

## Detecção direta ultra e hiperespectral de solos contaminados por hidrocarbonetos líquidos e sua relação com a vegetação sobrejacente

Lucíola Alves Magalhães<sup>1</sup>  
Ieda Del'Arco Sanches<sup>1</sup>  
Rosa Elvira Correa Pabón<sup>1</sup>  
Giuliana Clarice Mercuri Quitério<sup>1</sup>  
Marcos Nopper Alves<sup>2</sup>  
Wilson José Oliveira<sup>3</sup>  
Carlos Roberto de Souza Filho<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/IG  
6152 – 13083-970 - Campinas - SP, Brasil  
{luciola, jrosa83, iedasanches, beto, giuliana@ige.unicamp.br}

<sup>2</sup> CPQBA – UNICAMP  
Caixa Postal 6171 - 13081-970 - Campinas – SP  
mnopper@cpqba.unicamp.br

<sup>3</sup> PETROBRAS- ENGENHARIA/IETEG/ETEG/EAMB  
Av. Almirante Barroso, 81, 12o andar. Centro. CEP 20031-00 - Rio de Janeiro - RJ  
wilsonjo@petrobras.com.br

**Abstract.** This paper describes the use of ultraspectral and hyperspectral remote sensing data to discriminate soils and vegetation spectral patterns under liquid hydrocarbons (HCs) contaminations. The main purpose was the direct detection of HCs in soils. An experiment was conducted between April and May/2010 at the State University of Campinas to simulate small pipelines leakages of gasoline and diesel in tropical soils. Leaf and canopy reflectance of *Phaseolus vulgaris* was obtained using an ASD FieldSpec® Hi-Res spectroradiometer, as well as soil spectral data. The range between 1600 and 1800 nm were continuum removed to enhance absorption features of HCs centered at ~1730 nm. Additionally, an airborne hyperspectral imaging was performed at the end of the experiment using the ProSpecTIR-VS sensor, with 357 bands and 1m spatial resolution. The HC index was applied both to reflectance and continuum-removed reflectance image. The results demonstrate that plants towards senescence display absorption features similar to those typical of HCs. This may influence the results obtained in image classification aimed to detect hydrocarbon content. The secondary HC absorption feature at ~1760 nm plays a fundamental role in the separation of dry vegetation from soils contaminated with diesel. The HC index showed superior performance when applied to continuum removed reflectance data, although yet provides some ambiguous results for HCs and dry vegetation features.

**Palavras-chave:** reflectance spectroscopy, airborne imaging, hydrocarbon index, espectroscopia de refletância, imageamento aeroportado e índice de hidrocarboneto.

### 1. Introdução

O rompimento da fragilidade dos diferentes ambientes devido aos vazamentos de petróleo têm se tornado nos últimos anos uma questão ambiental preocupante. A demora nos diagnósticos, além de levar à degradação do meio ambiente, cuja recuperação se revela custosa e muitas vezes demorada, pode gerar problemas sérios de saúde nas populações atingidas (Boffeta et al., 1997). Nesse contexto, a detecção precoce de pequenos vazamentos é imprescindível, pois minimiza os riscos de acidentes humanos e danos ambientais, que podem ocorrer despercebidos ao longo de meses ou até anos.

Na caracterização de locais contaminados, técnicas de sensoriamento remoto são ferramentas úteis, pois permitem analisar grandes áreas, e em tempo real, sem a restrição de acessibilidade. Um dos sistemas de sensoriamento remoto de mais recente desenvolvimento

são os sistemas hiperespectrais, os quais possuem centenas de bandas ordenadas de forma contínua ao longo do espectro eletromagnético, permitindo uma classificação mais precisa através das características espectrais do objeto ou superfície de estudo.

A aplicação do sensoriamento remoto na identificação de hidrocarbonetos (HCs) tem sido utilizada como método para estabelecer os limites das manchas de contaminação, tanto na água como no solo. A identificação é feita com sensores passivos e ativos, sendo estes últimos muito utilizados na identificação de vazamentos de óleo cru no mar (e.g. Van der Meer et al., 2002; Bannerman, et al., 2009). Diversos estudos têm sido realizados utilizando as alterações espectrais em solos e vegetação para a detecção de vazamentos e também de exsudações naturais de gás para a exploração de HCs (Noomen et al., 2005; Lammoglia et al., 2007; Souza Filho et al., 2008).

