

## Caracterização de Exsudações de Hidrocarbonetos na Bacia do São Francisco-MG Por Meio de Imagens ASTER

Vagney Aparecido Augusto <sup>1</sup>  
Carlos Roberto de Souza Filho <sup>1</sup>  
Raimundo Almeida Filho <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/IG  
Caixa Postal 6152 - 13083-970 - Campinas - SP, Brasil  
(vagney,beto)@ige.unicamp.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
rai@ltd.inpe.br

**Abstract.** The aim of this paper was to detect possible hydrocarbon microseepage features superimposed to physiographic and vegetation spectral characteristics of eucalyptus crops in the Remanso do Fogo area (Minas Gerais State), using ASTER surface reflectance data and whole-pixel, spectral-matching image processing techniques. The study successfully showed that there is a spatial association between geobotanical anomalies, particularly marked by the lack or low density of photosynthetically active vegetation, and geochemical anomalies of ethane microseepages.

1. **Palavras-chave:** remote sensing, hydrocarbon of microseepages, sensoriamento remoto, microexsudações de hidrocarbonetos

### 1. Introdução

A exsudação gasosa de hidrocarbonetos (HCs) em superfície é um processo já documentado em várias partes do mundo. Os reservatórios de petróleo não são completamente selados, permitindo escapes de fluidos, principalmente gases que, por processos de migração, exalam na superfície formando exsudações gasosas (Almeida-Filho 2001).

De acordo com Van der Meer, (2002), o processo de escape de HC ocorre, principalmente, por efusão na forma livre resultante de altas pressões diferenciais nos reservatórios. A migração ocorre por várias formas, através de falhas, fraturas, planos de acamamentos e de rochas com altas porosidades, propiciando o alcance dos fluidos até a superfície.

Os gases quando próximos ou presentes na superfície interagem com os solos produzindo um conjunto de alterações físico-químicas (Schumacher 1996). Essas alterações provocam a dissolução ou precipitação de minerais, mobilização ou imobilização de elementos químicos, possibilitando o surgimento de uma assembléia mineralógica particular, além de causar alterações fisiológicas na vegetação sobrejacente. A oxidação química e/ou conversão bacteriológica de HCs, com conseqüente produção de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e ácidos orgânicos, transforma principalmente feldspatos em argilas, como kaolinita, ilita e clorita. Estes processos também produzem carbonatos de cálcio devido à oxidação de HCs, precipitando-o em forma de cimento nos solos (Schumacher 1996).

Estudos das interações sofridas pela vegetação em locais com exsudações demonstram que HCs são tóxicos somente em condições muito altas, embora os efeitos secundários possam ser bastante evidentes. Os principais fatores que influenciam o desenvolvimento da vegetação são: disponibilidade de oxigênio, concentração de CO<sub>2</sub>, disponibilidade de metais

pesados e a diminuição da porosidade dos solos devido à cimentação carbonática (Oliveira 1998). Os efeitos observados nas plantas em solos ricos em HCs são: crescimento debilitado, mudança nas estruturas das folhas acompanhada de uma variação na coloração, quedas de folhas, menor densidade de plantas e em geral atrofiadas, podendo, em casos extremos, ocorrer à morte da vegetação no local.

Diante deste conjunto de alterações mineralógicas e fisiológicas da vegetação, diversos trabalhos como Patton & Manwaring (1984), Lang et al. (1985), Carter & Koger (1988), foram executados aplicando sensoriamento remoto (SR) para mapear estas zonas de alteração, com intuito de melhor direcionar os esforços dos programas de exploração petrolífera, pois estas feições modificam as respostas espectrais destes alvos, os quais podem então ser diferenciados e mapeados.

No Brasil este tema é ainda pouco estudado. Os primeiros trabalhos foram desenvolvidos por Cunha (1979,1982) e Miranda & Cunha (1981) (*apud* Oliveira 1998) na bacia do Solimões, onde anomalias da cobertura vegetal detectada por meio de imagens Landsat MSS, foi relacionada à presença de gases em superfície evidenciada por dados geoquímicos. Outros trabalhos foram desenvolvidos mais recentemente por Almeida Filho et al. (1997, 1999, 2001, 2002a, 2002b) na bacia do Tucano Norte, usando imagens Landsat TM para caracterizar anomalias geoquímicas de HCs. Oliveira (1998) trabalhou na bacia do São Francisco, também usando imagens Landsat TM integrada com dados geoquímicos, geofísicos e espectrometria de reflectância, caracterizando emanções em pontos de ocorrência já conhecidos.

