

## Forma e ocorrência dos escapes gasosos no Remanso do Fogo/Bacia do São Francisco: uma análise a partir de dados multifontes de alta resolução espacial e espectral

Lucíola Alves Magalhães<sup>1,2</sup>  
Carlos Roberto de Souza Filho<sup>2</sup>  
Ieda Del'Arco Sanches<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Embrapa Monitoramento por Satélite  
Av. Sd. Passarinho, 303 - Jardim Chapadão, 13070-115 – Campinas - SP, Brasil  
luciola.magalhaes@embrapa.br

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP  
Caixa Postal 6152 - 13083-970 - Campinas - SP, Brasil  
beto@ige.unicamp.br

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
ieda.sanches@inpe.br

**Abstract.** This paper describes the combined use of gasometric data, terrestrial radiometric data, reflectance spectroscopy data and ProSpecTIR-VS hyperspectral imagery to characterize soils and vegetation anomalies due to the presence of natural seepages in the São Francisco Basin, a region known as Remanso do Fogo. The locations of seeps were mapped using image processing techniques and the results demonstrated that the absorption bands of kaolinite and iron oxides/hydroxides can be used for that purpose with some limitations. Although hydrocarbon anomalies increase the content of kaolinite and decrease the content of iron oxides, drainage systems and the relief can mobilize minerals in soils, thus encumbering their correlation with gas seeps. In such situations vegetation anomalies as well as gamma ray anomalies (Higher DRAD and Ures, lower Kres) may be used as determinative vectors of the existence of seeps. The combined use of multi-source data in the characterization of soils and vegetation submitted to natural gas seeps in the region of Remanso do Fogo provided a better comprehension of changes induced in soils and in vegetation by the presence of gases in soils, based on a greater detailing of spectral features of interest.

**Palavras-chave:** remote sensing, reflectance spectroscopy, geophysics, hydrocarbon, seeps, sensoriamento remoto, espectroscopia de refletância, geofísica, hidrocarboneto, exsudações.

### 1. Introdução

As inovações tecnológicas dos métodos de análise e dos sensores óticos de altas resoluções espaciais e espectrais, permitiram o uso do sensoriamento remoto (SR) na detecção de escapes naturais (*seeps*) de óleo e gás de reservatórios petrolíferos. Quando em contato com os solos, rochas e vegetação, os hidrocarbonetos (HCs) promovem uma série de alterações nestes materiais que podem ser identificadas com o uso do SR. A biodegradação de HCs altera o pH e o Eh do meio (Schumacher, 1996, Van der Meer et al., 2002) favorecendo a formação de argilas a expensas dos feldspatos e a conversão de illita em caulinita (Schumacher, 1996), além de alterar a disponibilidade de nutrientes para as plantas (Saunders et al., 1999). O aumento de bactérias consumidoras de HCs nos solos faz com que haja uma diminuição da oxigenação neste meio, prejudicando o desenvolvimento da vegetação e em casos extremos, causando a sua morte (Noomen, 2007, 2012).

Desta forma, dentre as alterações mais investigadas com o uso do SR na detecção dos *seeps* estão o embranquecimento dos solos devido à redução do ferro férrico (mais conhecida como *bleaching*) e o aumento da concentração da caulinita e das alterações na vegetação (Van der Meer et al., 2002). Apesar de estes serem os principais indicadores dos *seeps*, Schumacher (1996) destaca que as espécies vegetais e os solos podem responder de forma única a estas

situações anômalas, e que variáveis como a geologia, o clima, a umidade e a topografia podem influenciar mais as alterações espectrais do que os escapes em si.

Dados geofísicos também têm sido utilizados na prospecção de novos campos petrolíferos. Saunders et al. (1987, 1993) demonstraram a existência de anomalias de baixo potássio associadas às exsudações devido a interação das soluções ácidas criadas pela biodegradação dos HCs com minerais como os k-feldspatos (Schumacher, 1996; Saunders et al., 1999). Schumacher (1996) e Saunders et al. (1999) reportaram anomalias positivas de urânio associadas aos campos de petróleo. Porém, este comportamento não parece ser igual em todos os ambientes, uma vez que os resultados das pesquisas de Saunders et al. (1987) registraram anomalias negativas e positivas nestes locais.