Cloutis (1989) demonstrou que os materiais com presença de HC caracterizam-se por apresentar picos de máxima absorção nos comprimentos de onda de 1730 nm e 2310 nm. Estas feições de absorção têm sido utilizadas por diversos autores para detectar, de forma direta, solos contaminados com HCs considerando a resposta espectral do próprio HC (Kühn et al., 2004; Forrester et al., 2010).

Neste contexto, o presente trabalho tem como meta a detecção direta da presença de HCs nos solos a partir da análise das assinaturas espectrais de solos contaminados com gasolina e diesel e sua relação com as feições de absorção da vegetação sobrejacente no intervalo entre 1600 a 1800 nm.

## **2. Metodologia de Trabalho**

### **2.1. Delineamento Experimental**

O experimento foi realizado no ano de 2010 no Centro Pluridisciplinar de Pesquisas Químicas, Biológicas e Agrícolas da Universidade Estadual de Campinas (CPQBA-UNICAMP) com o objetivo de detectar precocemente pequenos vazamentos de combustíveis em dutos de transporte a partir das alterações espectrais causadas na vegetação (Magalhães et al., 2011). Foram utilizadas cinco espécies vegetais: *Brachiaria brizantha* (braquiária), *Saccharum spp* (cana de açúcar), *Phaseolus vulgaris* (feijão), *Neonotonia wightii* (soja) e *Zea mays* (milho), e dois tipos de combustíveis: gasolina e diesel. O experimento consistiu no plantio destas espécies em três canteiros (300 m<sup>2</sup> cada) que foram submetidos a três tratamentos diferentes: i) canteiro irrigado somente com água, representando o controle (CTR), ii) canteiro irrigado com água e contaminados com óleo diesel (DSL) e iii) canteiro irrigado com água e contaminados com gasolina (GSL). As contaminações consistiram no gotejamento diário de 200 litros de cada combustível no solo, após um vazamento inicial e único 600 litros destes mesmos contaminantes.

### **2.2. Espectroscopia de refletância de campo**

Para acompanhar as alterações espectrais na vegetação induzidas pela presença dos combustíveis nos solos, foram realizadas leituras espectrais do dossel e das folhas, além do imageamento hiperespectral aeroportado, e medidas espectrais em amostras de solos superficiais (Tabela 1). Nesse trabalho, a análise da vegetação foi restrita ao feijão, pois, por ser uma cultura de curto ciclo fenológico gerou um rápido aumento na proporção de solo nas misturas espectrais obtidas a partir do dossel, aumentando a possibilidade do sensor enxergar as feições dos próprios hidrocarbonetos (HCs) presentes nos solos e centradas em ~1730 nm (Clutis et al., 1989).

Tabela 1. Data das medições espectrais realizadas no dossel e nas folhas de feijão e de coleta de solos para posterior análise.

		Abril								Maio																	
		19	20	22	26	27	28	29	30	3	4	5	6	7	10	11	12	13	14	17	18	19	20	21	27	28	29
Folha	CTR							M3				M4	M5	M6		M7											
	DSL		M1					M3				M4	M5	M6		M7											
	GSL					M2		M3				M4	M5														
Dossel	CTR			M1	M2			M3			M5			M7		M8											M9
	DSL	M1					M2	M3	M4	M5	M6					M8									M9		
	GSL				M1	M2	M2	M3	M4	M5		M6		M7						M8					M9		
<b>SOLOS</b>		C1								C2								C3				C4		C5			
<b>Volume*</b>		2.7								6								9.3				12		13			

\* Volume total de DSL e GSL (L/m<sup>3</sup>) acumulado nos solos dos canteiros no momento da coleta das amostras.

M = medição espectral, C = coleta

As medições espectrais do dossel das culturas foram realizadas com o uso do espectrorradiômetro portátil FieldSpec® 3 Hi-Res, da *Analytical Spectral Devices Inc.* a bordo de uma plataforma deslizante, com 3.65 m de altura. Uma lente de 5° de abertura possibilitou a amostragem de áreas com 30 cm de diâmetro, realizadas sempre na porção central de cada parcela e antes da contaminação diária dos solos e plantas (Figura 1a).

