

Imagens ProSpecTIR-VS e espectroscopia de refletância aplicados na caracterização espectral dos dosséis de cinco culturas vegetais cultivadas em solo com vazamentos controlados de hidrocarbonetos

Lucíola Alves Magalhães¹
Giuliana Clarice Mercuri Quitério¹
Carlos Roberto de Souza Filho¹
Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida²
Marcos Nopper Alves¹
Wilson José Oliveira³
Lis Maria Leoni Rabaco³
Renato Rocha³

¹ IG e CPqBA / Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
Caixa Postal 6152 – 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
{giuliana, lucíola, beto@ige.unicamp.br} {mnopper@cpqba.unicamp.br}

²IG / Universidade de São Paulo – USP
Rua do Lago, 562 - 05508-080 - São Paulo - SP, Brasil
{talmeida@usp.br}

³PETROBRAS- CENPES e Engenharia/IETEG/ETEG/EAMB
Av. Horácio de Macedo 950 - 21941-915 - Rio de Janeiro – RJ
{wilsonjo, listmaria, renator@petrobras.com.br}

Abstract Current methods of pipeline monitoring do not allow the early detection of small hydrocarbon spills. Remote sensing techniques allow the assessment, in a non-destructive way, of the state of vegetation health. Several studies have successfully applied optical remote sensing for the indirect detection of hydrocarbon seepages from the stresses caused in the plants. Assuming that liquid fuels (gasoline and diesel) are also potential vegetation stressors, this study investigated the spectral characteristics of five agricultural crops subjected to daily contamination of 200 l of HCs, using reflectance spectroscopy (portable FieldSpec Hi-Res sensor, with 2150 bands in the VNIR-SWIR spectrum) and imaging spectroscopy (airborne ProSpecTIR-VS hyperspectral sensor, with 357 bands in the VNIR-SWIR spectrum). The results derived from the hyperspectral imagery were significantly similar to the spectral signatures obtained in the field. Gasoline has proven to be an agent that impact more stress than diesel for all cultures experimented with, except in the case of *Brachiaria brizantha*. This species showed typical spectral responses of vegetation stressed both for treatments with gasoline and diesel, a fact that makes this plant more suitable for the purpose of detecting HCs leaks along pipelines through remote sensing.

Palavras-chave: hiperespectral, hidrocarbon, vegetação, sensoriamento remoto, hidrocarboneto, vegetação.

1. Introdução

Os métodos atuais de detecção de vazamentos em dutos, baseados em quedas de pressão e inspeções locais, não permitem a detecção precoce de pequenos vazamentos. Sendo assim, é possível que estes ocorram ao longo de meses e anos sem serem notados, causando danos ao meio ambiente com contaminações de solos e aquíferos superficiais. Glória (2002) apresenta métodos alternativos para detecção e localização de vazamentos baseados em prospecção geoquímica, biogeoquímica, geofísica (eletrorresistividade e radar de penetração no solo) e de fuga de gás. Dentre os métodos apresentados, somente a prospecção biogeoquímica a partir de imagens orbitais ou aéreas consegue investigar, com custos relativamente baixos e otimização do tempo de aquisição das informações, grandes extensões de dutos. Levando-se em consideração que o Brasil possui mais de 12.000 km de linhas de dutos (Labrunie, 2008) monitoradas de forma heterogênea, detectar precoce e pontualmente estes pequenos

vazamentos a partir de técnicas de sensoriamento remoto poderá ser uma solução alternativa ou complementar a esta questão.

As alterações no sistema solo/vegetação causadas pela interação com hidrocarbonetos (HCs) foram objetos de estudo de diversos autores (e.g Noomen et al. 2003). Destacam-se, como as mais importantes, anomalias geobotânicas, alterações tonais em solos (*bleaching*) e presença de minerais com feições espectrais diagnósticas (argilas). A presença dos HCs nos solos também pode ser detectada diretamente a partir das feições de absorção destes compostos, centradas em 1700 e 2300 nm (Hörig et al. 2001) e que podem ser identificadas a partir de concentrações mínimas em solos argilosos e arenosos (Wilkemann, 2005).

