

Detecção de estresse por hidrocarbonetos em culturas agrícolas a partir de índices de vegetação de banda estreita

Salete Gürtler¹
Carlos Roberto de Souza Filho¹
Ieda Del'Arco Sanches²
Marcos Alves Nopper³

¹Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
Caixa Postal 6152 – 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
{saletegurtler, beto}@ige.unicamp.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
ieda@dsr.inpe.br

³CPQBA – UNICAMP
Caixa Postal 6171 - 13081-970 - Campinas – SP
mnopper@cpqba.unicamp.br

Abstract. The present study investigated the use of vegetation narrow band indices calculated from hyperspectral remote sensing as potential indicators of changes in the vegetation seeded in soils contaminated with diesel and gasoline. As an output from the study, the vegetation pattern may serve as an indirect approach to identify leakages in oil pipelines. The experiment was built on an area of 2000 sq meters with distributed hoses on the parcels where a controlled amount of diesel and gasoline was applied in the soil. The crops (*Brachiaria brizantha* and *Zea mays*) were seeded after the contamination and since the early growth of the plants on a weekly basis the spectral measurements of leaves were taken for about six months long. Twenty (20) reflectance indices selected from previous studies were used to detect effects of contaminant in the plants. The index that most differentiated health plants from plants contaminated with diesel and gasoline was the ratio between the first derivative in 725 nm and 702 nm (R'_{725}/R'_{702}). Two (2) other indices also presented satisfactory results: the ratio between the bands 755-716 nm and the difference normalized ratio of the same bands. Differences were not observed between leaf spectra of healthy maize and leaf spectra of maize contaminated with diesel.

Palavras-chave: reflectance spectroscopy, hydrocarbon contamination, narrow-band index, espectroscopia de reflectância, contaminação por hidrocarboneto, índice de banda estreita.

1. Introdução

Amplamente utilizados no mundo, os dutos de hidrocarbonetos (HCs) precisam de monitoramento constante para garantir a segurança durante o transporte. Esses dutos percorrem extensas áreas de relevo variado e estão sujeitos às intempéries, variações térmicas, movimentações do solo e ação de pessoas, que podem causar fissuras ou rompimentos na tubulação, colocando em risco a saúde humana e o meio ambiente. Portanto, alternativas aos métodos tradicionais de monitoramento, que permitam identificar precocemente vazamentos pontuais e de pequenas proporções, com precisão espacial e menor custo é de fundamental importância.

Uma maneira indireta de encontrar vazamentos nos dutos é identificar a contaminação por HCs no solo a partir de alterações no padrão da cobertura vegetal. A presença de HCs no solo pode causar uma série de efeitos fisiológicos nas plantas, tais a redução do crescimento das plantas e clorose nas folhas (Smith et al. 2004) e essas características podem influenciar na radiação refletida, transmitida e absorvida pelas folhas e pelo dossel. De maneira geral, a resposta espectral da planta submetida a esse tipo de estresse é caracterizada por um aumento na reflectância na região do visível e uma diminuição da reflectância no infravermelho próximo (Li et al., 2005). Além disso, a diminuição da concentração de clorofila causa o

deslocamento do *red edge position* (REP) para comprimentos de ondas mais curtos (Horler, et al. 1983, Dawson e Curran 1998, van der Meijde et al. 1999). *Red edge position* é definido como comprimento de onda em que ocorre o ponto de inflexão entre a região do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (Gitelson et al, 1996).

Os índices de vegetação de banda estreita são capazes de estimar conteúdos bioquímicos das plantas a partir de dados de sensoriamento remoto hiperespectral. São aplicados em regiões específicas do espectro eletromagnético e capazes de minimizar os efeitos do solo (*background*) (Haboudane et al 2002).