Os espectros foliares foram adquiridos com o auxílio de um *plant probe* acoplado ao espectrorradiômetro (Figura 1b), a fim de evitar interferências atmosféricas e obter somente a informação espectral das folhas, sem interação com outros componentes (eg. caules e solos). As leituras foliares foram realizadas somente até o dia 17 de maio devido a ausência de folhas nas datas seguintes.

Amostras superficiais dos solos de cada tratamento foram coletadas em cinco datas distintas, sempre após as contaminações diárias, e analisadas ao final do experimento com a utilização de um *soil probe* acoplado ao espectrorradiômetro portátil (Figura 1c).

Os espectros médios de cada tratamento e de cada data de coleta tiveram o contínuo removido (CR) no intervalo entre 1600 e 1800 nm, visando o realce das feições espectrais de interesse.

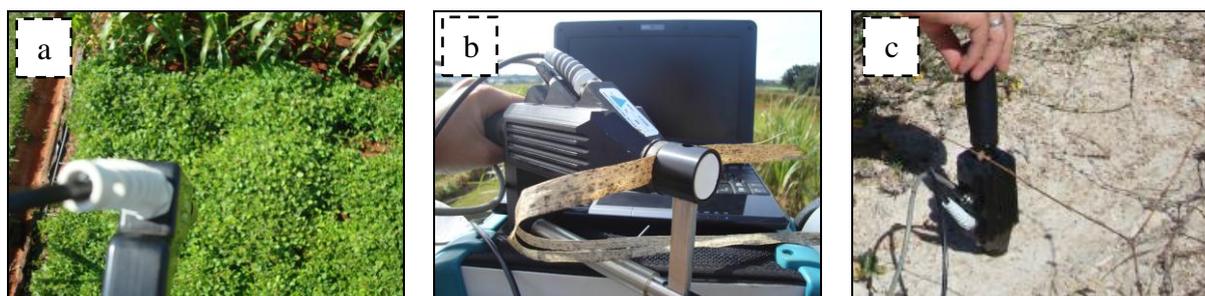


Figura 1. Exemplos de medições espectrais de diferentes espécies vegetais obtidas a partir do (a) dossel e do (b) *plant probe* e de solos com o auxílio do *soil probe* (c).

### 2.3. Espectroscopia de Imageamento – Sensor Hiperespectral ProSpecTIR-VS

Em 17 de junho de 2010, após o término do experimento, um sobrevôo para imageamento hiperespectral da área experimental foi realizado. O sensor ProSpecTIR-VS operou com 357 bandas no intervalo de 350 a 2500 nm e 1 metro de resolução espacial. As imagens foram entregues com correção atmosférica realizada no *software* ATCOR 4. Kühn et al. (2004) propôs o índice para detecção direta do HC (HI = *Hidrocarbon index*) a partir da sua feição de

absorção centrada em 1730 nm (Equação 1). O HI foi testado em uma imagem de refletância e outra com o CR.

$$HI = (\lambda_B \lambda_A) * (R_C - R_A / \lambda_C - \lambda_A) + R_A - R_B \quad (1)$$

onde,  $R_A \lambda_A$ ;  $R_B \lambda_B$  e  $R_C \lambda_C$  representam a radiância/comprimento de onda para cada par de pontos que definem a feição de absorção em 1730 nm, que na base de dados do HyMap, correspondem as bandas 24 (1705 nm), 26 (1729 nm) e 27 (1741 nm), respectivamente. Neste trabalho, estes comprimentos de onda correspondem às bandas 238, 242 e 244 do sensor ProSpecTIR-VS.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Espectroscopia de refletância de campo

A análise dos espectros foliares do feijão demonstrou haver uma única feição de absorção dominante centrada em 1774 nm ao longo de todo o experimento e para os três tratamentos (Figura 2). Esta feição está associada ao amido, que é a molécula principal de reserva de alimento para as plantas (Kumar et al., 2001).

Os espectros do dossel foram organizados de acordo com suas principais feições de absorção no intervalo analisado (Tabela 2 e Figura 3). Com o avançar da senescência/estresse houve uma diminuição de intensidade da absorção inicialmente centrada em 1774 nm – Grupo1 e o seu deslocamento para comprimentos de ondas menores: 1766nm - Grupo 2 e 1765 nm - Grupo 3. O desenvolvimento de uma feição de absorção centrada em 1731 nm – Grupo2 e 1726 nm – Grupo 3 também foi observado. O último grupo é formado pelas duas últimas contaminações do DSL, cujas feições de absorção são centradas em 1725 e 1760 nm. Segundo Kokaly e Clark (1999), as feições centradas em 1766 nm estão relacionadas à celulose e em 1728 à celulose e lignina.

