

## Caracterização espectral de *Eucalyptus camaldulensis* submetidos a fluxo forçado de hidrocarbonetos líquidos e gasosos

Lucíola Alves Magalhães<sup>1</sup>  
Giuliana Clarice Mercuri Quitério<sup>1</sup>  
Carlos Roberto de Souza Filho<sup>1</sup>  
Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida<sup>2</sup>  
Marcos Nopper Alves<sup>1</sup>  
Wilson José Oliveira<sup>3</sup>  
Lis Maria Leoni Rabaco<sup>3</sup>  
Renato Rocha<sup>3</sup>

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

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

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

**Abstract.** The São Francisco Basin displays numerous hydrocarbon (gas) seepages. One of these occurrences, known as *Remanso do Fogo*, has been the focus of studies that investigated the effects of hydrocarbons in soils and vegetation and their detection from remote sensing data. This paper describes an environment-controlled/semi-controlled (greenhouse) experiment using the same vegetation species found in real conditions in that area – the *Eucalyptus camaldulensis*. Fuels were injected into four sets of lysimeters in order to monitor the evolution of leaf's spectral signatures and to define how much fuel is necessary to promote changes possible to be identify remotely. Two sets of lysimeters, in which no fuel was injected, were used for comparison as controls. Radiometric characteristics of vegetation were measured periodically using two different radiometer: a Spectron SE-590 (400 – 1.100 nm) and a FieldSpec Full Resolution (350 – 2500 nm). The presence of hydrocarbon caused changes on eucalyptus leaves. They showed an overall increase in albedo within visible, near infrared range and short wave infrared wavelengths. The blueshift of the red edge position was observed for the lysimeters with fuel, whereas the control plants remained unchanged. These results support the efficient use of remote sensing not only in prospecting activities, but also as a tool for monitoring small leaks in pipelines.

**Palavras-chave:** remote sensing, hydrocarbon, vegetation, sensoriamento remoto, hidrocarboneto, vegetação.

### 1. Introdução

O estudo do comportamento espectral da vegetação quando submetida à condições de estresse foi objeto de estudo de diversos autores. Tais estudos concorrem em indicar que as principais alterações são observadas na faixa do visível do espectro eletromagnético, com a perda de pigmentos fotossintetizantes (clorofila a, clorofila b e carotenóides); no infravermelho próximo, com modificações na estrutura celular; e no infravermelho de ondas curtas, principalmente pela perda de água resultante do estresse hídrico (e.g. Carter e Miller, 1994). Uma destas condições estressantes é a presença de exsudações de hidrocarbonetos (HCs), que com a ação de soluções ácidas oriundas da oxidação dos HCs, gera uma série de alterações mineralógicas, nas rochas e solos, e na vegetação sobrejacente (Schumacher, 1999). A possibilidade de identificar remotamente áreas favoráveis à exsudações de HCs atraiu a atenção de diversos pesquisadores e da indústria petrolífera. No Brasil, trabalhos de referencia já foram realizados em áreas reconhecidamente portadoras de exsudações (e.g. Almeida Filho

et al. 2002) e obtiveram sucesso na aplicação de técnicas de processamento de imagens para realce de áreas anômalas.

Emanações gasosas de HCs são encontradas na região conhecida como Remanso do Fogo, município de Buritizeiro/MG. Esta área foi objeto de estudo de Oliveira (1998) e Souza Filho et al. (2008) que buscaram, a partir de imagens Landsat/TM, ASTER e dados de gasometria, identificar as áreas de influência destas exsudações através de anomalias geobotânicas em uma área de cultivo de *Eucalyptus camaldulensis* (EC).

Buscando acompanhar o comportamento espectral das folhas do EC quando submetidas a um fluxo forçado de hidrocarbonetos e identificar a partir de que ponto as alterações são espectralmente reconhecíveis, foram elaborados dois experimentos que fizeram uso de gás veicular natural (GNV), gasolina e diesel, injetados em recipientes onde se desenvolveram mudas de EC.

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1. Experimento com hidrocarboneto gasoso (EHG)

O EHG foi realizado por Oliveira (1998) junto ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) - campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), localizado na cidade de Piracicaba (SP).