A região conhecida como Remanso do Fogo/MG foi objeto de estudo de Oliveira (1998), Souza Filho et al. (2008), Curto et al. (2012) e Magalhães e Souza Filho (2015). A área foi escolhida por registrar descobertas acidentais de gás durante perfurações de poços de água além de inúmeras ocorrências de borbulhamentos inflamáveis ao longo do rio Paracatu, próximo à vila de Cachoeira do Manteiga/MG. Os autores supracitados utilizaram com sucesso imagens multiespectrais do sensor TM/Landsat e do ASTER/Terra e imagens hiperespectrais do sensor ProSpecTIR-VS, além de dados aerogeofísicos e de espectroscopia de refletância para detectar as alterações regionais induzidas na vegetação e nos solos da região. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial dos sensores hiperespectrais (ProSpecTIR-VS) em conjunto com dados geofísicos terrestres de alta densidade de amostragem e dados de espectroscopia de refletância na detecção dos *seeps* do Remanso do Fogo.

## 2. Contexto geológico

A área de estudo (Figura 1) está inserida na Bacia do São Francisco, preenchida por rochas sedimentares proterozóicas do Supergrupo Espinhaço, Grupos Macaúbas, Paranoá e Bambuí, além de coberturas fanerozóicas (Zalán e Romeiro Silva, 2007). Com exceção das suas bordas, a porção central desta bacia apresenta-se pouco deformada (Zalán e Romeiro Silva, 2007). Estruturas lineares de direção N60-70E e N20-30E condicionam as ocorrências dos *seeps* no Remanso do Fogo, juntamente com famílias de juntas de direções N50-60W e NS. Estudos sísmicos demonstraram que juntas de direção E-W podem ocorrer condicionando a rede de drenagem sob a cobertura arenosa atuando como caminhos preferenciais de migração dos gases até a superfície (Oliveira, 1998).

Na área detalhada neste trabalho, as rochas do Grupo Bambuí são completamente recobertas por sedimentos arenosos de idade quaternária (terraços aluviais (QH<sub>i</sub>)). Estes solos arenosos, juntamente com as árvores de *Eucalyptus* spp que ocorrem na área são os objetos de estudo deste trabalho (Figura 1).

## 3. Metodologia de trabalho

Para a caracterização das alterações potencialmente induzidas pelas microexsudações de HCs nos solos e na vegetação foram utilizados dados de altíssima resolução espectral e espacial do sensor ProSpecTIR-VS, dados de espectroscopia de refletância de campo, dados radiométricos terrestres e dados de gasometria, visando estabelecer o comportamento das anomalias de gás nos solos arenosos do Remanso do Fogo. A descrição detalhada dos métodos empregados no trabalho pode ser encontrada em Magalhães e Souza Filho (2015).

### 3.1 Imagens hiperespectrais do sensor ProSpecTIR-VS

O sensor ProSpecTIR-VS foi operado a bordo de uma aeronave da empresa Fototerra/SpecTIRTM LCC. Os dados foram adquiridos entre os dias 21 e 23 de junho de 2010 e entregues no nível 1A de processamento (i.e. convertido em refletância). São 357

bandas do VNIR (125 bandas, 400 a 990 nm) ao SWIR (232 bandas, 970 a 2.500 nm) com 5 nm de resolução espectral e 1 m de resolução espacial.