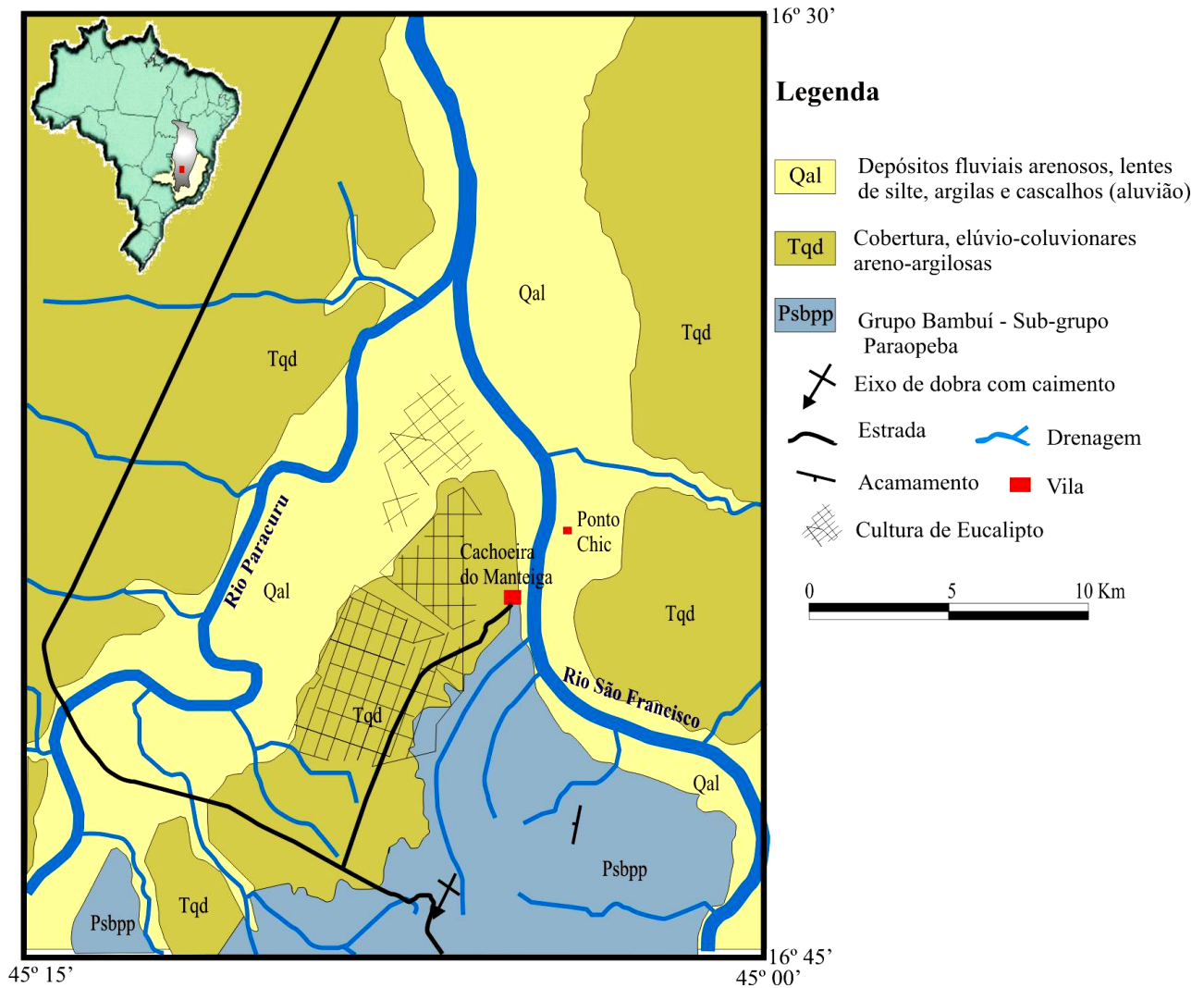
Estudo com dados de resolução espectral superior ao TM são raros, destacando-se o trabalho de Van der Meer (2002). Com o advento do sensor ASTER, com 14 bandas espectrais distribuídas entre o visível e o infravermelho termal, uma nova janela foi aberta para estudos sobre os efeitos de exsudação gasosa de hidrocarbonetos na vegetação e solos. Entretanto, até o momento, aparentemente nenhum trabalho foi realizado com dados desse sensor visando esse objetivo.

