

SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL APLICADO NA DISCRIMINAÇÃO DE DOENÇAS FÚNGICAS DA Videira

Pâmela Aude Pithan¹, Jorge Ricardo Ducati², Lucas da Ressurreição Garrido³, Diniz Carvalho de Arruda⁴, Virindiana Colet Bortolotto⁵, Adriane Brill Thum⁶, Marcos Augusto Gomes dos Santos⁷

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)/ PPGSR, Porto Alegre-RS, pamelapithan@gmail.com; ² UFRGS/ PPGSR, ducati@if.ufrgs.br; ³ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)/ Uva e Vinho, Bento Gonçalves-RS, lucas.garrido@embrapa.br; ⁴ UFRGS/ PPGSR, dinizcarvalho88@gmail.com; ⁵ UFRGS/ PPGSR e Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT)/ICAA, Sinop-MT, virindianacb@gmail.com; ⁶ UFRGS/ PPGSR, adrianebt@unisinios.br; ⁷ Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)/ PPGGEO, Santa Maria-RS, marcosagds87@gmail.com

RESUMO

Os espectrorradiômetros são sensores hiperespectrais, que obtêm informações sobre o comportamento espectral de alvos, como o comportamento espectral da folha. Ataques de pragas e doenças modificam a reflectância foliar em diversas regiões espectrais. Este trabalho teve como objetivo identificar os comprimentos de onda que discriminam os tipos de doenças fúngicas em plantas de videiras. Avaliou-se plantas inoculadas com os patógenos: *Plasmopara viticola* (míldio), *Uncinula necator* (oídio), *Ilyonectria macrodidyma* (pé-preto) e *Phaeoacremonium sp.* (doença de Petri) e suas respectivas plantas testemunhas. Foram obtidas curvas espectrais médias normalizadas, posteriormente calculou-se os espectros-razão para redução dos dados e identificação dos comprimentos de onda. Análise discriminante canônica foi utilizada para obter a acurácia de classificação. Os comprimentos de onda com potencial de separação foram: 443; 496; 516; 573; 695; 1420; 1900; 2435nm. A discriminação espectral das doenças fúngicas obteve acurácia global de 94,3% de classificação quando excluídas as testemunhas e, 85,7% quando incluídas.

Palavras-chave — espectrorradiometria, doenças fúngicas, videiras.

ABSTRACT

*Spectroradiometers are hyperspectral sensors which obtain information about the spectral behavior of targets, such as the spectral behavior of plant leaves. Pests and diseases modify leaf reflectance in several spectral regions. The objective of this work was to identify the wavelengths that differentiate types of fungal diseases in grapevine plants. Plants inoculated with the pathogens *Plasmopara viticola* (downy mildew), *Uncinula necator* (powdery mildew), *Ilyonectria macrodidyma* (black-foot) and *Phaeoacremonium sp.* (Petri disease), and their controls were evaluated. The normalized average spectral profiles were obtained and characterizing spectra were calculated for data reduction and identification of wavelengths. Canonical discriminant analysis was used to obtain the classification accuracy. The wavelengths with separation potential were 443; 496; 516; 573; 695; 1420; 1900;*

2435nm. The spectral discrimination of the fungal diseases obtained overall accuracy 94.3% of the classification when excluded their controls and 85.7% when included.

Key words — spectroradiometry, fungal diseases, vineyards.

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto pode ser definido como a utilização conjunta de sensores, com o objetivo de estudar e analisar as interações entre a radiação eletromagnética com os alvos e as substâncias que os compõem [1]. O processo fotossintético e as estruturas celulares dos tecidos, em plantas atacadas por patógenos, sofrem mudanças que modificam a interação entre vegetação e radiação eletromagnética e, conseqüentemente, a reflectância de folhas e dosséis [2]. Alterações no metabolismo vegetal podem ocasionar o aumento ou diminuição da reflectância em diversas regiões espectrais, onde a região do visível é afetada pelo conteúdo de pigmentos fotossintetizantes, o infravermelho próximo pela ocorrência de necroses e o infravermelho médio afetado pelo equilíbrio hídrico [3].