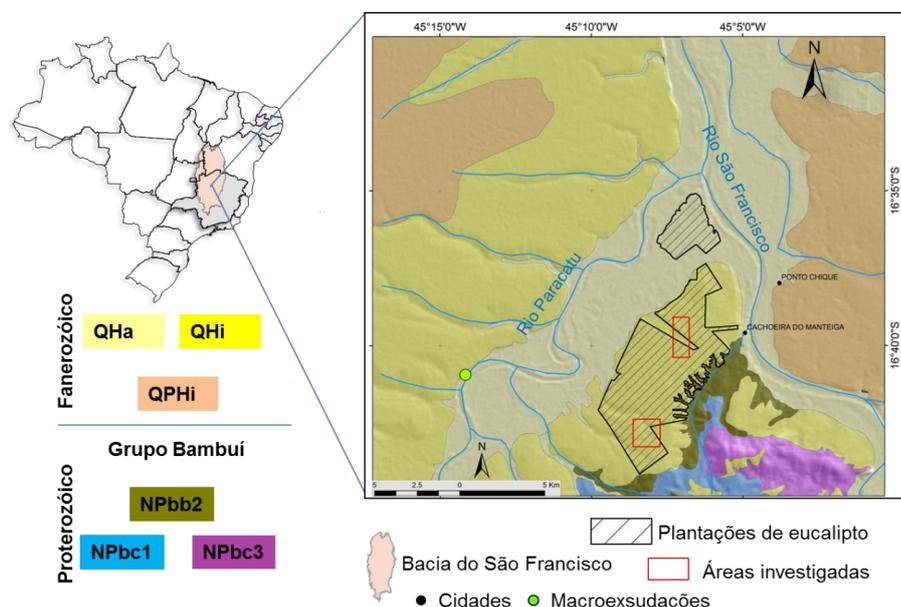


Figura 1. Mapa de localização e geológico simplificado da área de estudo: QHa: Aluviões, QHi: Terraços Aluviais, QPHi: Coberturas Elúvio-Colúviais, NPbb2: Fm. Três Marias, NPbc1 e NPbc3: Fm. Lagoa do Jacaré e Serra de Santa Helena. (Modificado da Folha SE.23-V-B-VI - Santa Fé de Minas - Escala 1:100.000 - CPRM – 2002) (Fonte: Magalhães e Souza Filho, 2015).

Os processamentos aplicados nas imagens hiperespectrais foram: 1) aplicação da transformação MNF (*Minimum Noise Fraction*) para separar o ruído e reduzir a dimensionalidade dos dados espectrais; 2) seleção dos espectros de referência com base em escatergramas bidimensionais das bandas MNF, para servirem como referência no processo de classificação; 3) remoção do contínuo (*Continuum Removal - CR*) dos espectros de referência selecionados em todo o intervalo entre 0.35 a 2.5 $\mu$ m, 4) análise por principais componentes (APC), 5) análise de agrupamentos e 6) classificação da imagem utilizando o classificador supervisionado SAM (*Spectral Angle Mapper*) com ângulo de 0.1 rad.

Os espectros de vegetação foram analisados somente na região do visível (VIS), entre 400 e 700 nm por ser nesta região que as maiores variações entre os espectros foram registradas. É nesta região que os pigmentos fotossintetizantes podem ser identificados, como as clorofilas que possuem bandas de absorção centradas em 420, 490 e 660 nm (clorofila a), e em 435 e 643 nm (clorofila b) (Kumar et al., 2001). Os espectros de referência extraídos da imagem foram agrupados em três classes distintas: densa, intermediária e rala.

As curvas espectrais dos solos extraídos das imagens foram processadas em dois intervalos distintos: 1) entre 2.124 a 2.224 nm, para identificação da caulinita e 2) entre 425 e 1.000 nm, pois englobam as principais feições de absorção do ferro férrico entre 750 e 950 nm, 550 e 650 nm e 0.450 nm (Hunt e Ashley, 1979). Nos dois casos, os espectros foram agrupados em duas classes a partir das variações na profundidade das feições de absorção.

### 3.2. Dados de espectroscopia de refletância de campo

Espectros de solos e vegetação foram obtidos em campo com o auxílio do espectrorradiômetro FieldSpec® 3 High-Resolution (ASD Inc) e seus acessórios: *plant probe*, *leaf clip* e *soil probe*. Este equipamento detecta a radiação eletromagnética entre 350 e 2500 nm com alta resolução espectral : 3 nm (350 – 1.000 nm), 8.5 nm (1.000 – 1.800 nm) e 6.5 nm

(1.800 – 2.500 nm). Foram coletados aproximadamente 650 espectros de vegetação, incluindo as repetições em cada ponto, e 187 espectros de solo.

Os espectros de refletância foram removidos pelo contínuo e, em seguida, foram submetidos à APC e à análise de agrupamentos. As regiões espectrais analisadas foram as mesmas estabelecidas para a classificação das imagens hiperespectrais (400 a 700 nm para vegetação, 2.124 a 2.224 nm para a caulinita e 425 a 1.000 nm para o ferro). Uma média entre as curvas espectrais de cada agrupamento foi obtida de forma a representar o seu comportamento médio.