O objetivo desta pesquisa é a partir de um experimento em escala real investigar os impactos causados pelos combustíveis em cinco espécies vegetais comumente presentes nas adjacências de polidutos e representativas da vegetação típica de atividades agropecuárias do Estado de São Paulo: *Brachiaria brizantha* (BR), *Saccharum spp* (CA), *Phaseolus vulgaris* (FE), *Neonotonia wightii* (SJ) e *Zea mays* (MI). Com o desenvolvimento do trabalho, será possível determinar a possibilidade de permanência de determinadas culturas ao longo de dutos, os tipos de culturas mais sensíveis ao estresse induzido por vazamentos e também, identificar a partir de qual momento (tempo de exposição e volume de HC injetado) as alterações já são perceptíveis remotamente.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Experimento em escala real

O experimento foi realizado em condições semi-controladas em uma área experimental do Centro Pluridisciplinar de Pesquisas Químicas Biológicas e Agrícolas (CPQBA) da Unicamp.

Neste local, foram instaladas três valas de 1 metro de profundidade previamente preparadas em conformidade com as normas da CETESB (Figura 1).

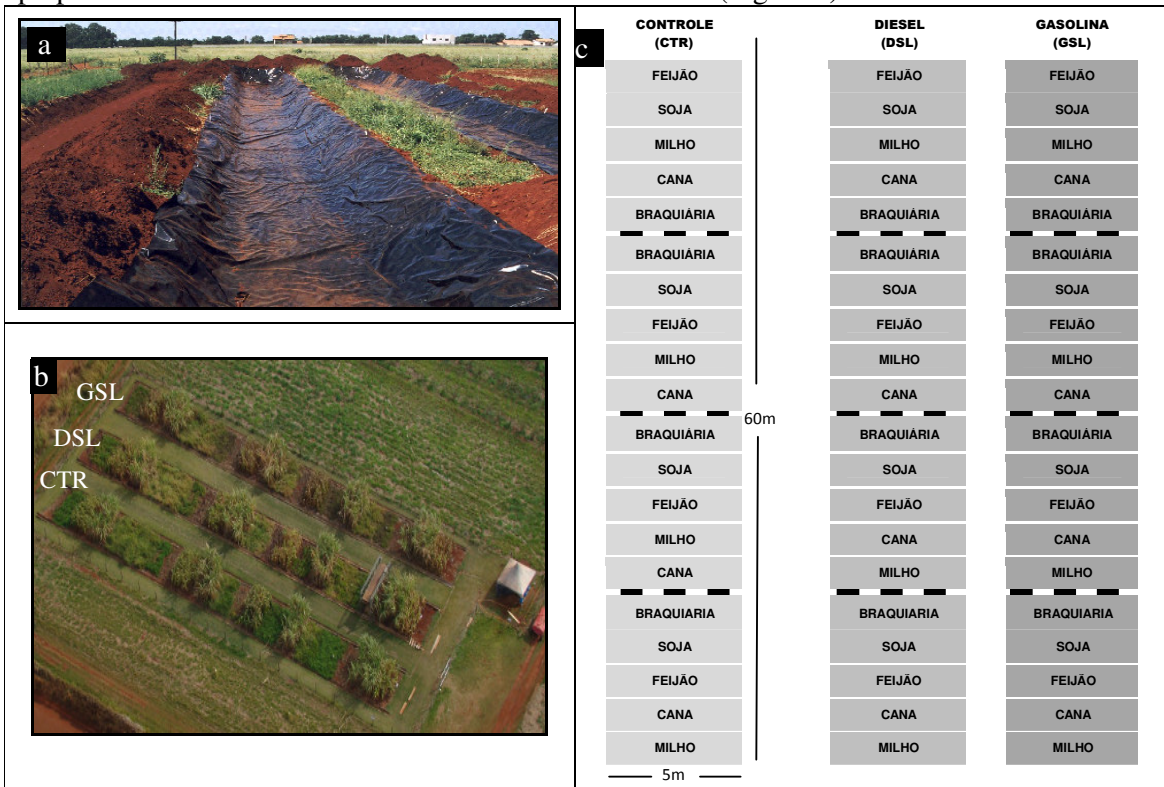


Figura 1: Detalhes da área do experimento: a) Revestimento das valas com mantas de polietileno de alta densidade para impedir a contaminação do solo da área externa ao experimento, b) Vista aérea dos canteiros após plantio e início do experimento e c) Croqui do campo experimental (de cima para baixo: Bloco 1 a Bloco 4).