Em experimento com feijão e nível baixo de contaminação com diesel, o REP não foi diferente entre os tratamentos até serem visíveis nas folhas (Emengini et al. 2013b). Nesse caso, índices de reflectância de razão de bandas espectrais (R_{673}/R_{545} , R_{673}/R_{631} , R_{545}/R_{445} , $[R_{755}-R_{716}]/[R_{755}+R_{716}]$; onde R é a reflectância em uma banda específica) mostraram maior sensibilidade. Smith et al. (2004) já tinham obtido bons resultados para detectar estresse causado por gás em cultura utilizando índice na região do red edge. Neste caso foi utilizada a razão entre a primeira derivada da reflectância (R') em 725 e em 702 nm. Sanches et al. (2013b) investigaram as alterações nos espectros de reflectância de três espécies vegetais em fase adulta (braquiária, soja perene e milho), provocadas por vazamentos de diesel e gasolina repetitivos no solo. Os resultados mostraram alterações na REP nas plantas contaminadas com diesel e principalmente com gasolina, cujo impacto foi maior. Além disso, o índice R'_{725}/R'_{702} foi significativamente diferente entre os tratamentos (exceto para o milho) quando pelo menos metade do volume total de contaminante tinha sido aplicado.

O objetivo deste trabalho foi verificar a aplicabilidade de índices de vegetação de banda estreita para diferenciar plantas saudáveis de plantas que germinaram em solo contaminado com gasolina e diesel.

2. Metodologia de Trabalho

O experimento foi instalado no campo experimental do Centro Pluridisciplinar de Pesquisas Químicas, Biológicas e Agrícolas (CPQBA) da UNICAMP, localizado em Paulínia (SP), entre abril de 2013 e novembro do mesmo ano.

Em uma área de aproximadamente 2000 m² foram delimitados 3 canteiros com dimensões de 5 metros por 18 metros de comprimento, sendo 1 para cada tratamento: CTR (controle), DSL (canteiro destinado à contaminação de diesel) e GSL (canteiro destinado à contaminação de gasolina). Cada canteiro foi dividido em três partes iguais denominadas de blocos A, B e C, referentes às três repetições. Cada bloco foi subdividido em parcelas com 6 metros cada, destinadas ao plantio de cada cultura (Figura 1). As espécies vegetais utilizadas foram a braquiária (*Brachiaria brizantha* [Hochst] Stapf) por ser uma cultura comumente encontrada ao longo das linhas de dutos de petróleo e derivados e o milho (*Zea mays* L.) por ser um espécie plantada em todo o território brasileiro.

A preparação dos canteiros consistiu na contenção dos contaminantes no solo por meio da instalação de uma manta de polietileno de alta densidade em uma profundidade de um metro em toda extensão, de acordo com as exigências dos órgãos ambientais brasileiros. Sobre a manta foi colocado o solo previamente misturado. Foram instaladas ainda mangueiras para o vazamento uniforme dos HCs nos canteiros referentes aos tratamentos DSL e GSL e da água no canteiro CTR. Para garantir que a contaminação atingisse as plantas as mangueiras foram instaladas em posição coincidente às linhas de plantio das culturas.

Os volumes de contaminantes foram determinados de acordo com ensaio de germinação feito anteriormente em lisímetros e com base no experimento de Sanches et al. (Sanches et al. 2013a, Sanches et al. 2013b), que mostraram inclusive que, considerando os mesmos volumes, a gasolina teve um maior impacto sobre o desenvolvimento das plantas. Assim, para

evitar um efeito exagerado que impedisse a germinação das plantas, foi aplicado volume inferior de gasolina, 1125 Litros (que equivale a uma concentração de 6.25 L/m³ de solo) contra 1500 Litros de diesel (que equivale a uma concentração de 8.33 L/m³ de solo). Além disso, o ensaio de germinação mostrou que o efeito prejudicial nas plantas podia ser melhor observado com o diesel aplicado com uma semana de antecipação do plantio e a gasolina algumas horas antes do plantio, o que também foi adotado neste estudo. O plantio foi feito com o mínimo de movimentação do solo.