### 3.3. Dados de gasometria

O total de 566 amostras de solo foram coletadas por técnicos da Petrobras, em 1987, nas proximidades dos rios Paracatu e São Francisco. Estas amostras foram analisadas por cromatografia gasosa para detecção de metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), pentano (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>) e hexano (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>). Foi realizada a soma algébrica entre todos os HCs analisados (C1 a C6: HC Total) e os resultados foram classificados a partir da média e do desvio padrão das amostras para separação das anomalias gasosas do background regional: i) *background* ≤ 8 ppm; ii) anomalias de 1<sup>a</sup>. ordem ≤ 26 ppm; iii) anomalias de 2<sup>a</sup>. ordem ≤ 44 ppm e; iv) anomalias de 3<sup>o</sup> ordem > 44 ppm).

### 3.4. Geofísica terrestre

Teores de K (%), eTh (ppm) e eU (ppm) foram levantados em duas diferentes regiões da área de estudo (Figura 1). Foram amostrados 179 pontos com intervalo de amostragem de 60 metros. Utilizou-se o gamaespectrômetro PGIS-SP - Portable Gamma-Ray Spectrometer (Pico Envirotec Inc.) cedido pelo Instituto de Geociências (IG) da Universidade de São Paulo (USP), cujos parâmetros de calibração podem ser encontrados em Ribeiro et al. (2005).

Os seguintes processamentos foram aplicados no conjunto de dados para compatibilização com os processamentos aerogeofísicos adotados em Magalhães e Souza Filho (2015): fuzzificação da base de dados, normalização do K% e do eU (ppm) pelo eTh (ppm) (Equações 1 e 2), cálculo dos parâmetros Kres (Equação 3), Ures (Equação 4) e DRAD (Equação 5). A combinação entre o Kres e o Ures é denominada DRAD. Seus valores elevados e positivos são considerados indicativos de áreas favoráveis para acumulações de petróleo (Saunders et al., 1993; El Sadek, 2002 e Curto et al., 2012). As equações para o cálculo destes parâmetros estão descritas em Saunders et al. (1987, 1993), El Sadek (2002) e Curto et al. (2012):

$$K_i = a + b * Th_s \quad (1)$$

$$U_i = a + b * Th_s \quad (2)$$

$$K_{res} = (K_s - K_i) \quad (3)$$

$$U_{res} = (U_s - U_i) \quad (4)$$

$$DRAD = U_{res} - K_{res} \quad (5)$$

onde  $K_i$  e  $U_i$  são os valores ideais (normalizados pelo eTh);  $K_s$  e  $U_s$  são os valores medidos no campo.

## 4. Resultados e discussão

Um conjunto de 37 curvas espectrais de vegetação e 16 de solo foram selecionadas para servirem como espectros de referência para classificação das imagens ProspecTIR-VS. No

caso da vegetação as feições de absorção em 0,507  $\mu\text{m}$  e 0,682  $\mu\text{m}$  possibilitaram a identificação de três classes de acordo com a intensidade da feição de absorção: rala, intermediária e densa (Figura 2a). Na curva espectral média das três classes de vegetação é possível observar que na região do visível (VIS) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR) há um aumento na intensidade de refletância da classe de vegetação densa para a classe rala. No infravermelho próximo (NIR), a maior exposição das gramíneas que se desenvolvem sob o dossel das árvores de eucalipto faz com que haja uma diminuição na intensidade de refletância nesta região dos espectros para as classes de vegetação intermediária e rala.

Os resultados das análises aplicadas nos espectros de solo estão apresentados na Figura 2b. Na região entre 0,425 e 1,0  $\mu\text{m}$  a feição de absorção centrada em  $\sim 0,493 \mu\text{m}$  (atribuída à goetita) permitiu a separação do conjunto de espectros em duas classes de acordo com a profundidade da absorção indicando variações no conteúdo deste mineral nos solos analisados. A média espectral das amostras incluídas em cada classe definiu a posição de absorção máxima em 0,485  $\mu\text{m}$  e 0,480  $\mu\text{m}$  para os solos com maior e menor teor de ferro, respectivamente. Já na região entre 2,124 a 2,224  $\mu\text{m}$  as feições de absorção máxima da caulinita centradas em 2,171 e 2,202 nm permitiram a identificação de duas classes de solo com base na quantidade deste mineral nas amostras coletadas (Figura 2c).

As análises dos espectros foliares (*plant probe + leaf clip*) na região entre 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$  também permitiram o agrupamento das curvas em três classes: vegetação sadia, intermediária e estressada (Figura 2d). A região acima de 0,485  $\mu\text{m}$  teve maior peso na separação das amostras. A Figura 2d apresenta a curva espectral média das três classes de vegetação que são bastante similares entre si, com exceção da região do VIS.