Nelas, as cinco espécies vegetais selecionadas foram plantadas. Cada vala, referenciadas aqui como canteiros, representou um tratamento: i) plantas que não receberam contaminação com HCs (CTR), ii) plantas contaminadas com gasolina (GSL) e plantas contaminadas com diesel¹ (DSL). Cada canteiro, com sessenta metros de comprimento e cinco de largura, foi dividido em quatro blocos iguais com cinco parcelas cada, onde foram plantadas as espécies vegetais selecionadas, perfazendo um total de quatro repetições para cada tratamento.

2.2. Irrigação e vazamento de HCs

A irrigação dos canteiros e os vazamentos dos combustíveis foram realizados na superfície do terreno a partir de um sistema de gotejamento totalmente controlado. O sistema é composto por um gerador, uma bomba, quatro tonéis de plástico com 200 litros cada (um para armazenar água, um para cada tipo de combustível e um para resíduos) e mangueiras com sistema de fechamento independentes (Figura 2a).

Cada parcela recebeu cinco linhas de tubo gotejador (Figura 2b), a partir do qual o primeiro vazamento foi de 600 litros de combustíveis, seguidos por vazamentos diários de 200 litros (com exceção dos finais de semana), entre 26/04/10 e 21/05/10, totalizando 3.800 litros de gasolina e diesel (Tabela 1) e 600 litros de água.

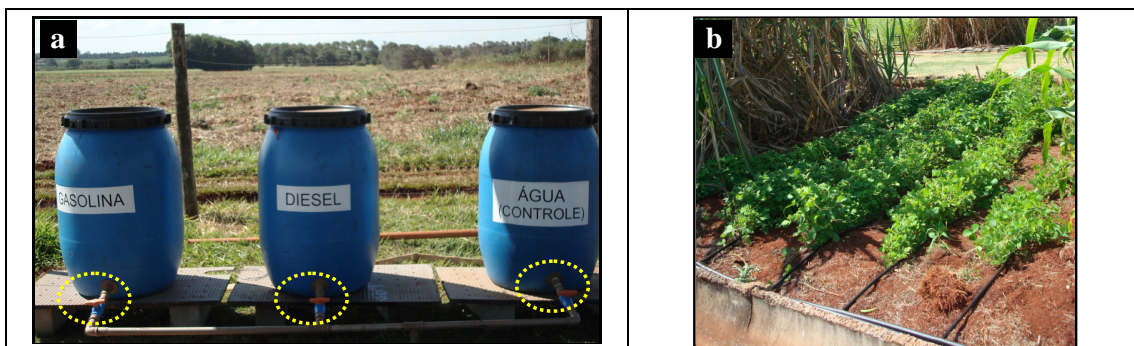


Figura 2: a) Sistema e irrigação e vazamento instalado no experimento: tonéis identificados pelo tipo de líquido que contém e cada um com uma torneira de fechamento independente e b) Disposição dos tubos gotejadores em uma parcela (soja).

2.3. Aquisição das medidas espectrais *in situ*

As medidas espectrais foram realizadas através da medição do dossel das culturas com o uso de uma plataforma deslizante (PTF) com 3,65 m de altura e 6 m de comprimento (Figura 3a). Posicionada em uma barra de ferro na porção superior da plataforma, há uma bandeja acoplada, também deslizante, na qual o espectrorradiômetro foi posicionado durante o levantamento dos dados (Figura 3b).

O espectrorradiômetro portátil utilizado nesta etapa foi o FieldSpec® 3 Hi-Res, da Analytical Spectral Devices Inc. Este equipamento detecta a radiação eletromagnética no intervalo espectral de 350 a 2500 nm e possui alta resolução espectral: 3 nm (350 - 1000 nm), 8,5 nm (1000 - 1800 nm) e 6,5 nm (1800 - 2500 nm). Os intervalos de amostragem são de 1,4 nm entre 350 - 1000 nm, e 2 nm no intervalo entre 1000 - 2500 nm, possuindo mais de 2150 canais individuais. Foi utilizada uma lente de 5° de abertura, conferindo um IFOV (*Instantaneous Field Of View* - campo de visada instantânea) de 30 cm de diâmetro.

¹ Os combustíveis utilizados na pesquisa foram adquiridos em um posto da Rede BR, localizado nas imediações do CPQBA - bairro Betel/Paulínia - SP. O diesel utilizado apresenta na sua composição, 2% de biodiesel e 98% de diesel, caracterizado como do tipo B2 (www.petrobras.com.br).