Para a análise de solos, volumes iguais e superiores a 6 L/m<sup>3</sup> de DSL (Grupo2) foram separados dos demais tratamentos e dos solos do DSL com 2.7L/m<sup>3</sup> (C1), a partir das feições de absorção em ~1725 e ~1760 nm. Os solos do GSL e CTR foram todos incluídos no Grupo1, não permitindo a detecção deste tipo de contaminação a partir do SR.

Enquanto a medição proximal (*soil probe*) dos solos do DSL permitiu a sua identificação após 6 L/m<sup>3</sup> de diesel serem gotejados nos solos, as medidas distais (dossel) só permitiram a sua separação após 8.7 L/m<sup>3</sup>. A diminuição da massa fresca e úmida da leguminosa e o aumento na concentração residual do diesel na superfície dos solos, devido a sua baixa mobilidade e volatilidade em contraste com a gasolina, aumentou a possibilidade de detecção direta deste combustível no solo. As duas feições estritamente relacionadas ao diesel nos espectros dos solos também foram observadas nos espectros de dossel dos estágios finais do feijão, com diferenças em torno de 1nm e 5nm para a feição em ~1725 e ~1760 nm, respectivamente. Essa constatação torna a segunda feição desta dupla absorção como um ponto importante na separação espectral entre vegetação seca e solos contaminados com HCs.

Todas estas feições observadas foram reamostradas para a resolução espectral do sensor ProSpecTIR-VS (Tabela 2) para serem utilizadas na aplicação do HI sobre as imagens.

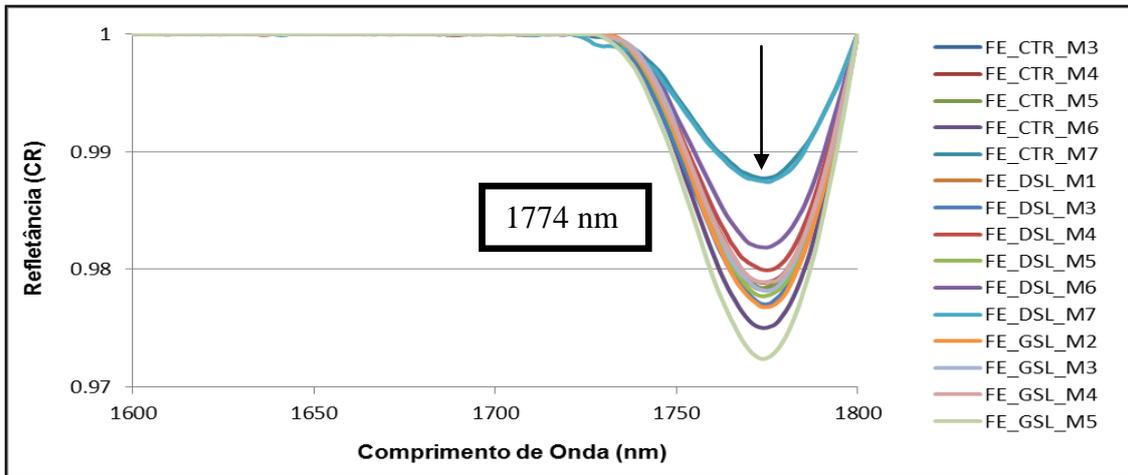


Figura 2. Espectros foliares (CR) do feijão com destaque para a região entre 1600 e 1800 nm, onde a feijão em 1774 nm é comum a todos os tratamentos e em todas as datas de coleta.

Tabela 2. Identificação dos grupos gerados a partir da análise espectral do dossel do feijão e a posição das feições de absorção dos materiais estudados.