Para a realização do experimento, utilizou-se um único tipo de solo no qual foram plantadas mudas de EC e reproduzidos três ambientes com características diferentes em relação à presença de HCs: i) ambientes com alto fluxo forçado de gás (GNV+) ( $15 \text{ cm}^3/\text{min}$ , aproximadamente 100 bolhas de gás/min); ii) ambientes com baixo fluxo forçado de gás (GNV-) ( $7,5 \text{ cm}^3/\text{min}$ , aproximadamente 50 bolhas de gás/min) e iii) ambientes sem a presença de gás (Figuras 1 e 2).



**Figura 1:** Disposição das mesas e dos recipientes na casa de vegetação.



**Figura 2:** Sistema de injeção de gás. No chão, à esquerda, uma das válvulas de alívio de pressão e o mecanismo de distribuição de GNV para as duas mesas.

O solo utilizado foi coletado na região do Remanso do Fogo, em uma área afastada das áreas com anomalias geoquímicas de HCs, porém com as mesmas características físicas dos solos das regiões com a presença dos mesmos.

Para cada uma das situações descritas acima foram utilizados 5 recipientes posicionados sobre mesas de ferro dentro de uma estufa (Figura 1). Dentro da estufa, o ambiente foi isolado por intermédio da construção de uma estrutura de madeira e plástico, de forma a impedir o escape de gases. Foi instalado também um sistema de exaustão para ajudar na eliminação dos gases presentes no ambiente. Para o transporte do gás, dos cilindros até os vasos, foi montado um sistema de injeção formado por tubos, mangueiras de PVC, pequenos registros de gás e válvulas para alívio de pressão (Figura 2). Estas válvulas reduziram a pressão inicial de  $220 \text{ Kgf/cm}^2$  para uma pressão final de  $1,5 \text{ Kgf/cm}^2$  (valores aproximados).

As sementes foram plantadas em local separado, sendo repicadas nos recipientes após 30 dias de desenvolvimento. Quatro meses após a semeadura, quando a vegetação atingiu o tamanho ideal para a realização das medidas radiométricas, iniciou-se a injeção do gás e coleta dos dados espectrais da vegetação. A injeção do gás ocorreu de forma contínua durante 59 dias.

## 2.2. Experimento com hidrocarbonetos líquidos (EHL)

O experimento foi instalado em condições semi-controladas em um viveiro telado com cobertura plástica localizado no campo experimental do Centro Pluridisciplinar de Pesquisas Químicas, Biológicas e Agrícolas (CPQBA) da UNICAMP, Paulínia – SP.

Nesta ocasião, mudas de EC (cultivadas no viveiro da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga – ESALQ por aproximadamente 04 meses) foram plantadas em lisímetros de vidro de dimensões 30cmx40cmx15cm, revestidos com Contact® preto a fim de não prejudicar o desenvolvimento radicular da planta. Somente um dos lados do lisímetro não foi revestido com Contact® e sim, recoberto por um retângulo de etileno-acetato de vinila (E.V.A), removível, a fim de permitir a visualização do crescimento radicular e da percolação dos HCs no solo. Para que as raízes crescessem em direção ao vidro, os lisímetros foram fixados sobre bases de madeira com 15° de inclinação e presos às grades da bancada com elásticos de bagageiro de moto (Figura 3), conforme delineamento experimental apresentado em Quitério et al. (2007). Os solos utilizados no EHL são caracterizados como um latossolo vermelho eutroférico, coletado no próprio campo experimental do CPQBA.

Os HCs líquidos (gasolina e diesel<sup>1</sup>) foram injetados nos solos dos lisímetros com o auxílio de uma bomba injetora, própria para combustíveis e com capacidade de 50 mL, e a percolação dos combustíveis deu-se a partir de mangueiras de silicone. Estas mangueiras foram instaladas atravessando os lisímetros de uma lateral à outra e com 20 furos ao longo da sua extensão permitindo assim, o escape dos HCs empregados (Quitério et al. 2007). Foram utilizados 15 lisímetros separados em três tratamentos: i) plantas que receberam gasolina (GSL), ii) plantas que receberam diesel (DSL) e iii) plantas que não receberam HCs (CTR). A irrigação das mudas foi feita a partir de um sistema automático do tipo espaguete, onde cada lisímetro recebeu 300 mL de água diariamente através de três canálculos conectados à uma mangueira de maior vazão posicionada em toda a extensão das bancadas (Figura 4).



**Figura 3:** Disposição dos lisímetros do tratamento CTR, com inclinação de 15° e presos às grades com o auxílio de elásticos de bagageiro de moto.