As leituras obtidas com o FieldSpec foram realizadas na porção central de cada parcela visando eliminar a influência das bordas, resultando em uma média de dez leituras por cultura. A calibração do aparelho foi feita a partir de uma placa de referência que reflete 100% da energia incidente conhecida como *Spectralon* e a aquisição das leituras deu-se entre 10 e 14h.

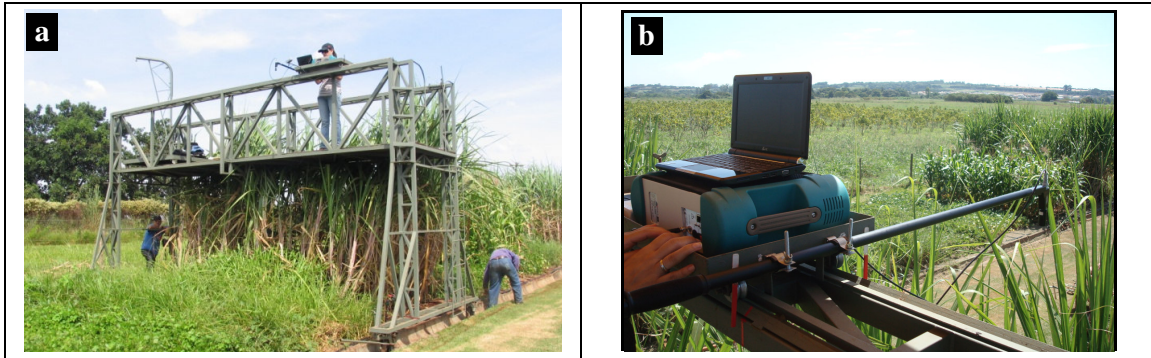


Figura 3: a) Plataforma deslizante e b) Posição do espectrorradiômetro para aquisição das medidas espectrais.

Tabela 1: Datas das leituras a partir da plataforma (M) e volumes de HCs injetados.

	ABRIL							MAIO																
Dia	19	22	26	27	28	29	30	3	4	5	6	7	10	11	12	13	14	17	18	19	20	21	27	29
Volume acumulado de HC (L)			600 (GSL)	600 (DSL)	800 (GSL)	800 (DSL)		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800		
CTR		M2	M3			M6				M10							M16							M20
DSL	M1				M5		M7	M8		M10	M11			M13		M15	M16							M19
GSL			M3	M4		M6		M8	M9			M12			M14				M17	M18				M19

2.4. Imageamento hiperespectral aerotransportado ProSpecTIR-VS

Adicionalmente às leituras *in situ* foi realizado um sobrevôo para imageamento hiperespectral da área experimental, realizado em 14/maio. O sensor hiperespectral ProSpecTIR-VS trabalha com dois sub-sistemas de imageamento: um na região do visível/infravermelho próximo -VNIR (400 a 970 nm) e outro na região do infravermelho de ondas curtas – SWIR – do espectro eletromagnético (970 a 2500 nm), denominados *Eagle* e *Hawk*, respectivamente (www.spectir.com).

Os dados utilizados neste trabalho foram entregues no nível 1A de processamento (i.e. convertido para reflectância), 357 bandas distribuídas entre as regiões do VNIR (122) SWIR (235), 5nm de resolução espectral e resolução espacial de 0,6m.

2.5. Processamento dos dados

Para identificar a partir de qual momento as alterações induzidas pelos HCs na vegetação ocorreram e em quais espécies vegetais foram mais significativas, foi aplicada a razão R694/R760 proposta por Carter (1994). A clorofila apresenta uma fraca absorção em torno de 700 nm e qualquer alteração que comprometa a produção deste pigmento será identificada com o aumento da reflectância neste comprimento de onda para diferentes tipos de estresse e espécies vegetais (Carter e Miller, 1994). Segundo os autores, este pigmento não apresenta absorção significativa em 760 nm e a diminuição da reflectância nesta região está associado à murcha das folhas e colapso parcial do dossel das plantas contaminadas, ou seja, nos estágios mais avançados do estresse. Esta razão foi aplicada em culturas de soja [*Glycine Max* (L.) Merrill] cultivadas em solos contaminados com herbicida, cujos resultados mostraram-se eficazes com apenas quatro dias de exposição ao agente estressante (Carter e Miller, 1994), justificando o emprego desta razão no presente estudo.

3. Resultados e Discussão

Os gráficos apresentados na figura 4 apresentam a curva espectral média das cinco culturas para os três tratamentos, comparando as leituras finais (M19 e M20) com a leitura antes da contaminação (M2). Os resultados da razão R694/R760, aplicada em todas as leituras, foram interligados a partir de linhas de tendência lineares a fim de facilitar a visualização do comportamento destas no decorrer do experimento².