Grupo	Coletas	Comprimento de Onda (nm)	Comprimento de Onda (nm) e Bandas Spectir
<b>1 - dominado por vegetação saudável e em estágio inicial de senescência</b>	CTR_M1-M5, DSL_M1-M4 e GSL_M1-M3	1774	1774 (b249)
<b>2 - dominado por vegetação em estágios mais avançados de senescência/contaminação</b>	CTR_M7-8, DSL_M5-6	1731 1766	1730 (b242) 1766 (b248)
<b>3 - dominado por vegetação seca e com maior exposição de solos</b>	CTR_M9 e GSL_M4-9	1726 1765	1730 (b242) 1768 (b248)
<b>4 - formado pelas duas últimas medições espectrais no DSL</b>	DSL: M8-9	1725 1760	1724 (b241) 1761 (b247)
<b>SOLOS</b>	DSL: C2-5	1725 1760	1724 (b241) 1761 (b247)

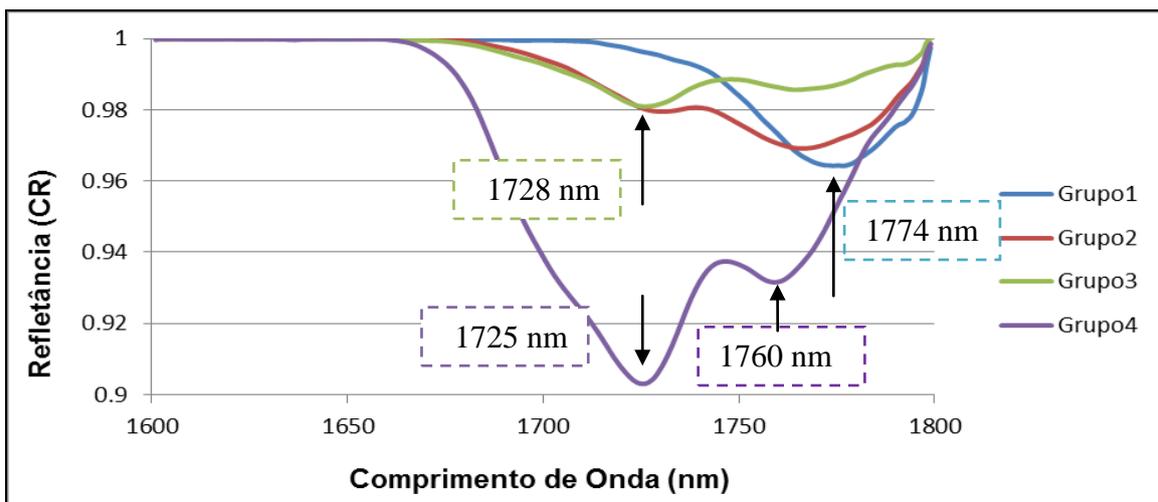


Figura 3. Espectros médios dos grupos identificados a partir das leituras espectrais do dossel, demonstrando a diminuição da intensidade e deslocamento da feição inicialmente centrada em 1774 nm (Grupo1) e o desenvolvimento de uma feição em ~ 1728 nm com a evolução da senescência/estresse (Grupos2 e 3). No Grupo4, as feições de absorção estão centradas em 1725e 1760 nm.