Considerando a compilação em epígrafe, esse trabalho tem como objetivo a caracterização espectral da vegetação (cultura de eucalipto) a partir de imagens do sensor ASTER/TERRA na área da Bacia do São Francisco, em áreas onde tais fenômenos foram previamente reconhecidos por Oliveira (1998), e sua correlação com dados geoquímicos de HCs (particularmente os mais leves, como metano e etano).

## 2. Localização e Aspectos Geológicos da Área

A área em estudo restringe-se a uma cultura de eucalipto próximo ao encontro dos rios São Francisco e Paracatu, nas imediações da localidade Cachoeira do Manteiga, Município de Buritizeiro-MG, onde está delimitada pelas coordenadas 16° 30' – 16° 45' de latitude sul e 45° 00' – 45° 15' de longitude oeste. Esta área é conhecida como Remanso do Fogo por apresentar inúmeras emanções naturais de gás de petróleo (**Figura 01**).

Esta área compreende uma cobertura sedimentar de idade Fanerozóica denominada de bacia São Franciscana, situada numa porção central do Cráton do São Francisco. Na área em epígrafe afloram sedimentos de idade Vendiana, Grupo Bambuí – Sub-grupo Paraopeba (siltitos e folhelhos alternados com calcários e dolomitos, correspondentes às formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade) e rochas da Formação Três Marias (arcósios e siltitos intercalados) (Oliveira 1998).



### 3. Processamento de Imagens

Foi utilizada uma imagem do sensor multiespectral ASTER do satélite TERRA, inscrita na cena Landsat-5/TM de órbita 219, ponto 71, obtida em 05 de setembro de 2000. Esta imagem foi adquirida em nove bandas do VNIR (pixel 15m) ao SWIR (pixels re-amostrado para 15m) já corrigida para reflectância por meio da calibração do Programa ASTER da NASA/EUA (cf. Abrams & Hook, 2002).

Todo o processamento foi executado por meio do programa ENVI V.4 (RSI 2003). O mesmo consistiu basicamente de duas etapas: (i) primeiramente, foi realizada a caracterização espectral das áreas anômalas na vegetação de interesse por meio das anomalias geoquímicas de gás (etano), em conjunto com pontos já conhecidos de ocorrências de exsudações gasosas; (ii) em seguida, aplicou-se uma técnica de mapeamento espectral comumente utilizada para localizar materiais em imagens hiperespectrais denominada *Spectral Angle Mapper* (SAM), objetivando separar áreas com ocorrências de exsudações de HCs, baseando-se nos seus espectros característicos.

#### 3.1 Caracterização Espectral

As principais propriedades espectrais da vegetação no visível são dominadas por absorção de pigmentos fotossintéticos como clorofila, com absorção em 0,66-0,68  $\mu\text{m}$  (Meneses et al. 2001). Mudanças nas concentrações de clorofila na vegetação implicam em

variações na resposta espectral da mesma, como na zona da borda vermelha (*red edge*), centrada em 0,75  $\mu\text{m}$  (ponto de máximo gradiente na reflectância espectral da vegetação entre o vermelho e infravermelho próximo). A *red edge* é modificada com o aumento ou diminuição da concentração de clorofilas, podendo mudar em direção à parte das ondas curtas devido a um decréscimo de clorofila (Meneses et al. 2001).

Considerando essas propriedades, foram coletados espectros dentro e fora das áreas geoquimicamente anômalas sobre a cultura de eucalipto, nas quais investigou-se as características espectrais da vegetação no intervalo 0,52-2,36  $\mu\text{m}$ , referente às 8 bandas da imagem ASTER posicionadas no espectro refletido. Essa análise possibilitou a geração de uma biblioteca espectral característica de áreas com vegetação potencialmente afetada e não afetadas pelos efeitos da presença de emissões gasosas.

### 3.2 Spectral Angle Mapper (SAM)

O SAM é uma técnica de classificação supervisionada na escala de pixel total, onde se calcula a similaridade entre o espectro de cada pixel na imagem e os espectros de referência em uma biblioteca espectral (conjunto de espectros de interesse no estudo). Deste modo, os espectros são tratados como vetores no espaço, com dimensionalidade igual ao número de bandas da imagem. Assim a similaridade espectral entre estes espectros é expressa na forma de ângulos entre os vetores de cada pixel e calculado para cada banda (Boardman & Kruse 1994).