Nestes gráficos foi possível observar que somente a BR apresenta um comportamento padrão entre tratamentos contaminados, sendo o diesel um pouco mais agressivo que a gasolina. Nas demais espécies (CA, MI e SJ) os resultados da razão empregada foram próximos aos encontrados para o CTR, reforçando o fato de a gasolina ser mais agressiva do que o diesel para estas culturas. Os comportamentos de SJ e BR foram iguais ao observado por Quitério (2010) em um experimento que reproduziu, em escala reduzida, os efeitos de pequenos volumes de HCs sobre estas mesmas espécies vegetais. Para o FE os três tratamentos apresentaram resultados semelhantes, não permitindo uma distinção efetiva entre eles. Deve-se levar em consideração o fato da cultura se encontrar em estado avançado de senescência e que, a partir da leitura 14 para o GSL (2200 litros) e 16 para o DSL (2600 litros) e CTR, os espectros coletados na plataforma foram formados predominantemente pela resposta do solo exposto devido à morte da vegetação. Desta forma, os resultados da razão R694/R760, nesta situação, mostraram que em estágios avançados de senescência os efeitos do estresse pelos HCs são mascarados.

O fato das medições não ter ocorrido nos mesmos dias em todos os canteiros, seja pelas variações nas condições climáticas (aumento de nuvens e dias chuvosos) ou pelo tempo despendido em cada canteiro, a definição dos melhores momentos para se observar a variação entre os tratamentos foi feita com o auxílio das linhas de tendência lineares: i) BR: a partir da M9 (1000 litros), ii) CA: o ajuste da linha de tendência linear para esta cultura não forneceu bons resultados. Muitos pontos medidos ficaram distantes dos pontos estimados desfavorecendo o estabelecimento de qualquer padrão no comportamento desta espécie; iii) MI: a linha de tendência para esta cultura permite supor que as alterações no GSL começaram a serem notadas a partir de M5. No entanto, neste período não houve medição espectral nestas plantas e os valores obtidos em M4 e M6 ficaram muito abaixo do estimado. Desta forma, podemos dizer que somente em M7 (800 litros) e somente para o GSL o estresse é sentido e, iv) SJ: da mesma forma que ocorre para o MI, em M7 inicia-se a identificação espectral do estresse induzido pela gasolina.

O imageamento hiperespectral foi realizado após 2.800 litros de combustíveis (M16) terem sido vazados em cada tratamento. Sabendo que as plantas do GSL indicam sinais de estresse com muito menos volume de HC no solo, esta razão também foi aplicada nas imagens ProSpecTIR-VS, onde espera-se, a partir dos resultados acima descritos, que não haja grandes variações entre o CTR e o DSL, com exceção da BR e, entre CTR, GSL e DSL, para o FE.

A figura 5 apresenta três imagens do campo experimental: i) composição colorida R59G82B35 (14/05/10), ii) razão R694/R760, ou seja, b65/b79 (14/05/10) e iii) foto aérea tirada com máquina digital não profissional (24/maio/2010). De forma geral, observa-se o maior estresse para as plantas do GSL. A composição colorida não permitiu uma distinção clara entre CTR e DSL, com exceção da BR. As diferenças entre estes tratamentos para SJ, MI e CA são realçadas pelo emprego da razão R694/R760.

² Somente são apresentados nestes gráficos os resultados das leituras adquiridas no bloco 2 de cada canteiro. As alterações visuais observadas no campo experimental sugerem que o vazamento não ocorreu de forma homogênea nos blocos, sendo mais intensas naqueles situados próximas à bomba de injeção dos combustíveis e nas porções de declive do terreno.