Os espectros de solo (analisados com o *soil probe*) também foram separados em duas classes de acordo com as feições de absorção dos óxidos/hidróxidos de ferro (Figura 2e) e da caulinita (Figura 2f). No primeiro caso, as feições de absorção da goetita com picos máximos em  $\sim 0,489 \mu\text{m}$  e  $\sim 0,896 \mu\text{m}$  foram responsáveis pela separação dos grupos, sendo que na média dos espectros de refletância, as feições de absorção da goetita posicionam-se em  $\sim 0,489 \mu\text{m}$  e  $\sim 0,904 \mu\text{m}$  para os solos que apresentam os maiores teores de ferro e  $\sim 0,493 \mu\text{m}$  para os solos com menores teores de ferro. No caso da caulinita, apesar dos dois grupos mapeados serem bastante semelhantes, foi possível separá-los pela profundidade da feição de absorção em 2,207  $\mu\text{m}$ , que, dada a ausência de uma feição dupla bem definida, foi atribuída a uma caulinita de baixa cristalinidade.

Para a identificação das anomalias geofísicas terrestres, os resultados dos cálculos do Kres, Ures e DRAD foram classificados a partir do desvio padrão: Kres ( $< -1,5$  desvio-padrão), Ures ( $> 0,5$  desvio-padrão) e DRAD ( $> 1,5$  desvio-padrão). Os pontos que atenderam simultaneamente a estas condições estão destacados na Figura 3. Nas duas regiões amostradas, as anomalias geofísicas ocorrem próximas às anomalias gasosas de 1º ordem (área norte) e de 2º e 3º ordem (área sul).

A Figura 3 ilustra o resultado da classificação SAM juntamente com as anomalias geoquímicas e geofísicas identificadas. Enquanto na área norte predominam solos com maior quantidade de caulinita e goetita (Figura 3 a –b), na área sul ocorre exatamente o inverso (Figura 3 c-d). Em relação à vegetação (Figura 3 a –d) é necessário observar que quase todos os talhões de plantio não tinham suas árvores bem desenvolvidas na data do imageamento e sua resposta espectral mistura-se, inclusive, com os cerrado remanescentes nas áreas de plantio, dificultando as análises dos efeitos das exsudações a partir das imagens hiperespectrais. A única exceção foi em um talhão da área sul, que apresentou uma variação lateral da classe intermediária (próximo às anomalias geofísicas e químicas) para a classe densa (distante das anomalias).

A Figura 3 (e-j) apresenta a espacialização das classes de vegetação e solos sobre as imagens ProSpecTIR-VS. Os pontos, cujos espectros possuem características que

correspondem aos critérios definidos para a identificação de áreas anômalas (vegetação estressada, baixo teor de ferro e maior teor de argila) foram representados na cor vermelha em todas as imagens. É possível observar que na área norte (Figura 3 e-g), próximo às anomalias geofísicas e geoquímicas, todos os indicadores estão de acordo com o modelo teórico de alterações induzidas pela biodegradação de HCs. Já na área sul (Figura 3 h-j), apenas a vegetação respondeu conforme o modelo proposto. Esta contradição foi atribuída à declividade da área e a presença da rede de drenagem, que favorece a lixiviação dos minerais no solo e mascaram a presença dos *seeps* (Figura 4). Este comportamento também foi observado no resultado da classificação das imagens hiperespectrais.