Figura 1. Fotos do experimento: (A) Vista aérea mostrando os canteiros de braquiária e de milho nas três repetições para o tratamento GSL (solo contaminado com gasolina), DSL (solo contaminado com diesel) e CTR (solo não contaminado); (B) Vista lateral de uma parcela de braquiária com as mangueiras usadas para drenar os hidrocarbonetos no solo.

As medições foliares foram tomadas com o espectrorradiômetro portátil ASD FieldSpec® 4 Hi-Res (Analytical Spectral Devices Inc.), ao qual foi acoplado uma sonda de contato denominada *plant probe* e um *leaf clip*. Esse espectrorradiômetro possui três sensores que cobrem a faixa espectral entre 350-2500 nm, com 2151 canais, com resolução espectral de 3 nm @ 700 nm e de 10 nm @ 1400/2100 nm. O intervalo de amostragem é de 1.4 nm @ 350-1050 nm e 2 nm @ 1000-2500 nm. Para a obtenção das medidas de reflectância foi utilizada como referência uma placa de Spectralon® (Labsphere).

As medições iniciaram quando as folhas atingiram largura suficiente para serem medidas pelo equipamento de contato, aproximadamente 1cm. No caso do milho, as medições começaram após 35 dias do plantio e acabaram após 160 dias (13 medições, de M2 a M14) e da braquiária começaram após 63 dias e terminaram após 183 dias (11 medições, de M3 a M13). Para as duas culturas as medições foram feitas preferencialmente com intervalos de uma semana. Em cada data foram feitas trinta medidas da face adaxial da folha por tratamento (10 medidas por repetição), sendo que cada medida de folha corresponde à média de 25 leituras. Com isso, em cada medição foram obtidos 30 espectros, considerando os três repetições, por cultura e por tratamento.

Considerando que os contaminantes prejudicaram as duas culturas estudadas visto a partir de efeitos visuais (folhas menores e amareladas, plantas mais baixas) e das análises bioquímicas (teores de clorofila a e b inferiores aos encontrados no tratamento CTR) foram aplicados os diversos índices para detecção de pigmentos e de estresse em plantas. A Tabela 1 mostra os índices de reflectância propostos em estudos anteriores e que foram aplicados nesta pesquisa.

Com o objetivo de obter curvas representativas de cada tratamento trabalhou-se com as curvas espectrais médias de cada cultura por canteiro. Assim, em cada medição foi obtido um

espectro médio por cultura, por tratamento. Especificamente para a braquiária houve a desconsideração dos dados do tratamento DSL devido ao fato da germinação das sementes nessas parcelas ter sido nula ou inexpressiva.

A avaliação dos índices foi feita com base na quantidade de medições cujo índice permitiu distinguir os espectros médios das folhas de plantas CTR das plantas contaminadas (teste t-student, $p \leq 0.05$). Assim, os melhores índices, considerando as espécies estudadas e o nível de contaminação, foram os que diferenciaram as plantas no maior número de medições.

Tabela 1. Índices fisiológicos propostos em outros estudos.

Índice	Fórmula	Referência
Red Edge Position (REP)	Pico nos dados de primeira derivada na borda vermelha (entre 660 e 780)	Horler et al. (1983)
Índice de Lichtenthaler (LIC)	$R440/R740$	Lichtenthaler (1996)
Plant senescencing reflectance Index (PSRI)	$(R678-R500)/R750$	Merzlyak et al. (1999)
Structure-independent pigment index (SIPI)	$(R800-R445)/(R800+R680)$	Peñuelas et al. (1995)
Clorofila a	$R675/R700$	Chappelle e Kim (1992)
Clorofila b	$R675/(R650 * R700)$	
Carotenoides	$R760/R500$	
Clorofila no red edge	$R750/R710$	Zarco-Tejada et al. (2001); Zarco-Tejada et al. (2004);
Razão da primeira derivada (R') nas feições do red edge	$R'725/R'702$	Smith et al. (2004)
Concentração de carotenoides	$R515/R570$	Hernandez-Clemente et al. (2012)
$(R755-R716)/(R755+R716)$	$(R755-R716)/(R755+R716)$	Emengini et al (2013a)
R755/R716	R755/R716	
R740/R530	R740/R530	
R760/R695	R760/R695	
R673/R545	R673/R545	Emengini et al (2013b)
R673/R631	R673/R631	
R545/R445	R545/R445	
R826/R545	R826/R545	
R977/R545	R977/R545	
R631/R445	R631/R445	