Como resultado desta classificação, obtém-se uma imagem denominada *rule image*, onde os valores dos pixels correspondem aos valores dos ângulos entre os vetores derivados dos espectros da imagem e os espectros de referência. Como o objetivo de realçar os menores ângulos, pois estes são os mais prováveis de serem os espectros de interesse, deve-se realçar os pixels escuros invertendo o sinal da imagem e tornando-os claros.

## 4. Resultados e Discussões

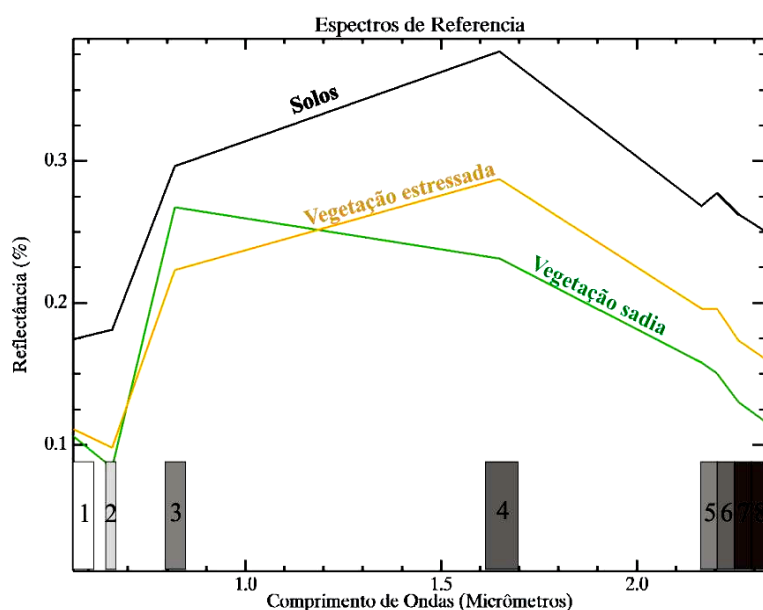


Figura. 02. Espectros de referências.

A principal característica observada nas áreas anômalas foi à deficiência da vegetação na forma de feições circulares em meio a floresta de eucaliptos,

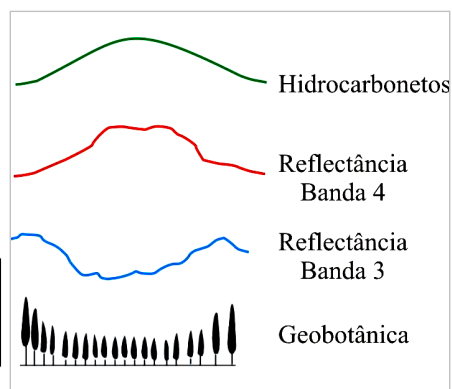
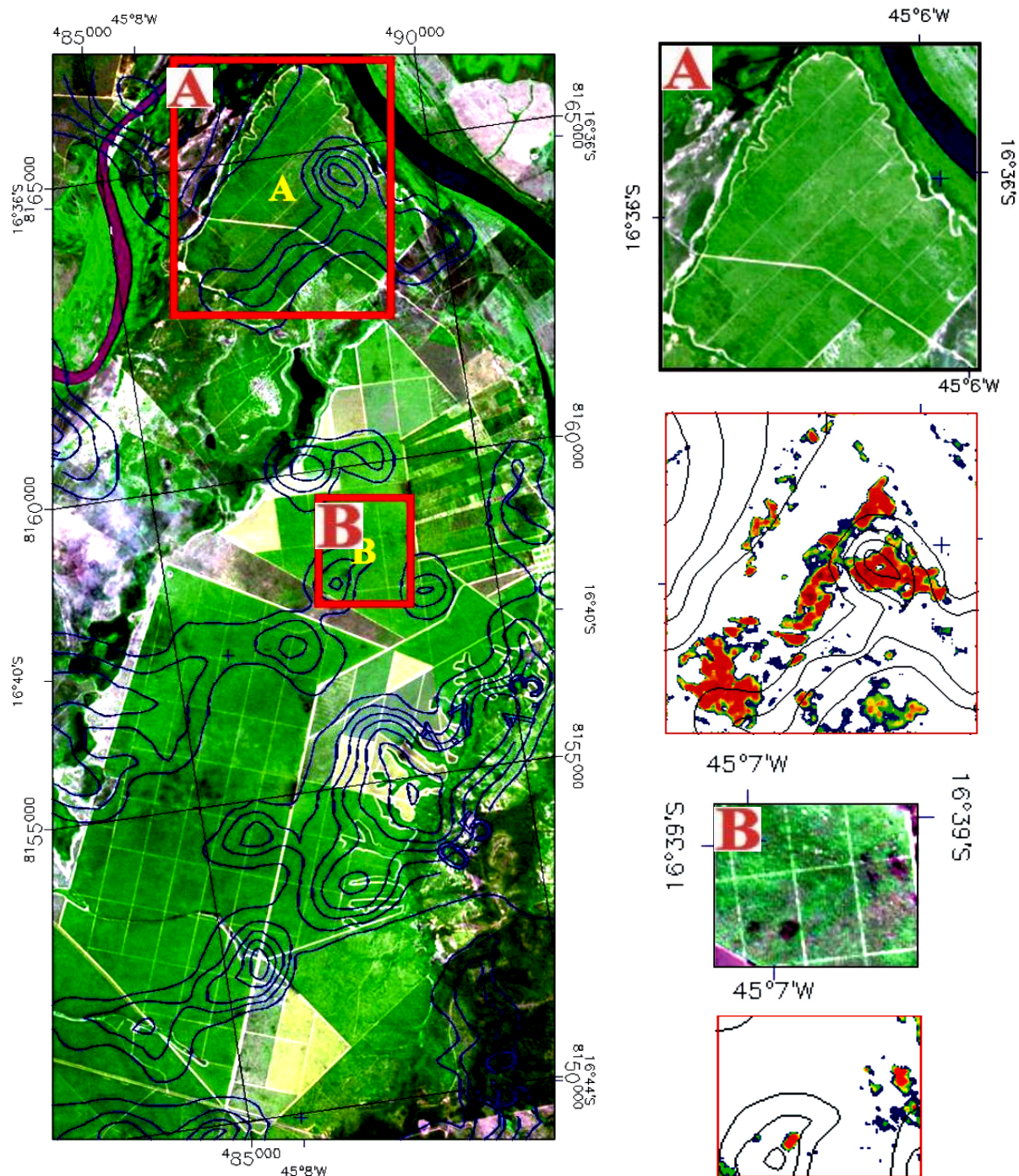