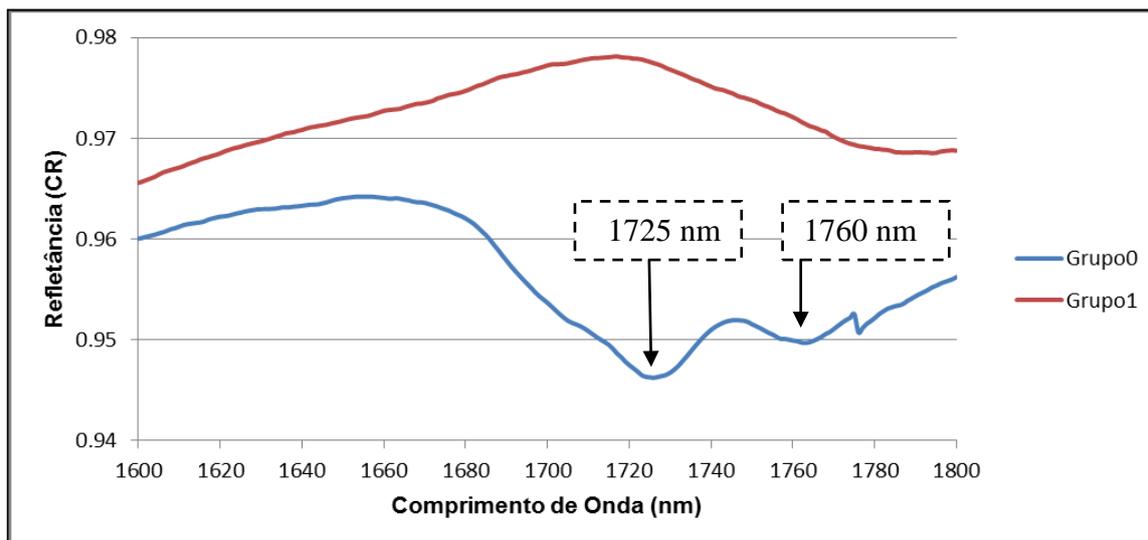


Figura 4. Espectros médios dos grupos identificados a partir das leituras espectrais dos solos, demonstrando as feições de absorção centradas em 1725 e 1760 nm para o Grupo 0, formado por solos contaminados com volumes  $\geq 6\text{L/m}^3$ , em contraste com a ausência de feições de absorção nos solos do Grupo 1.

### 3.2. Espectroscopia de Imageamento – Sensor Hiperespectral ProSpecTIR-VS

A Figura 5 apresenta o resultado do HI aplicado sobre uma imagem de refletância e refletância com CR. Na imagem de refletância (Figura 5a), a maior parte dos pixels com altos valores de HI representam as gramíneas plantadas entre os canteiros do DSL e GSL. Os solos expostos na imagem, mesmo os do DSL, não foram mapeados como pixels portadores de HC. Na Figura 5b, os pixels mapeados com altos valores de HI passam a ser restritos à porção interna dos canteiros e nas áreas de maior proporção de solo exposto, principalmente na parcela 2 dos solos cultivados com feijão. No entanto, os três tratamentos apresentaram pixels mapeados como portadores da feição do HC, mesmo que em menor proporção para os solos do CTR e GSL, nesta ordem. Tal comportamento possivelmente está associado à feição de absorção da lignina e celulose ( $\sim 1728\text{ nm}$ ), que passa a ser mais acentuada com o avanço da contaminação e senescência natural e posiciona-se na b242 do sensor ProSpecTIR-VS, o que dificulta a separação do HC da vegetação seca utilizando o HI.

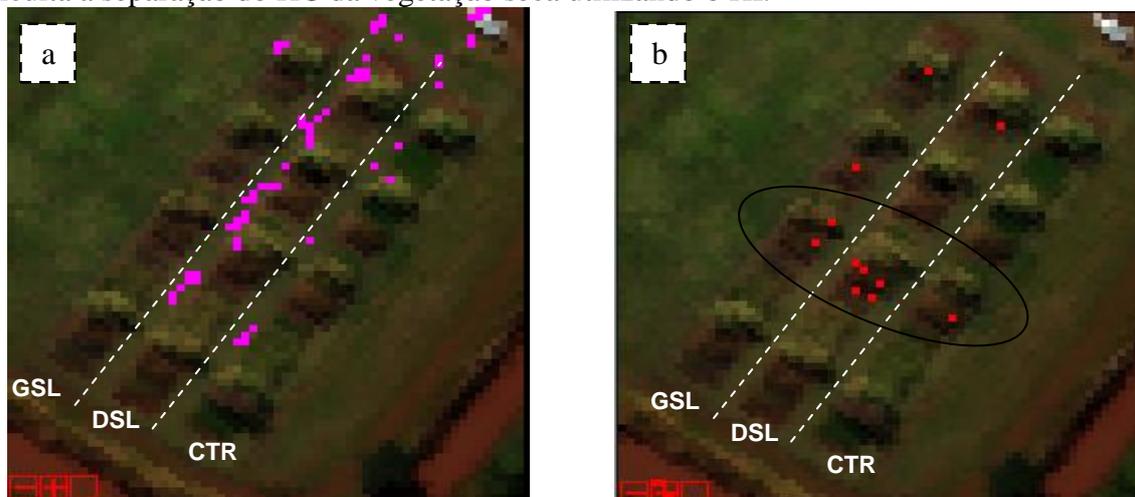


Figura 5. Resultados do HI sobreposto à imagem hiperespectral ProSpecTIR-VS (R56G36B14): (a) imagem de refletância e (b) imagem de refletância com CR, onde a elipse preta destaca uma das parcelas cultivadas com feijão. Os canteiros da direita para a esquerda correspondem ao tratamento CTR, DSL e GSL.