3. Resultados e Discussão

Os efeitos dos HCs na germinação e no desenvolvimento do milho e da braquiária foram visivelmente perceptíveis. Houve redução da germinação de sementes das duas culturas. Em relação ao desenvolvimento foi observada significativa redução na altura das plantas e diminuição da área foliar dos tratamentos DSL e GSL quando comparado com o CTR e, especificamente em relação ao DSL, coloração das folhas em tonalidade de verde mais claro, indicando uma deficiência na quantidade de clorofila. Quando as últimas coletas de dados espectrais foram realizadas (após 200 dias do plantio) as touceiras da braquiária do tratamento GSL apresentavam alturas semelhantes sendo impossível determinar diferenças visuais entre as plantas de solo contaminado e de solo sadio. A Figura 2 mostra alguns exemplares de braquiária (BR) e de milho (MI) germinados em solos com e sem contaminantes.

Os índices de vegetação apresentaram diferentes resultados entre os tratamentos (Tabela 2). Para o BR-GSL, os melhores índices foram os $R'725/R'702$, $(R755-R716)/(R755+R716)$, $R755/R716$ e REP, sendo que o primeiro índice permitiu diferenciar as plantas saudáveis das contaminadas com gasolina em todas as medições.

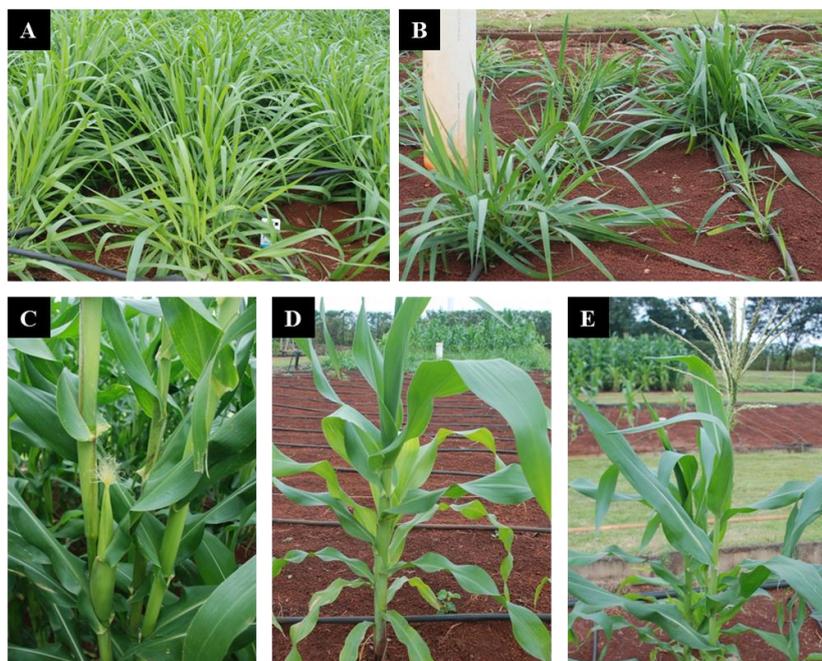


Figura 2. Fotos do experimento com braquiária (A) em solo sem contaminação (BR-CTR) e (B) contaminado com gasolina (BR-GSL); e com milho (C) em solo sadio (MI-CTR) e em solo contaminado (D) com diesel (MI-DSL) e (E) com gasolina (MI-GSL).