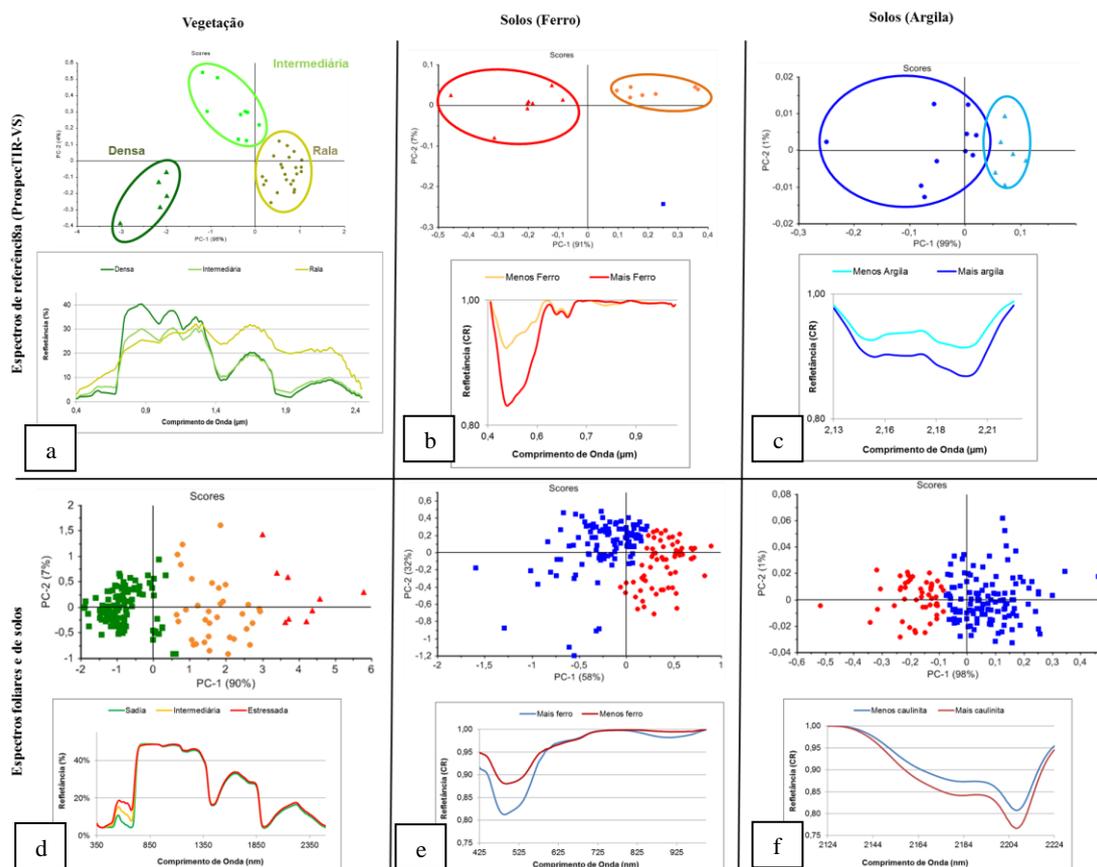


Figura 2. Resultados da APC, análise de agrupamentos e curvas espectrais médias dos espectros de referência obtidos nas imagens ProSpecTIR-VS (a – c) e das amostras analisadas com o espectrorradiômetro portátil (d – f).

#### 4. Conclusões

A utilização conjunta dos dados de espectroscopia de refletância, geofísica terrestre e imagens hiperespectrais do ProSpecTIR-VS permitiram uma melhor compreensão de como se dão as alterações causadas nos solos e vegetação na região do Remanso do Fogo/MG. Enquanto os dados de espectroscopia de refletância e imageamento apresentaram limitações advindas dos efeitos topográficos e da rede de drenagem, que mascaram o efeito da exsudação nas amostras de solo, os dados geofísicos (valores levados de DRAD e Ures baixos valores de Kres) e as análises da vegetação foram eficientes em mapear estas anomalias. O estágio de desenvolvimento das árvores de eucalipto restringem o uso do imageamento para a detecção de anomalias regionais, sendo necessário o conhecimento prévio do estágio fenológico das plantações para que qualquer interpretação possa ser feita com menores chances de erro. Observou-se que os escapes gasosos no Remanso do Fogo são pequenos e localizados. A detecção destes fenômenos em escala regional só poderá ser observada uma vez que haja uma

grande concentração destes *seeps*, seja eles interconectados ou não. Os resultados apresentados neste trabalho demonstram a eficiência e a importância de dados multifontes para a caracterização de regiões submetidas a estresse advindos da degradação de HCs em bacias petrolíferas. Por serem técnicas não destrutivas e de rápida aquisição se tornam úteis, principalmente, em etapas exploratórias e onde imagens hiperespectrais possam não estar disponíveis para utilização nas pesquisas.

