que minimiza a contribuição de um *background* desconhecido. A técnica *Linear Spectral Unmixing*, tal como o MTMF, trabalha na escala do sub-pixel, baseada no princípio de que cada pixel (escala macroscópica) é o resultado da combinação linear de todos os *endmembers* que compõem o pixel. Nos casos em que os

*endmembers* são conhecidos, tal como em situações de exsudação no mar (espectros de água e óleo somente), a abundância entre eles pode ser calculada para cada pixel com base no espectro do próprio pixel.

### 5.3. Classificação por Redes Neurais

Redes neurais (RNs) representam um sistema computacional *data driven*, paralelo, distribuído e inspirado no raciocínio humano. São compostas por unidades dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por *links* associados a pesos indicativos da força de cada conexão, com o objetivo de reconhecer padrões ocultos nos dados. As RNs são bastante apropriadas para o reconhecimento de padrões e para classificação de dados espaciais. Isso é devido à sua habilidade em extrair padrões ocultos em conjuntos de dados, muitas vezes imperceptíveis aos humanos e às técnicas estatísticas tradicionais, e a capacidade de analisar dados sem nenhum conhecimento prévio sobre a sua distribuição (Brown *et al.* 2000). Neste trabalho, a classificação digital por RNs tem por objetivo reconhecer padrões em pixels da cena ASTER da área de estudo, considerando a resolução espectral de 14 bandas e a resolução espacial de 15 metros

As RNs permitem que os dados ASTER sejam processados na sua forma bruta (1B), pré-processada, ou como produtos finais (e.g., produtos L2: AST\_04, AST\_05 e AST\_08). Na prática, para classificação por RNs, utilizou-se o programa GeoXplore (Looney & Yu 2000), que trabalha em combinação com o software ArcSDM ([www.ige.unicamp.br/sdm](http://www.ige.unicamp.br/sdm)) e ArcGIS. Selecionada a área estudo e mascarando-se a parte da cena com cobertura de nuvens, foram então gerados dois conjuntos de dados ASTER, um com 14 bandas (VNIR+SWIR+TIR) e outro com 9 bandas (VNIR+SWIR). A classificação foi realizada no *GeoXplore* pelo sistema de *Agrupamento Fuzzy (Fuzzy Clustering)*. Este sistema de classificação não supervisionada por RNs é bastante rápido e não utiliza pontos de treinamento, pois o agrupamento é feito exclusivamente a partir dos dados. O próprio sistema auto-organiza os dados em classes com valores similares e um vetor tipo protótipo é computado para cada classe. Quando um vetor de atributos desconhecido é colocado no sistema, o mesmo é atribuído a uma classe com o protótipo mais próximo (Looney & Yu 2000).

## 6. Resultados

### 6.1. Análise de Componentes Principais (APC)

Foram processadas 6 CPs, onde a CP1, CP2 e CP3 representam 70, 21 e 4% da variância dos dados, respectivamente. Observando os resultados (**Fig. 5**), percebe-se que o modelo permitiu a discriminação entre espectros de óleos com maior ou menor grau API, tal como indicado pela reta vermelha. Os espectros acima da linha (i.e. A e D) são óleos leves e menos viscosos, enquanto os espectros abaixo da linha indicam óleos mais pesados e viscosos (i.e. E e C). Para a Bacia de Campos (símbolo R), os pontos de exsudação de hidrocarbonetos, tanto com aparência clara, cinza ou escura, foram agrupados e classificados como óleos médios a pesados; dado a sua proximidade com a linha divisória (reta vermelha), acredita-se que o grau API deste óleo não seja menor que 19, nem maior que 27

### 6.2. Classificação Espectral

Os resultados (**Figs. 6**) estão expostos na forma de composição RGB transformada para o espaço de cores HSI (*hue, saturation e intensity*), tendo como imagem de intensidade a banda 1 do sensor ASTER. Os resultados indicam que todos os tipos de *endmembers* permitiram o

mapeamento dos filmes de óleo sobre a água. Em particular, os resultados de classificação com *endmembers* derivados da própria cena mostram-se superiores quando associados ao algoritmo *Linear Spectral Unmixing*, o qual proporcionou o mapeamento do óleo sobre a água, bem como permitiu sua separação de acordo com a espessura relativa do óleo sobre a água. Já no caso de *endmembers* de referência, a técnica *Spectral Angle Mapper* mostrou melhores resultados, pois apesar de não permitir a separação dos óleos quanto sua espessura, a técnica excluiu feições de rugosidade superficial ao norte da cena.