**Figura 4:** Sistema de irrigação espaguete, instalado com três canálculos por lisímetro. Vazão diária total de 300 mL para cada um.

A irrigação foi cessada 24 horas antes e retomada 24 horas depois da injeção dos HCs, possibilitando uma maior absorção do combustível pela planta, menor diluição dos HCs e

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

evitando perda da solução HC + H<sub>2</sub>O pelo orifício de percolação posicionado na porção basal dos lisímetros. O início da contaminação ocorreu 23 dias após a repicagem das mudas nos recipientes e foi repetida quinzenalmente. Foram realizadas 4 injeções de 50 mL e uma única de 300 mL, ao final do experimento, totalizando 500 mL de combustível em cada lisímetro, o que representa aproximadamente 18.2% da capacidade de campo de cada recipiente.

### 2.3. Aquisição das medidas espectrais

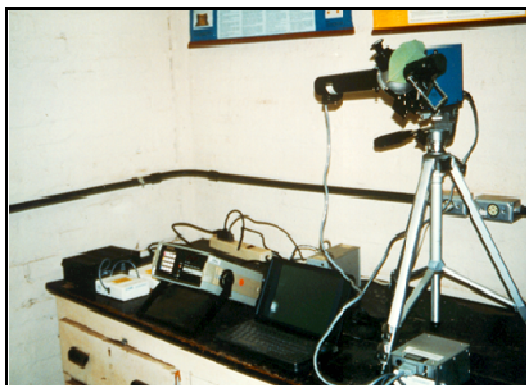
Para a realização deste experimento foram utilizados dois espectrorradiômetros distintos: i) **EHG**: SPECTRON SE-590, que opera na faixa de 360 a 1100 nm, cedido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ii) **EHL**: FieldSpec® Full Resolution, da Analytical Spectral Devices, que opera na faixa de 350 a 2500 nm, de propriedade do Laboratório de Espectroscopia (LER) do Instituto de Geociências da Unicamp.

Objetivando avaliar a evolução espectral dos efeitos causados pela presença dos HCs na vegetação, as leituras espectrais ocorreram conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Leituras espectrais (M) realizadas na vegetação e quantidade de dias passados do início da injeção de combustíveis. \* A leitura espectral M1, para o EHL, foi realizada antes do início da injeção dos combustíveis.

Leitura	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Ensaio	Dias após início da contaminação								
EHG	1	11	23	45	58	-	-	-	-
EHL	*	6	13	20	27	34	41	48	55

As leituras foram realizadas em três folhas de cada recipiente: uma na porção basal, uma na sua porção intermediária e uma terceira, no topo da planta. No caso do EHG, as folhas foram retiradas das plantas e levadas imediatamente para uma sala ao lado da casa de vegetação para a realização das leituras (Figura 5). Para o EHL, os espectros foram mensurados *in situ* com o auxílio do *leaf clip*. Esse acessório propicia uma medida comparável aquela feita em uma esfera integradora e que tem como característica principal a coleta de informações sem interferência da atmosfera, com iluminação ortogonal e sempre na mesma intensidade para todas as amostras (Figura 6).



**Figura 5:** SPECTRON SE-590 (caixa azul) e a esfera integradora utilizados na obtenção das medidas radiométricas das folhas dos EC – EHG.