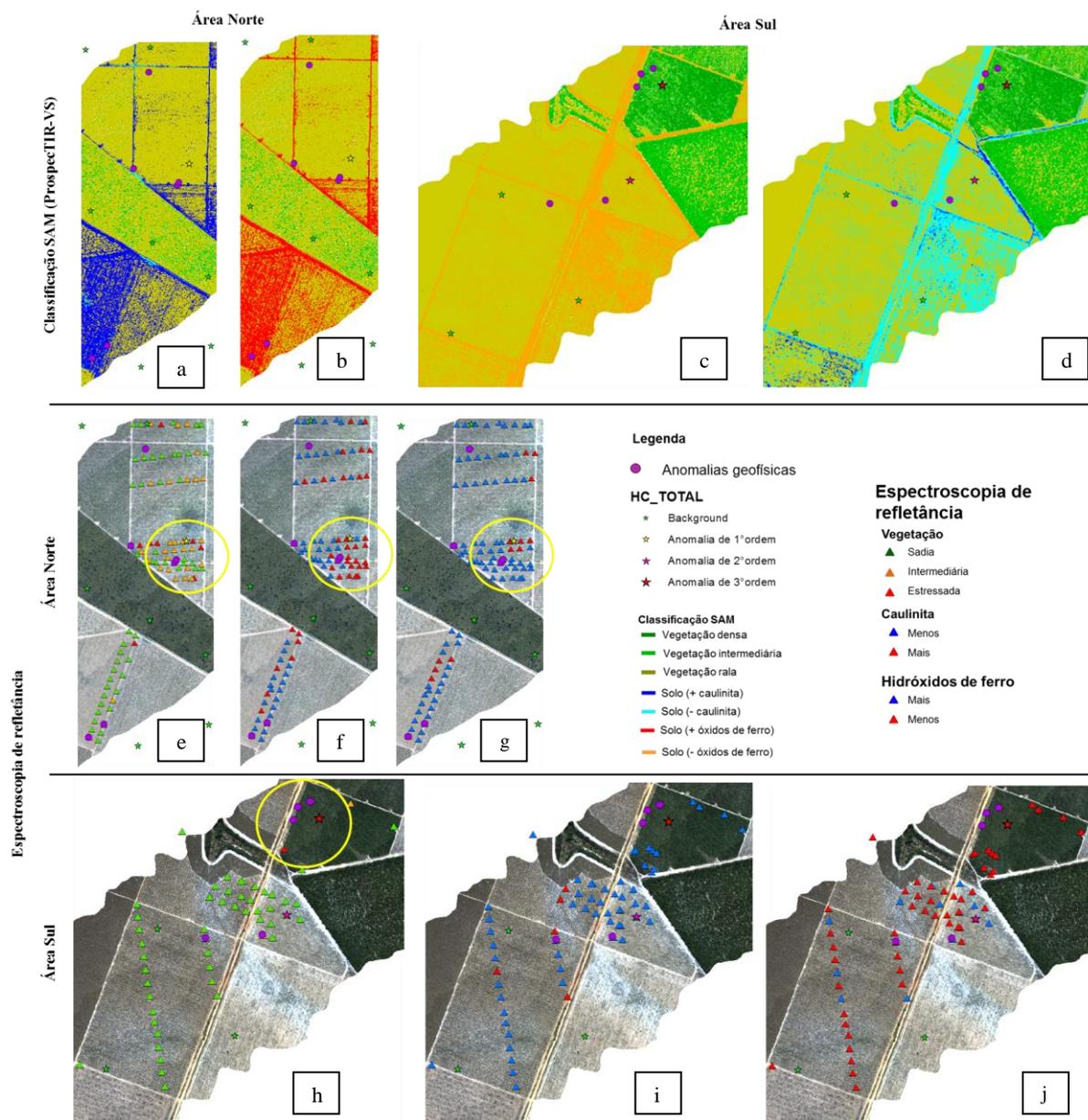


Figura 3. Resultados da APC, análise de agrupamentos e curvas espectrais médias dos espectros de referência obtidos nas imagens ProSpecTIR-VS (a – c) e das amostras analisadas com o espectrorradiômetro portátil (e – j).

### Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de doutorado, e à Petrobras pela concessão dos dados e auxílio logístico dos trabalhos de campo.