### 6.3. Classificação por Redes Neurais

A classificação espectro-espacial pelo agrupamento fuzzy através do ArcSDM possibilitou a separação não somente das áreas com óleo das com água limpa, mas também a separação de áreas de maior e menor espessura relativa do filme de óleo sobre a água do mar (Fig. 7). Este tipo de análise espectro-espacial mostra-se particularmente interessante para o caso de exsudações *off-shore*, pois inclui as diferenças de resposta espectral entre óleo e água do mar e também avalia a forma (geometria) do óleo sobre a água. A classificação considerando apenas o intervalo TIR mostrou resultados regulares devido ao baixo contraste de emissividade entre água-óleo e ao alto nível de ruído dos dados ASTER neste intervalo. A comparação dos resultados atingidos com base nas 14 bandas ou apenas nas 9 bandas do VNIR-SWIR mostra que o último é superior, pois inclui apenas regiões com óleo, enquanto o primeiro classifica erroneamente alguns pixels.

## 7. Discussão e Conclusão

A classificação espectral para o intervalo do VNIR-SWIR mostrou que as três técnicas aqui aplicadas (SAM, MTMF e LSU) permitiram detecção do óleo sobre a água com os dois diferentes tipos de *endmembers* utilizados. A classificação espectral dos dados ASTER com base nos algoritmos SAM, MTMF e LSU foi executada também para o intervalo do termal (8-12  $\mu\text{m}$ ); no entanto os resultados não foram superiores a simples visualização. Estes resultados corroboram os dados obtidos em laboratório, pois os experimentos indicam que ambos os materiais (i.e. água e óleo) apresentam valores constantes de emissividade para este intervalo, sem feições (máximos e mínimos) diagnósticas, apenas variações no patamar dos valores.

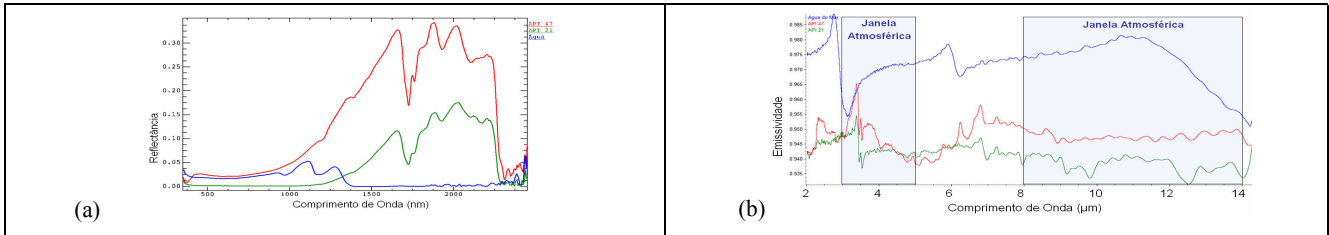
A classificação espectro-espacial por redes neurais não supervisionadas permitiu a classificação de regiões favoráveis à presença de óleo: (i) considerando todas as bandas da imagem ASTER/Terra, ou seja, informações do VIS ao TIR; (ii) com base em dados pré-processados ou não; (iii) considerando variáveis espectrais e geométricas simultaneamente. Ademais, a classificação não foi afetada pelo vórtice ciclônico da Corrente Brasileira. Este tipo de classificação não-supervisionada mostra potencial para mapeamento e monitoramento de petróleo do oceano, pois não requer pontos de treinamento, nem parâmetros pré-estabelecidos. Para este tipo de funcionalidade, deve-se considerar a necessidade de expressiva capacidade computacional para avaliação de extensas áreas. Com base nos resultados de laboratório, foi possível ainda a caracterização qualitativa remota da exsudação ocorrida na Bacia de Campos (RJ), sugerindo que o óleo tem grau API entre 20 e 27. Estes resultados podem ser consideravelmente aperfeiçoados na medida em que estejam disponíveis dados de sensores com maior resolução espectral (i.e. HSS, Hyperion e Hymap).

Ponderando os resultados apresentados para este estudo de caso, avalia-se que este trabalho atingiu avanços bastante positivos para caracterização e detecção de filmes de óleo sobre a água do mar, com base em espectroscopia, dados ASTER e técnicas de processamento espectro-espacial. Os dados, métodos e acervo de conhecimento produzido nessa pesquisa podem

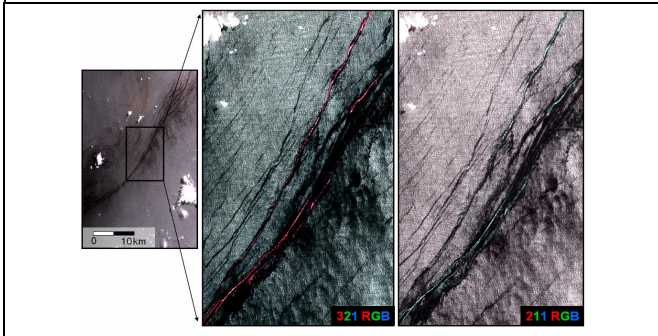
ser testados de forma operacional na exploração de petróleo *off-shore* e, na mesma medida, adaptado para o monitoramento ambiental de vazamentos de óleo em regiões costeiras.