Tabela 2: Percentual de medições em que o índice diferenciou os tratamentos com e sem o contaminante. Os valores destacados em cinza correspondem aos valores mais elevados, entre 100 e 77% (teste t-student, $p \leq 0.05$).

Índice	BR-GSL %	MI-GSL %	MI-DSL %
R'725/R'702	100%	23%	77%
(R755-R716)/(R755+R716)	91%	31%	77%
R755/R716	91%	31%	77%
REP	82%	15%	23%
R750/R710	64%	31%	77%
R740/R530	45%	54%	69%
R826/R545	45%	38%	69%
R977/R545	45%	46%	69%
R760/R695	36%	46%	38%
R673/R631	27%	31%	77%
R545/R445	27%	31%	54%
R631/R445	27%	23%	62%
(R678-R500)/R750	27%	15%	46%
R675/R700	27%	31%	69%
R675/(R650*R700)	27%	38%	69%
R673/R545	18%	31%	69%
R440/R740	18%	31%	15%
(R800-R445)/(R800+R680)	18%	46%	8%
R760/R500	18%	46%	15%
R515/R570	18%	38%	62%

Para o milho contaminado com gasolina, nenhum dos índices apresentou resultado satisfatório. Neste caso, o melhor índice permitiu diferenciar os tratamentos em apenas 56% das medições (7 medições).

Já os índices que tiveram o melhor desempenho (77% das medições) para o MI-DSL foram o R'725/R'702, (R755-R716)/(R755+R716), R755/R716, R750/R710 e R673/R631. Vale destacar que alguns índices foram bons para uma cultura e contaminante e para outra

cultura forneceu resultados insatisfatórios. É o caso do índice REP que permitiu identificar diferenças entre a braquiária contaminada da sadia em 82% das medições e para o milho o mesmo índice identificou diferenças em apenas 23% das medições. O mesmo ocorreu com o índice R673/R631 que permitiu diferenciar 77% das medições do milho e apenas 27% das medições da braquiária.

Emengini et al. (2013ab) também encontrou diferenças nos índices para detectar estresse induzido por diesel entre milho e feijão e atribuiu o observado às diferenças estruturais das folhas. Sanches et al. (2013a) cujo experimento aplicou doses repetitivas de diesel e gasolina ao longo do tempo, não obteve bons resultados com os índices REP e R'725/R'702 aplicados nos dados foliares de milho. No entanto, para outras culturas (braquiária e soja perene) esses índices conseguiram distinguir as plantas controle das plantas em solo contaminado com volumes acumulados de diesel e gasolina.