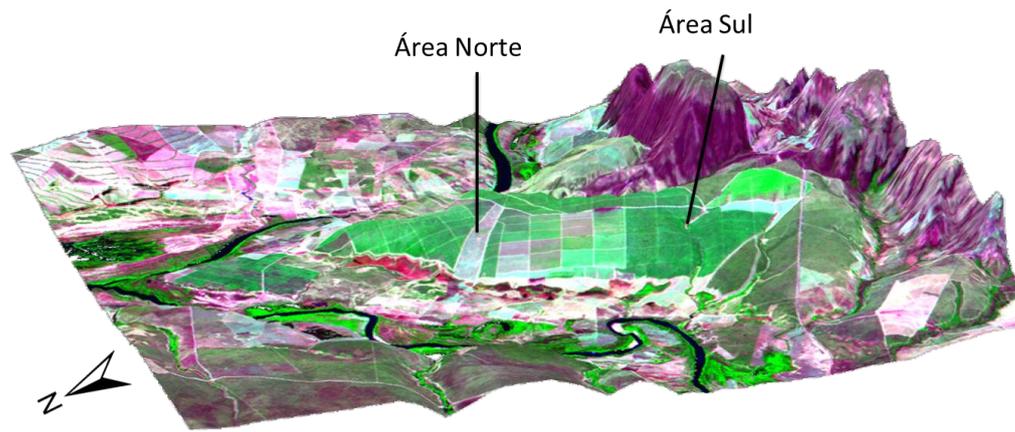


Figura 4. Rede de drenagem e amplitude topográfica: área norte ~500 m e área sul ~530 m. Imagem Landsat-TM com exagero vertical de 50 x. Fonte (Magalhães e Souza Filho, 2015).

### Referências Bibliográficas

- Curto, J.B., Pires, A. C. B., Silva, A. M., Crósta, A.P. The role of airborne geophysics for detecting hydrocarbon microseepages and related structural features: The case of Remanso do Fogo, Brazil. **Geophysics**, v. 77 (2) p. B35–B41. 2012.
- El Sadek, M.A. Application of thorium-normalized airborne radio-spectrometric survey data of Wadi Araba area, North-eastern Desert, Egypt, as a guide to the recognition of probable subsurface petroleum accumulations. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 57, p.121-130, 2002.
- Magalhães, L. A., Souza Filho, C. R. **Caracterização espectral de macro e microexsudações de hidrocarbonetos em bacias continentais brasileiras**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas-SP, 166 p. 2015.
- Noomen, M.F. **Hyperspectral reflectance of vegetation affected by underground hydrocarbon gas seepage**. Tese de Doutorado, ITC, Enschede, the Netherlands (ITC), 167p. 2007.
- Noomen, M.F., Van der Werff, H. M.A., Van der Meer, F. D. Spectral and spatial indicators of botanical changes caused by long-term hydrocarbon seepage. **Ecological Informatics**, v.8, p. 55-64, 2012.
- 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 refletância**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas-SP, 1998.
- Ribeiro, F.B., Carlos, D.U., Hiodo, F.Y., Strobino, E.F. A Least Squares Procedure For Calculating The Calibration Constants Of A Portable Gamma-Ray Spectrometer. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 113 (3), p. 251–265. 2005.
- Saunders, D.F., Terry, A.S., Thompson, C.K. Test of National Uranium Resource Evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance. **Geophysics**, v.52, n.11, p.1547-1556, 1987.
- Saunders, D.F., Burson, K.R., Branch, J.F., Thompson, C.K. Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. **Geophysics**, v. 58, n.10, p.1417-1427, 1993.
- Saunders, D.F., Burson, K.R., Thompson, C.K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. **A.A.P.G.Bulletin**, v. 83, p. 170-185, 1999.
- Schumacher, D. Hydrocarbon-Induced Alteration of Soils and Sediments, in D. Schumacher and M.A. Abrams, eds., Hydrocarbon migration and its near-surface expression: **AAPG Memoir** v. 66, p. 71-89, 1996.
- Souza Filho, C. R., Augusto, V. A., Oliveira, W. J., Lammoglia, T. Detecção de Exsudações de Hidrocarbonetos por Geobotânica e Sensoriamento Remoto Multi- Temporal: Estudo de Caso no remanso do Fogo (MG). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, p. 1-14, 2008.
- Van der Meer, F., Van Dijk, P., Van der Werff, H., Yang, H. Remote Sensing and Petroleum Seepage: a review and case study. **Terra Nova**, v. 14, n.1, p. 1-17, 2002.
- Zálan, P., Romeiro-Silva, P.C. Bacia do São Francisco. **Bol. Geoc. Petrobras**, v.15, n. 2, p. 561-571, 2007.