## 5. Referências

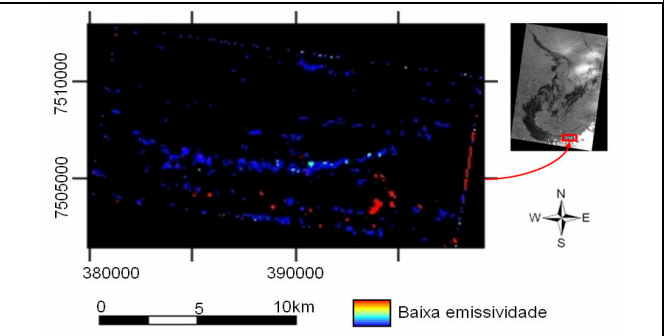
- Abrams M, Hook SJ, Ramachandran B. *ASTER User Handbook - Version 2*, Jet Propulsion Laboratory, 135pp, 2002.
- Bentz CB, Lorenzetti JA, Kampel M, Politano AT, Lucca EVL. Contribuição de dados ASTER, CBERS, R99/SIPAM e OrbiSAR-1 para monitoramento oceânico – Resultados do Projeto FITOSAT. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, INPE, p. 3755-3762, 2007.
- Boardman JW. 1989. Inversion of imaging spectrometry data using singular value decomposition. In: Twelfth Canadian Symposium on Remote Sensing, v. 4., pp. 2069-2072, 1989.
- Boardman JW. SIPS User's Guide Spectral Image Processing System, Version 1.2, Center for the Study of Earth from Space, Boulder, CO. 88 pp, 1992.
- Boardman JW, Kruse FA, Green RO. 1995. Mapping target signatures via practical unmixing of AVIRIS data. In: *Summaries, Fifth JPL Airbone Earth Science*.
- Brown WM, Gedeon TD, Groves DL, Barne RG. Artificial neural networks: a new method for mineral prospectivity mapping. *Australian Journal of Earth Science*, **47**(4):757-770, 2000.
- CEDRE (Centre of Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution). Aerial Observation of Oil Pollution at Sea Operational Guide . 60p, 2004.
- Fingas FM & Brown CE 2000. Review of Oil Spill Remote Sensing. Presented at Spillcon 2000, Darwin, Australia.
- Green AA, Berman M, Switzer P, Craig MD. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **26**(1): 65-74, 1988.
- Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, Cothorn JS, Hook S e Kahle A. A Temperature and Emissivity Separation Algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Images. *IEEE* **36**(4): 1113-1126, 1998.
- Grierson IT. Use of Airborne Thermal Imagery to Detect and Monitor Inshore Oil Spill Residues During Darkness Hours. *Environmental Management* **22** (6): 905–912, 1998.
- Huhnerfuss H, Alpers W. e Richter K. Discrimination between crude oil spills and monomolecular sea slicks by airborne radar and infrared radiometer - Possibilities and limitations. *International Journal of Remote Sensing*, **7**:1001-1013, 1986
- Imspec. *ACORN User's Guide*. Analytical Imaging and Geophysics. Boulder, CO, USA, 64 pp, 2001.
- Iwasaki A, Fujisada H, Akao H, Shindou O, Akagi S. Enhancement of spectral separation performance for ASTER/SWIR. *Proceedings of SPIE*, The International Society for Optical Engineering, 4486, pp.: 42-50, 2001.
- Kruse FA, Lefkoff AB, Boardman JB, Heidebrecht KB, Shapiro AT, Barloon PJ e Goetz AFH. The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, **44**:145-163, 1993.
- Lammoglia T & Souza Filho. Caracterização espectral de petróleos de bacias produtoras brasileiras, Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, submetido, 2009.
- Looney C.G. & Yu H. 2000. Special Software Development for Neural Network and Fuzzy Clustering Analysis in Geological Information Systems. *Geological Survey of Canada*, 34 pp.
- QuickSCAT/ NOAA/ NESDIS. 2007. Disponível em <http://winds.jpl.nasa.gov/missions/quikscat/>. Consultado em nov/2007.
- Stech JL, Lorenzetti JA, De Souza JMC, Araújo CES. A mesoscale Brazil Current eddy observed through AVHRR images and current meter moorings". In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXI, Part B7. Vienna, pp. 650-653, 1996.
- Tseng W.Y. & Chiu L.S. 1994. AVHRR Observations of Persian Gulf Oil Spills. Proc. IGARSS'94 IEEE, vol. 2, pp. 779-782. (USGS-NASA). Land Process Distributed Active Archive Center. Disponível em [http://lpdaac.usgs.gov/main.asp/http://lpdaac.usgs.gov/aster/ast\\_04/](http://lpdaac.usgs.gov/main.asp/http://lpdaac.usgs.gov/aster/ast_04/) [http://lpdaac.usgs.gov/aster/ast\\_08/](http://lpdaac.usgs.gov/aster/ast_08/). Acessado em fevereiro de 2008.