**Figura 6:** Acessório *Leaf Clip* utilizado para obtenção das medidas radiométricas das folhas do EC *in situ* – EHL.

### 3. Resultados e Discussão

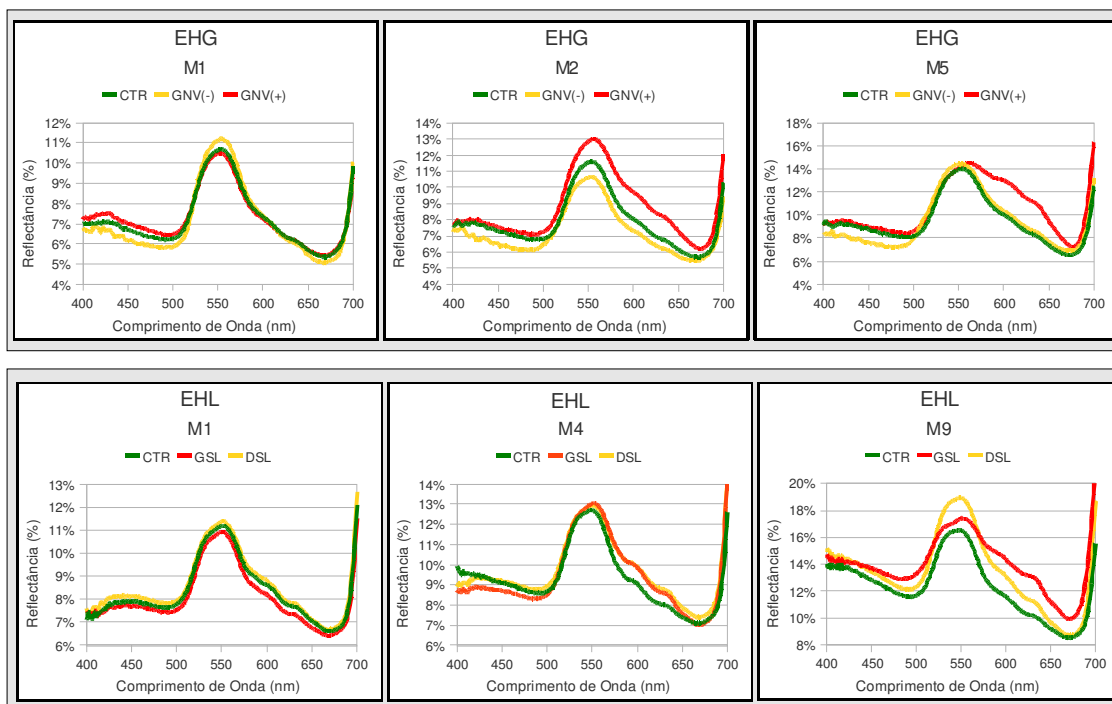
#### 3.1. Visível (VIS: 400 – 700 nm)

Os gráficos apresentados na figura 7 correspondem às curvas espectrais médias das leituras feitas sobre as folhas de EC (base, meio e topo) para os dois experimentos no intervalo do VIS.

Observando-se estas curvas, pode-se notar que na M1, um dia após o início da injeção dos gases nos recipientes (EHG) não ocorreu nenhuma diferença no comportamento espectral das folhas de EC. A leitura M1, para o EHL, apresenta o comportamento espectral inicial das plantas, ou seja, sem contaminação por HCs.

Onze dias após o início da injeção dos gases (M2) e vinte e sete dias após a injeção dos combustíveis líquidos (M4, com 100 mL de HC injetado) constatou-se um pequeno aumento nos níveis de reflectância das folhas na porção correspondente às cores verde e vermelho do espectro eletromagnético (faixa entre 530 nm a 680 nm), indicando o início da perda de clorofilas. Os resultados da terceira etapa do EHG (M3) apresentaram um incremento na diferença dos níveis de reflectância para as folhas dos vasos com GNV+.