Figura. 03. Anomalias observadas na área de estudo sobre os focos de HCs.



**Figura. 04.** Imagem ASTER 231 associada às anomalias de etano em isolinhas (azul) sobrepostas, com duas áreas classificadas por meio da técnica SAM (A e B). Ambas áreas tiveram respostas satisfatórias.

independentemente do estágio de crescimento das plantas. Isso, provavelmente, é relacionado ao estresse advindo de deficiências nutricionais, o que implicou na diminuição da densidade da vegetação em torno de locais onde a exsudação é mais ativa (**Figura. 03**). A análise espectral dos pixels nestes pontos possibilitou diferenciar estas áreas. A partir dos espectros de referência (**Figura. 02**) observa-se algumas modificações marcante em termos de reflectância nas bandas 2, 3, 4 e 6 do ASTER.

Fazendo uma comparação entre bandas, percebe-se que na banda 2 (absorção típica da clorofila no vermelho do espectro) a vegetação estressada teve um ligeiro aumento na

reflectância, indicando perda de clorofila. Na banda 3 (NIR) houve diminuição da reflectância, indicando modificações significativas na estrutura celular e dossel da planta pois, nesta região do espectro ocorre considerável espalhamento da radiação na estrutura interna nas folhas saudáveis e altas reflectâncias. De maneira geral, todo o intervalo do SWIR teve aumento da reflectância para vegetação estressada. Acredita-se que este comportamento no SWIR pode ser resultado de dois fatores: (i) da perda de água na estrutura da vegetação devido ao estresse, (ii) ou resultante da soma das respostas espectrais da vegetação mais solos, pois estas áreas anômalas têm baixa densidade vegetativa o que favorece a exposição dos solos. Isso advir principalmente devido aos picos de reflectância nas bandas 4 e 6, semelhante aos principais picos de reflectância dos solos no local (**Figura 02**).