As curvas espectrais médias dos pixels mapeados nas duas imagens tiveram o contínuo removido no intervalo entre 1.6 e 1.8  $\mu\text{m}$  e estão apresentadas na Figura 6, juntamente com o espectro do Grupo 4 do dossel, que é dominado pelas feições de absorção do diesel no solo. A principal diferença entre os espectros médios obtidos nas imagens é a maior intensidade de absorção dos solos mapeados a partir da imagem com o CR.

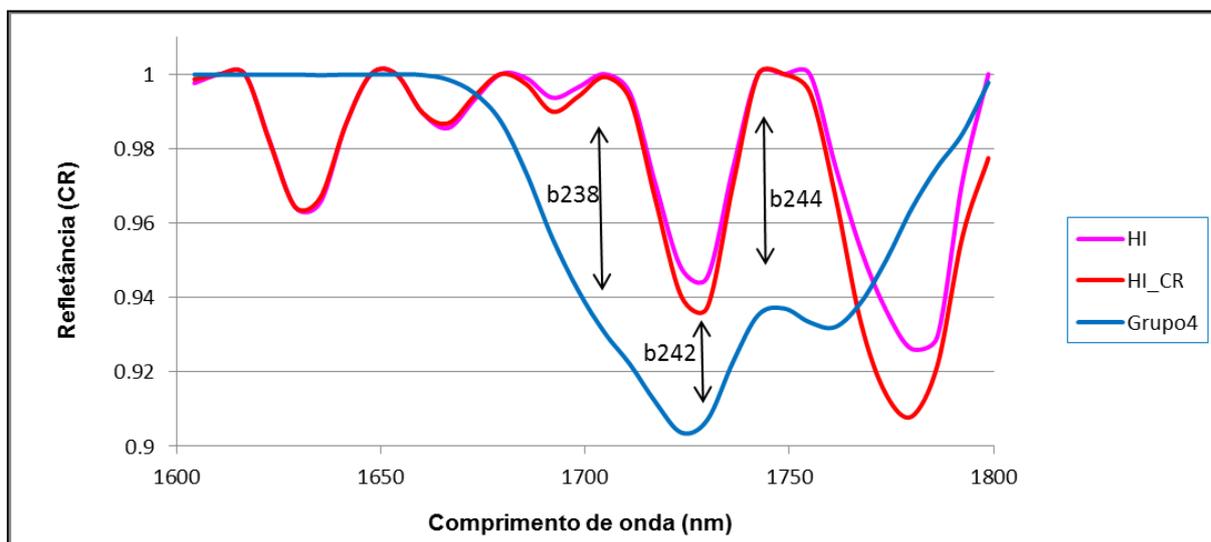


Figura 6. Espectro médio dos pixels mapeados com altos valores de HI obtidos nas imagens de refletância e refletância com CR em comparação ao Grupo4 do espectro do dossel, que é dominado pelas feições de absorção do diesel no solo. As setas indicam a posição das bandas utilizadas no cálculo do HI.

#### 4. Conclusões

O estudo das feições espectrais de folhas e dossel de culturas de feijão desenvolvidas sobre solos contaminados com combustíveis líquidos permitiu a compreensão das absorções que dominam os espectros na região entre 1600 e 1800 nm - região que compreende a principal absorção do HC, centrada em  $\sim 1730$  nm. No nível foliar, a presença constante e única da feição em 1774 nm (amido) sofre deslocamento para comprimentos de ondas menores ( $\sim 1765$  nm - celulose) e diminuição da intensidade de absorção, com o avanço da senescência e contaminação dos solos. Adicionalmente, há o desenvolvimento de uma feição centrada em  $\sim 1728$  nm (lignina e celulose). A análise dos espectros do solo indicou duas feições centradas em 1725 e 1760 nm, estritamente induzidas pela presença do diesel nos solos. A gasolina não pode ser identificada.