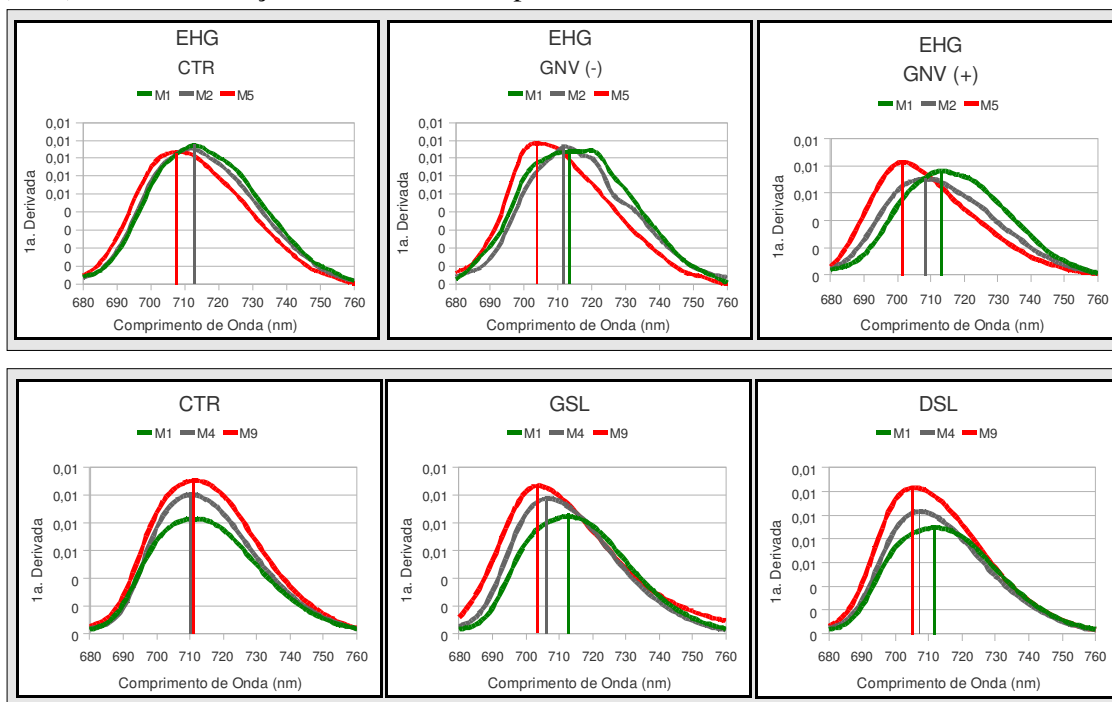
Na medida em que se aumentou o período de exposição aos gases (M5) constatou-se a maior degradação das clorofilas. Este mesmo comportamento foi observado no EHL. Nesta situação, além da perda de clorofilas, registrou-se a degradação dos carotenóides marcada pelo aumento da reflectância entre 450-520 nm. Esta perda iniciou-se na M4 para o DSL, enquanto que para o GSL a degradação se deu de forma quase que imperceptível na M6 (150 mL de HC injetado). Maiores diferenças foram registradas somente na M9 (500 mL de HC injetado) onde o GSL passou a apresentar as maiores porcentagens de reflectância neste intervalo. Esta evolução na perda de pigmentos indica que, em pequenas quantidades, o diesel provoca alterações espectrais mais rapidamente do que a gasolina. No entanto, quando foram injetados 300 mL de HCs de uma só vez no solo, o GSL forneceu resultados mais díspares, indicando que em maiores concentrações, torna-se mais tóxico para as plantas.



**Figura 7:** Comportamento espectral das folhas de EC em três períodos distintos da contaminação. A degradação ocorre inicialmente com perda de clorofilas, com o aumento da reflectância entre 550 e 680 nm, seguida da degradação de carotenóides, com aumento da reflectância em 480 nm.

### 3.2. Red Edge Position (REP)

O aumento da reflectância na região do REP, entre 680 e 700nm, pode ser natural, de acordo com a senescência das plantas, como também induzida por processos de estresse. Carter e Miller (1994) mencionam que o intervalo entre 690 e 700nm é particularmente sensível à diminuição precoce do conteúdo de clorofila induzida por estresse e representa o *blue-shift* da curva de reflectância do *red edge* que frequentemente acompanha o estresse. Tal fato pode ser observado na figura 8, que apresenta a primeira derivada dos espectros medidos. As plantas do CTR apresentaram uma pequena variação (4 nm) do REP no EHG, enquanto as plantas do EHL não sofreram variações significativas. Já as plantas sob efeito de HCs tiveram uma maior variação do REP, sendo 10 nm (GNV-), 12 nm (GNV+), 9 nm (GSL) e 7 nm (DSL), todos em direção aos menores comprimentos de onda.



**Figura 8:** Primeira derivada dos espectros das folhas de EC em três períodos distintos da contaminação, buscando observar o *blue shift* do REP para plantas submetidas à contaminação (detalhe na região onde a primeira derivada da curva de reflectância é máxima entre o vermelho e o NIR).