O mapeamento espectral a partir da técnica SAM foi aplicado em toda a área de eucalipto. Porém a classificação obtida não teve uma boa resposta para toda a área inicialmente. Os espectros referentes às anomalias apresentaram as mesmas características de absorção e reflexão, porém com intensidades diferentes. Isso impossibilitou a geração de um espectro característico para toda a área. Com base nessa observação, foi aplicada a técnica SAM de forma localizada, objetivando mapear anomalias específicas em locais diferentes dentro de toda a área da cultura (**Figura. 04**). Esta diferenciação espectral dos alvos pode estar relacionada a particularidades no tipo de solo no local, quantidades e frequência de exsudações e reação diferenciada do estresse na vegetação de cada ponto anômalo.

## 5. Conclusões

A associação espacial entre anomalias geoquímicas e geobotânicas foram realçadas com sucesso por meio da técnica SAM em imagens ASTER. Este estudo de caso revela o potencial das técnicas de processamento digital em imagens do sensor ASTER como ferramenta para a detecção e caracterização de exsudações, as quais constituem importantes indícios para ocorrência de recursos de óleo e gás.

## 6. Agradecimentos

Ao CNPq pelo fornecimento da bolsa de pesquisa para execução do projeto de mestrado. A Petrobrás, em especial Dr. Wilson José de Oliveira pelo fornecimento dos dados geoquímicos, e a UNICAMP pelo suporte técnico e fornecimento de imagens.

## 7. Referências Bibliográficas

Abrams, M.; Hook, S. 2002 Aster User Handbook: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. USA: NASA/Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, V2, 135p.

Almeida-Filho, R. & Miranda, F.P. Digital image processing and enhancement of gravity data as an aid to the definition of structural framework of the North Tucano-Jatobá Basins, Northeastern Brazil. *Boletim IG-USP, Série Científica.*, 28: 119-127, 1997.

Almeida-Filho, R.; Miranda, F.P.; Galvão, L.S.; Freitas, C.C. Terrain characteristics of a tonal anomaly remotely detected in an area of hydrocarbon microseepage, Tucano Basin, north-eastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing.*, **23** (17): 3893-3898, 2002a.

Almeida-Filho, R. 2001. Processamento digital de imagens Landsat-TM na detecção de áreas de microexsudação de hidrocarbonetos, região da Serra de Tonã, Bahia. In: **SBSR, Workshops, Fox do Iguaçu, X, INPE**, P. 235-242.

Almeida-Filho, R.; Miranda, F.P.; Yamakawa, T. Remote detection of a tonal anomaly in an area of hydrocarbon microseepage, Tucano basin, north-eastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, **20**: 2683-2688, 1999.

Almeida-Filho, R.; Miranda, F.P.; Yamakawa, T.; Bueno, G.V.; Moreira, F.R.; Camargo, E.G. and Bentz, C.M. Data integration for a geologic model of hydrocarbon microseepage areas in the Tonã Plateau region, North Tucano basin, Brazil. *Canada Journal of Remote Sensing*, **20**: 2683-2688, 2002b

Boardman, J.W. & Kruse, F. A. 1994. Automated analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: In; Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, **Proceedings**, MI, I-407-I-418.

Carter, J.S. & Koger, D.G., "Successful Applications of Remotely Sensed Data for Oil and Gas Exploration." In: **Proceedings** of 6th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Huston, Texas, v.1, p.19-25, 1988.

Lang, H.R.; Curtis, J.B.; Kovacs, J.S. 1985. Lost river, West Virginia, petroleum test site: The NASA/Geosat Test Case Project. In: *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, Section 12.

Meneses, P. R.; Madeira Neto, J. S. 2001. **Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais** - Brasília, DF: UNB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 262p.

Oliveira, W. J. **Caracterização das Emanações gasosas de hidrocarbonetos na região do Remanso do Fogo (MG) através do uso integrado de sensoriamento remoto, geoquímica, geofísica, geologia estrutural e espectrometria de reflectância**. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP. 1998.

Patton, K.H. & Manwaring, M.S. 1984. Evaluation of Landsat derived tonal anomaly for hydrocarbon microseepage, southwest Kansas. In: *Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*, 3, Colorado Springs. Proceedings... Colorado Springs (USA), ERIM. V.1, P441-450.

Schumacher, D. 1996. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments, hydrocarbon migration and its near-surface expression. In: **Hydrocarbon Migration and its Near-Surface Expression** (D. Schumacher and M.A. Abrams, eds). Mem. Am. Ass. Petrol. Geol., 66, 71±89.

Van der Meer, F.; Van Dijk, P.; Van der Werf, H.; Yang, H. Remote Sensing and Petroleum Seepage: a review and case study. *Terra Nova.*, **14** (1), 1-17, 2002