O índice proposto por Kun et al. (2004) considera somente a feição de absorção centrada em 1730 nm. O emprego do HI na imagem hiperespectral convertida para refletância não foi capaz de mapear espectros do solo contaminado com diesel, enquanto o emprego do índice sobre uma imagem de refletância com o CR foi mais eficiente em identificá-los. No entanto, pixels de todos os tratamentos foram mapeados. Tal fato está relacionado à coincidência da absorção do HC ( $\sim 1730$  nm) com as feições de absorção das plantas em estágios finais do ciclo fenológico e posicionadas em  $\sim 1728$  nm. A banda 242 do sensor ProSpecTIR-VS, utilizada como banda central do HI, induz a essa ambiguidade, visto que esta banda está associada aos componentes bioquímicos, conforme os resultados obtidos a partir da análise ultraspectral dos espectros de vegetação e reamostragem para a resolução do sensor ProSpecTIR-VS.

Os ensaios realizados nesse estudo demonstraram que a detecção direta da presença de HC nos solos é possível, principalmente considerando-se áreas com maior exposição da contaminação e/ou ausência de vegetação. A feição secundária e centrada em 1760 nm

funciona como uma feição adicional na separação do material vegetal dos solos contaminados com HC e deverá ser testada futuramente visando aperfeiçoar a identificação direta dos HCs em imagens do sensor ProSpecTIR-VS.

### **Agradecimentos**

Lucíola A. Magalhães agradece à FAPESP pela bolsa de doutorado. Os autores agradecem a gerência e pesquisadores do Programa Tecnológico de Transporte (PROTRAN), do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CENPES) da Petrobras, nas pessoas de Pedro Altoé Ferreira, Lis Maria Leoni Rabaco e Renato Seixas da Rocha, pelo apoio financeiro e logístico dedicado aos Projetos Biomarcadores I e II desenvolvidos em parceria com a UNICAMP.

### **Referências Bibliográficas**

Bannerman, K., Rodriguez, M. H., de Miranda, F. P., Pedrosa, E. C., Caceres, R. G., Lopez Castillo, O., Operational applications of RADARSAT-2 for the environmental monitoring of oil slicks in the Southern Gulf of Mexico. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS, 3: 381-383, 2009.

Bofetta, P., Jourenkova, N. and Gustavson, P., Cancer risk from occupational and environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Cancer Causes and Control*, 8(3): 444-472, 1997.

Clutis, E. A.. Spectral reflectance properties of hydrocarbons: remote sensing implications. *Science*, v.245, p. 165-168, 1989.

Forrester, S., Janik, L. and McLaughlin M., An infrared spectroscopic test for total petroleum hydrocarbon (TPH) contamination in soils. In: 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia, p13 - 16, 2010.

Kumar, L., Schmidt, K., Dury, S., Skidmore, A.. Imaging spectrometry and vegetation science. In: van der Meer F.D.; Jong, S.M. (Eds.). *Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications*. Vol. 4. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2001. p. 111-155.

Kühn, F., Oppermann, K., Hörig, B., Hydrocarbon Index – an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12): 2467-2473, 2004.

Kokaly, R. F.; Clark, R. N.. Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression. *Remote Sensing of Environment*, v. 67, p. 267-287, 1999.

Lammoglia, T., Souza Filho, C. R., Almeida Filho, R., Caracterização de microexsudações de hidrocarbonetos na Bacia do Tucano Norte (BA) por geoestatística, classificação hiperespectral e redes neuronais. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4): 798-811, 2007.

Magalhães, L.A.; Quitério, G.C.M.; Souza Filho, C.R.; Almeida, T.I.R.; Alves, M.N.; Oliveira, W.J.; Rabaco, L.M.L.; Rocha, R. Imagens ProSpecTIR-VS e espectroscopia de reflectância aplicados na caracterização espectral dos dosséis de cinco culturas vegetais cultivadas em solo com vazamentos controlados de hidrocarbonetos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15, 2011, Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. p. 8567-8574. On-line. ISBN 978-85-17-00057-7. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1596.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2012.

Noomen, M., Van der Meer, F. and Skidmore, A., 2005. Hyperspectral remote sensing for detecting the effects of three hydrocarbon gases on maize reflectance. Obtido da fonte: <http://www.isprs.org/proceedings/2005/ISRSE/html/papers/921.pdf>

Souza Filho, C. R., Augusto, V., Oliveira, W. J., e 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*, 38(2-suplemento): 228-243, 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*, 14: 1-17, 2002.