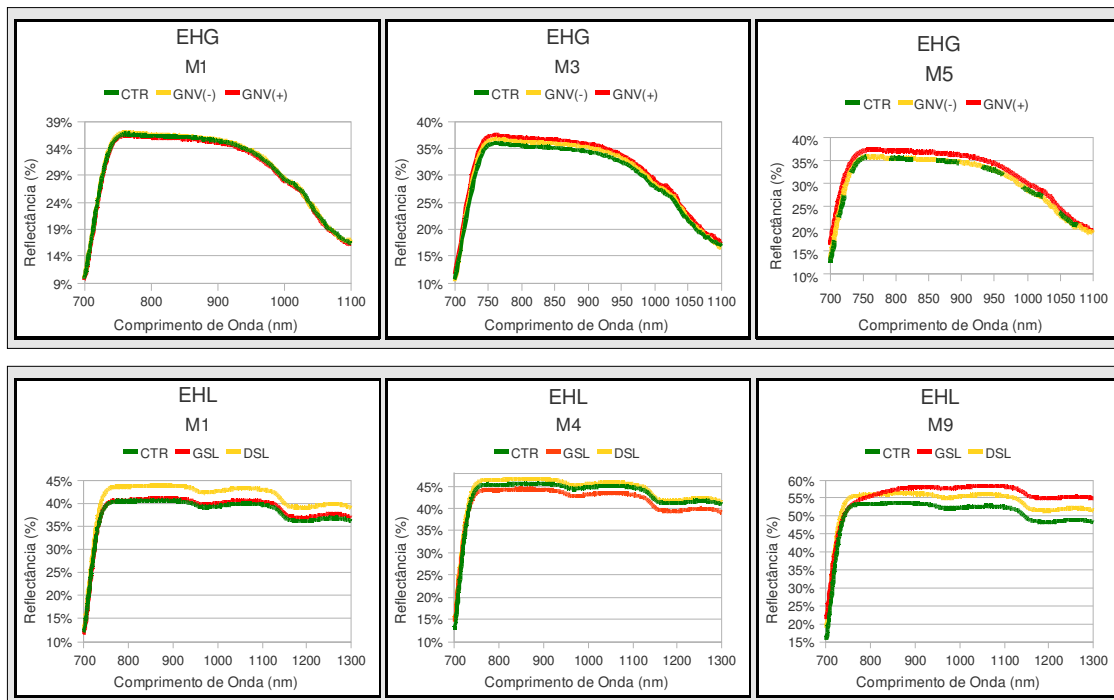
### 3.3. Infravermelho Próximo (NIR: 700 - 1300nm)

A região do NIR está intimamente relacionada à estrutura celular das folhas. Uma vegetação sadia reflete a maior parte da energia incidente. Mudanças espectrais neste intervalo, podem refletir estado de senescência e/ou estresse das plantas (Jensen, 2009).

As plantas de ambos experimentos apresentaram um aumento da reflectância com o aumento da contaminação. Para o EHG, este comportamento pode ser observado a partir da M3, enquanto que para o EHL, as mudanças mais significativas ocorrem somente para o GSL na M9, especialmente em 970 e 1175nm, regiões influenciadas pelas bandas de absorção da água. Este ressecamento é resultado do estresse hídrico que a planta contaminada passa a sofrer devido à diminuição da aeração do solo causada pelo aumento da disponibilidade de CO<sub>2</sub> oriundo da oxidação dos HCs e conseqüente diminuição de O<sub>2</sub>. Para o DSL, desde o início do experimento a região do NIR apresentou maior reflectância do que o CTR. O GNV (-), apesar de ter um aumento de reflectância em M3, voltou a se igualar ao CTR na M5.

Os resultados neste intervalo do espectro eletromagnético são mais sutis do que aqueles registrados no VIS e no REP, possibilitando concluir que o tempo de exposição aos HCs não

foi suficiente para provocar mudanças estruturais na planta, somente perda de pigmentos e de água.

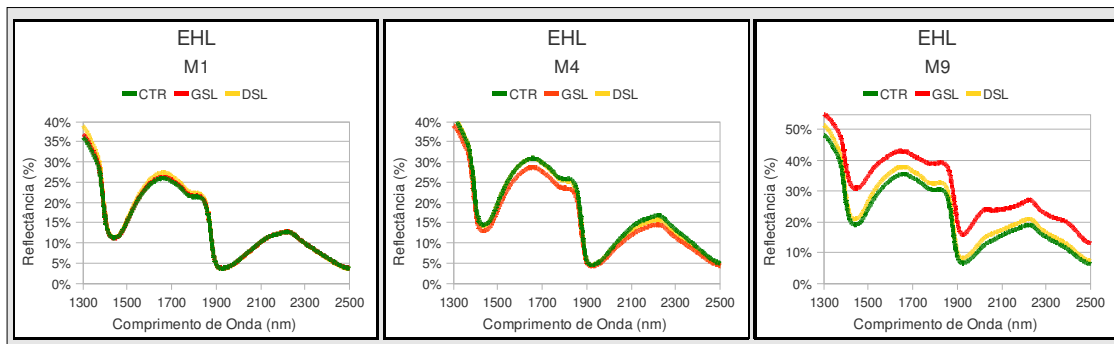


**Figura 9:** Comportamento espectral das folhas de EC em três períodos distintos da contaminação buscando observar mudanças na estrutura interna das folhas devido à presença dos HCs. O aumento da reflectância é influenciado pela perda d'água em de 970 e 1175 nm.