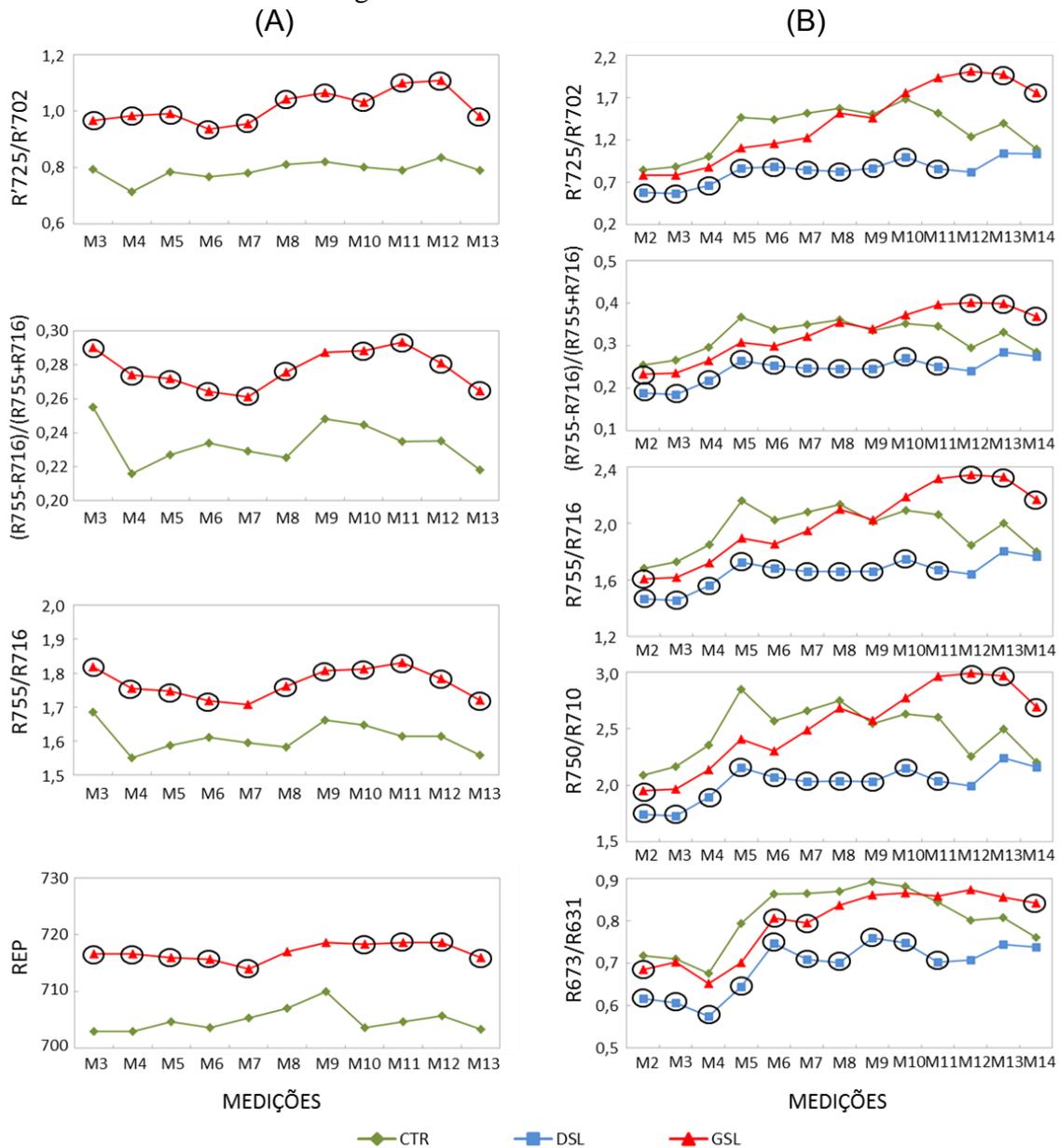


Figura 3. Índices de vegetação com percentual de diferenciação entre os tratamentos entre 100 e 82% para BR-GSL (A) e com percentual de diferenciação entre os tratamentos de 77% para MI-DSL (B). Os pontos destacados com o círculo correspondem às medições em que houve a distinção entre as plantas contaminadas e as do controle (teste t-student, $p \leq 0.05$).

4. Conclusões

De maneira geral, o melhor índice foi o R^{725}/R^{702} que permitiu diferenciar a braquiária afetada pela gasolina e o milho afetado pelo diesel em praticamente qualquer fase do desenvolvimento. No caso da braquiária desenvolvida em solo com diesel, nenhum dos índices estudados apresentou resultado satisfatório.

Os resultados mostraram ainda uma sensibilidade diferenciada para os índices entre as espécies e os tratamentos estudados, pois o mesmo índice pode fazer a distinção entre as plantas saudias e as plantas sob efeito do contaminante para uma espécie, mas não para a outra.

Agradecimentos

Salete Gürtler agradece ao CNPq 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, pelo apoio financeiro e logístico dedicado ao Projeto Biomarcadores II desenvolvido em parceria com a UNICAMP, em especial ao Dr. Wilson Jose de Oliveira. Agradecem também os alunos de pós-graduação Rosa Elvira Correa Pabón, Lucíola Alves Magalhães e Flávia de Souza Mendes que ativamente participaram da coleta dos dados no campo.