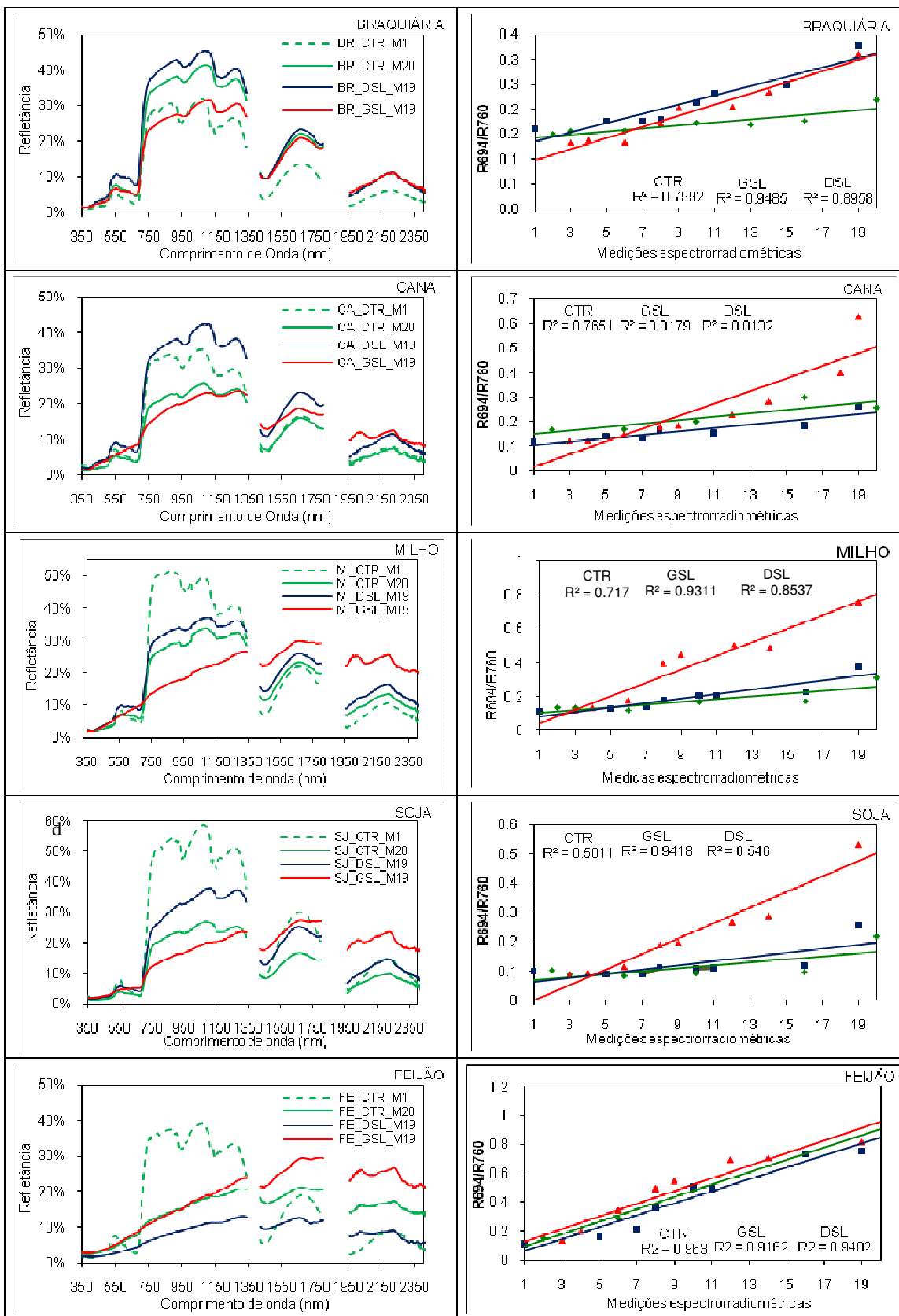


Figura 4: Gráficos à esquerda: Curvas espectrais médias das culturas e Gráficos à direita: resultados da razão R694/R760 ao longo do experimento e linhas de tendência dos dados.

Mesmo que os gráficos da figura 4 apresentem valores muito próximo para estas espécies, a razão permitiu observar pequenas variações nas tonalidades do azul ao roxo, demonstrando que MI e SJ respondem ao estresse dos HCs (o MI, mais do que a SJ) e são espectralmente identificadas. A CA do CTR apresentou os maiores resultados da razão, indicando que o diesel não é um agente estressante para a CA nestas condições experimentais. O estado geral da vegetação um dia após o imageamento pode ser observado na figura 6.