### 3.4. Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR: 1300 – 2500 nm)

O intervalo aqui descrito é intensamente influenciado pelas bandas de absorção da água. Esta característica acaba por mascarar feições específicas relacionadas à compostos bioquímicos presentes nas folhas, como celulose, amido, açúcar e lignina, que apresentam fracas feições de absorção neste intervalo de amostragem (Baret, 1999).

Para o EHL, pode-se observar que o aumento da contaminação levou a um aumento da reflectância na M9, condicionado pela diminuição no conteúdo de água das folhas (1435 e 1920 nm) (Figura 10). Esta diferença na reflectância é mais significativa para o GSL, indicando maior perda de água pelas plantas submetidas a este tratamento. Esta perda de água no GSL favorece o realce de duas feições de absorção em 2.062 e 2.300, possivelmente associadas às feições de absorção de proteína e nitrogênio (Curran et al. 1989).



**Figura 10:** Comportamento espectral das folhas de EC em três períodos distintos da contaminação. O aumento da reflectância é influenciado pela perda d'água em 1435 e 1920 nm. Algumas feições de absorção em aproximadamente 2.062 e 2.300 começam a aparecer devido a perda de água.

#### 4. Conclusões

A primeira alteração observada ocorre com o aumento da reflectância nas bandas de absorção da clorofila, indicando perda deste pigmento com o avanço do estresse. A perda de carotenóides é notada juntamente com a perda de clorofilas para plantas contaminadas com diesel e mais tardiamente para plantas contaminadas com gasolina, no entanto de forma mais intensa. Para o GNV não são notadas alterações significativas entre 450 – 520nm, região influenciada por este pigmento. O *blueshift* do *red edge* ocorreu de forma mais intensa para o GNV e, entre os HCs líquidos, para o GSL. As plantas do CTR variaram minimamente ao longo do experimento. No SWIR o efeito da presença do HCs foi observado mais intensamente nas plantas do GSL com o aumento da reflectância em 1.435 e 1.920 nm, bandas dominadas pela presença da água. Este ressecamento realçou duas feições de absorção, antes mascaradas, centradas em aproximadamente 2,06 e 2,3 nm e possivelmente relacionadas à proteína e nitrogênio. Na faixa do infravermelho próximo as alterações foram mínimas em relação àquelas registradas nos demais comprimentos de onda.

Os resultados deste estudo indicam que mesmo em pequenas quantidades já é possível observar o efeito do estresse na vegetação induzido por HCs, confirmando o potencial desta ferramenta para a detecção precoce de pequenos vazamentos em dutos, o que é extensível a vegetação submetida a exsudações naturais de HCs.

#### 5. Referências Bibliográficas

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**, v. 20, p. 2683-2688, 2002.

Baret, F. Espectros de pigmentos e compostos bioquímicos foliares: planilhas com dados de reflectância. Informação escrita enviada por Frédéric Baret, INRA Avignon, França, 1999.

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.

Curran, P. J. Remote Sensing of Foliar Chemistry. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, p. 271-278, 1989.

Jensen, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.

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. 1998. 239 p. Tese (Doutorado em Ciências, Área de Metalogênese) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1998.

Quitério, G. M., Almeida, T. I. R., Souza Filho, C. R. Mudanças fisiológicas e espectrais induzidas por hidrocarbonetos em *Brachiaria brizantha* e *Dolichos lab lab* – uma avaliação sobre o uso da cobertura vegetal como bioindicador de escape de hidrocarbonetos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos : INPE, 2007. Artigos, p. 4389-4391. CD-ROM, Online. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://martedpi.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.18.03>>. Acesso em: 22.set.2009.

Schumacher, D. Surface geochemical exploration for petroleum. In: Beaumont, E. A. and Forster, N. F. (eds.). Exploring for Oil and Gas Traps: Treatise of Petroleum Geology, Handbook of Petroleum Geology. AAPG, 1999. cap. 18, p.1-27. Disponível em <[http://www.gmtsudamerica.com.ar/gmts/publicaciones/schumacher\\_chapter18.pdf](http://www.gmtsudamerica.com.ar/gmts/publicaciones/schumacher_chapter18.pdf)>. Acesso em: 09.out.2010.

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.