Referências Bibliográficas

- Chappelle, E.W.; Kim, M.S. Ratio Analysis of Reflectance Spectra (RARS): An Algorithm for the Remote Estimation of the Concentrations of Chlorophyll A, Chlorophyll B, and Carotenoids in Soybean Leaves. **Remote Sensing of Environment**, 39, p. 239-247, 1992.
- Dawson, T.P.; Curran, P.J. A new technique for interpolating the reflectance red edge position. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 11, p. 2133- 2139, 1998.
- Emengini, E.J.; Blackburn, G.A.; Theobald, J.C. Early detection of oil-induced stress in crops using spectral and thermal responses. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 7, 15p, 2013a.
- Emengini, E.J.; Blackburn, G.A.; Theobald, J.C. Discrimination of plant stress caused by oil pollution and waterlogging using hyperspectral and thermal remote sensing. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 7, 17p, 2013b.
- Gitelson, A.A.; Merzlyak, M.N.; Lichtenthaler, H.K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. **Journal of Plant Physiology**, v. 148. p. 501-508, 1996.
- Haboudane, D.; Millera, J.R.; Tremblay, N.; Zarco-Tejada, P.J.; Dextraze, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, 81, p. 416– 426, 2002.
- Hernández-Clemente, R. Navarro-Cerrillo, R.M.; Zarco-Tejada, P.J. Carotenoid content estimation in a heterogeneous conifer forest using narrow-band indices and PROSPECT+DART simulations. **Remote Sensing of Environment**, 127, p. 298–315, 2012.
- Horler, D.N.H.; Dockray, M.; Barber, J. The red edge of plant leaf reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 4, n.2, p. 273-288, 1983.
- Li L.; Ustin S.L.; Lay M. Application of AVIRIS data in detection of oil-induced vegetation stress and cover change at Jornada, New Mexico. **Remote Sensing of Environment**, 94, p. 1-16, 2005.
- Lichtenthaler, H.K. Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. **Journal of Plant Physiology**. V. 148, p. 4-14, 1996.
- Merzlyak, M.N.; Gitelson, A.A.; Chivkunova, O.B.; Rakitin, V.Y. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, 106, p. 135–141, 1999.

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**, 8, p. 55–64, 2012.

Peñuelas, J.; Baret, F; Filella, I. Semiempirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, v. 31, n. 2, p. 221–230, 1995.

Sanches, I.D.; Souza Filho, C.R.; Magalhães, L.A.; Quitério, G.C.M.; Alves, M.N.; Oliveira, W.J. Assessing the impact of hydrocarbon leakages on vegetation using reflectance spectroscopy. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 78, p. 85-101, 2013a.

Sanches, I.D.; Souza Filho, C.R.; Magalhães, L.A., Quitério; G.C.M., Alves, M.N.; Oliveira, W.J. Unravelling remote sensing signatures of plants contaminated with gasoline and diesel: An approach using the red edge spectral feature. **Environmental Pollution**, 174, p. 16-27, 2013b.

Smith, K.L.; Steven, M.D.; Colls, J.J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks. **Remote Sensing of Environment**, 92, p. 207-217, 2004.

Zarco-Tejada, P.J.; Miller, J.R.; Noland, T.L.; Mohammed, G.H.; Sampson, P.H. Scaling-Up and Model Inversion Methods with Narrowband Optical Indices for Chlorophyll Content Estimation in Closed Forest Canopies with Hyperspectral Data. **IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing**, v. 39, n. 7, p. 1491-1507, 2001.

Zarco-Tejada, P.J.; Miller, J.R.; Morales, A.; Berjón, A.; Agüera, J. Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. **Remote Sensing of Environment**, 90, p. 463-476, 2004.