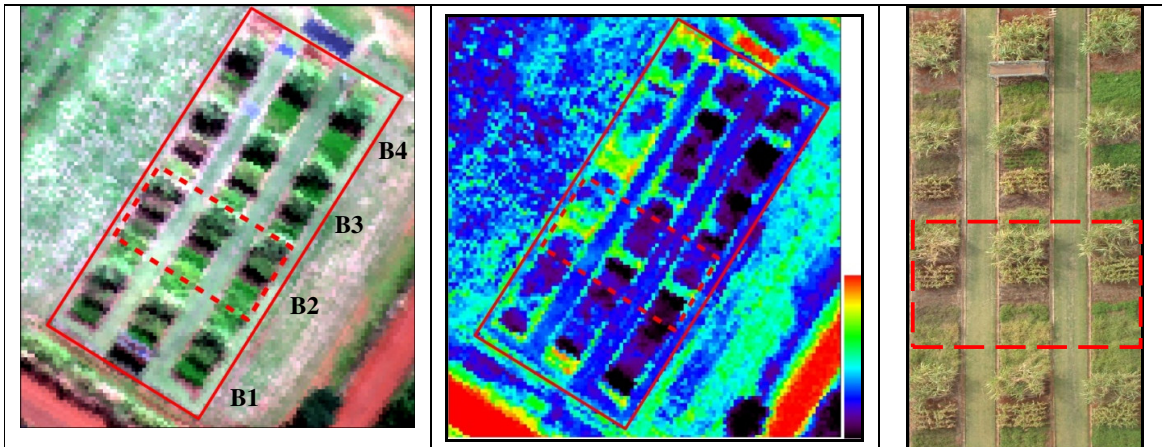


Figura 5: Da esquerda para a direita: Composição R56G36B21 (14/05/10; 0.6m), Índice R694/R760 (0.6m) e Foto aérea tirada em 24/05/10, com destaque para o bloco 2 (B2) – área investigada no presente trabalho.

4. Conclusões

A metodologia proposta neste trabalho apresentou uma grande correlação entre as medidas espectrais de dosséis a partir da plataforma e o sensor ProSpecTIR-VS. Os resultados confirmam a maior toxicidade da gasolina para todas as culturas selecionadas. As espécies que responderam mais rapidamente ao estresse foram MI e SJ, com apenas 800 litros de gasolina no solo. O FE não demonstrou ser uma cultura indicada para este tipo de estudo por ter rápido ciclo vegetativo e por serem os efeitos do estresse mascarados pela morte natural da planta. Em relação ao diesel a CA não apresentou sensibilidade sendo, portanto, uma cultura não indicada para detecção de vazamentos desta natureza. MI e SJ que responderam tão rapidamente à presença da gasolina no solo, não tiveram o mesmo desempenho com o diesel, onde apresentaram respostas muito próximas à do CTR. A BR apresentou um comportamento semelhante para GSL e DSL e indicaram sinais de estresse mais notadamente com 1000 litros de combustível, sendo aqui considerada a melhor espécie para monitoramento de vazamentos independente do tipo de contaminante.

5. Agradecimentos

Ao CENPES/PETROBRAS pelo financiamento do projeto e as equipes da FotoTerra e SpecTIR.

6. Referências Bibliográficas

- Carter, G. A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. **International Journal of Remote Sensing**, 15, p. 697-703, 1994.
- Carter, G. A.; Miller, R. L. Early detection of plant stress by digital imaging within narrow stress-sensitive wavebands. **Remote Sensing of Environment**, v. 50, p. 295-302, 1994.
- Gloria, K. S. Metodologias alternativas para detecção e localização de vazamentos. **Boletim Técnico da Petrobras**, v.45, n. 2, 2002. Disponível em http://www2.petrobras.com.br/tecnologia2/ing/boletim_tecnico/v45_n2_abr-jun-2002/pdf/3.pdf. Acesso em: 01 set. 2010.

Hörig, B., Kuhn, F., Oschütz, F., Lehmann, F. Hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons. **International Journal of Remote Sensing**, 15, p. 1413-1422, 2001.

Labrunie, C. S. 2008. Opiniões. Disponível em: <<http://www.revistaopinioes.com.br/aa/materia.php?id=531>>. Acesso em: 10 nov. 2010.

Noomen, M.F., Skidmore, A.K. and van der Meer, F.D. Detecting the influence of gas seepage on vegetation using hyperspectral remote sensing. In: Proceedings of the 3rd EARSeL workshop on imaging spectroscopy, Herrsching, Germany, 2003. p. 252-255. Disponível em: <http://www.itc.nl/library/Papers_2003/peer_ref_conf/noomen.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2010.

Quiterio, G. C. M. On the applicability of imagin spectrometry for the detection and investigation of contaminated sites with particular consideration given to the detection of fuel hydrocarbon contaminants in soil. 2010. XX p. Tese de doutorado. Universidade de Campinas – Campinas. 2010.