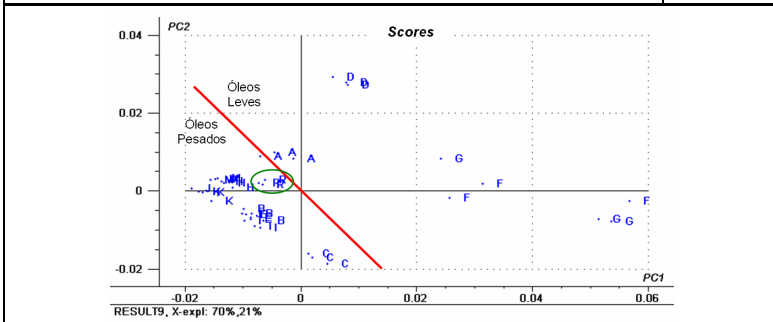
**Figura 1.** Curvas espectrais de (a) refletância (400-2500 nm) e (b) emissividade (2-14 μm) medidas em laboratório para duas amostras de petróleo: API 47 (vermelho) e API 21 (verde), bem como da água do mar (azul).



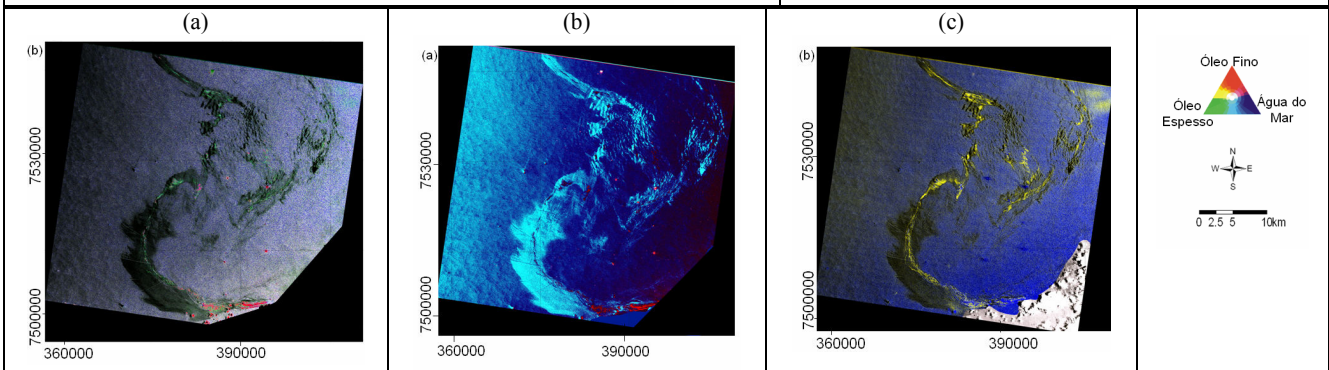
**Fig. 3.** O óleo de origem biogênica pode ser identificado em dados ASTER pela aparência em verde em composição colorida das bandas 211 e cor vermelha em composições das bandas 321 do ASTER devido à assinatura espectral de algas/fitoplânctons associada.



**Fig. 4.** Resultados do pré-processamento da imagem ASTER para o intervalo do termal. Corte da cena de emissividade no ponto de exsudação registrado. Indicação, à direita, da localização do corte na cena. Os valores de emissividade para as regiões com filmes de óleo mais espessos são menores que a água do mar, tal como observado em dados de laboratório.



**Fig. 5.** Gráfico de scores PC2 vs PC1 mostrando que é possível separar, por APC, os tipos de óleo (i.e. grau API e viscosidade) medidos em laboratório ou derivados de dados



**Fig. 6.** (a) Resultado da Classificação Espectral pela técnica LSU com *endmembers* derivados da própria cena em composição RGB; (b) Resultado da Classificação pela técnica MTF com *endmembers* de referência de óleo e água do mar medidos em laboratório e em composição RGB. Notar que para ambos foi possível separação do óleo em função de sua espessura; (c) Resultado da Classificação pela técnica SAM com *endmembers* de referência de óleo e água do mar medidos em laboratório. Notar que não foi possível separação do óleo em função de sua espessura, mas ondulações ao norte da cena foram adequadamente excluídas da classificação.