Winkelmann, K. H. On the applicability of imagin spectrometry for the detection and investigation of contaminated sites with particular consideration given to the detection of fuel hydrocarbon contaminants in soil. 2005. 243 p. Tese de doutorado. Universidade de Cottbus – Alemanha. 2005.

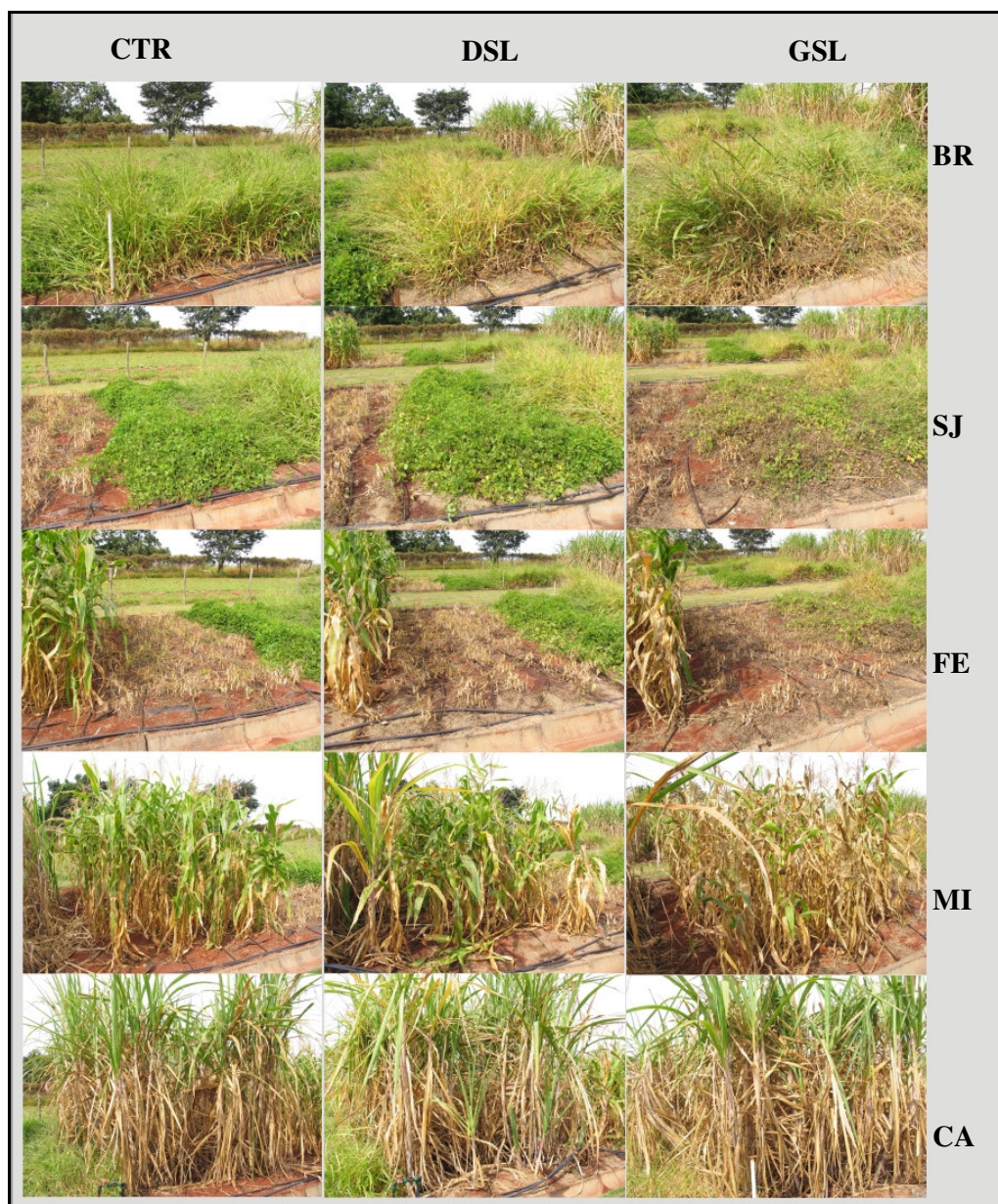


Figura 6: Comparação entre os tratamentos – 17/05/10 com 3000 litros de combustível no solo e 1 dia após o imageamento ProSpecTIR-VS.