Sensores proximais são preferíveis para a detecção de sintomas simples em folhas e plantas doentes [4]. A resolução espacial tem uma forte influência na detecção de doenças de plantas ou interações planta-patógeno [5]. Sensores hiperespectrais possibilitam a obtenção de dados em uma ampla faixa do espectro, no entanto, uma desvantagem é o número de dados coletados. Utilizando técnicas estatísticas para a redução de dados de reflectância hiperespectral, foram identificadas as regiões espectrais mais importantes para separar plantas saudáveis de plantas com estresse causado por *Venturia inaequalis* em macieiras; os domínios espectrais entre 1350-1750nm e 2200-2500nm foram as regiões mais importantes para a separação imediatamente após a infecção [6].

Em videiras foram relatadas diferenças nas medidas de reflectância associadas a doenças, produzindo uma assinatura espectral diferente das medidas na vegetação saudável [7-8-9]. Utilizando a classificação de imagem hiperespectral escolhendo bandas específicas, a combinação planta-patógeno possibilitou a detecção de níveis de infecção de *Erysiphe necator* em cachos da variedade

Chardonnay [10]. Os estudos sugerem a técnica de reflectância espectral como uma ferramenta promissora para o diagnóstico de anomalias. Desta forma o trabalho teve como objetivo identificar os comprimentos de onda que discriminem de doenças fúngicas em plantas de videiras utilizando espectrorradiometria.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos, foram plantadas estacas de pé-franco da cultivar *Cabernet Sauvignon*, com aproximadamente um ano de idade, que enraizaram após dois ou três meses. As plantas em que foram inoculados os patógenos, e suas respectivas testemunhas, foram separadas em lotes compostos por dez plantas, uma a cada vaso. Os seguintes patógenos foram inoculados nas plantas: *Plasmopara viticola* (míldio), *Uncinula necator* (oídio), *Ilyonectria macrodidyma* (pé-preto) e *Phaeoacremonium sp.* (doença de Petri). Os patógenos causadores do pé-preto e da doença de Petri tiveram um único lote de plantas testemunha, denominadas “T. raiz”, visto que a inoculação destes é realizada via fermentos nas raízes, ou seja, tanto as plantas inoculadas quanto a testemunha foram submetidas ao corte de raízes. Os experimentos foram conduzidos em câmara climática e casa de vegetação nas dependências da Embrapa Uva e Vinho, localizada no município de Bento Gonçalves-RS.

Plantas inoculadas com *P. viticola* permaneceram oito dias em incubação. Já as plantas inoculadas com *I. macrodidyma* e *Phaeoacremonium sp.* foram mantidas em incubação durante treze dias. Após o período de incubação, as plantas foram retiradas da câmara e colocadas em uma bancada da casa de vegetação para proceder as medidas espectrais das plantas doentes e testemunhas. As avaliações espectrais foram realizadas no desenvolvimento inicial destas doenças. As plantas inoculadas com *U. necator*, as foram mantidas na casa de vegetação, sob condição de baixa umidade relativa, para o favorecimento das infecções, as medidas das plantas de oídio e suas testemunhas foram realizadas em duas fases, quando a doença estava em desenvolvimento inicial (Oídio I.) e quando a doença estava em desenvolvimento final (Oídio F.).

Na avaliação espectral das plantas utilizamos o espectrorradiômetro Field Spec® 3 ASD – *Analytical Spectral Devices*, com domínio espectral entre os comprimentos de onda 350nm a 2500nm, com o acessório *Probe Leaf Clip*, que torna o equipamento um sensor ativo, pois emite luz própria que incide diretamente na folha eliminando qualquer interferência do ambiente. A calibração foi realizada por meio de placa interna do tipo Spectralon®. Foram realizadas medidas espectrais em três folhas por planta, sempre na face adaxial evitando as nervuras principais. O equipamento foi programado para realizar quatro leituras consecutivas em cada folha.

Como os comprimentos de onda da região espectral do ultravioleta (350 – 400nm) continham muitos ruídos foi

necessário eliminá-los da amostra para obter melhores resultados na classificação final. Para a obtenção das curvas espectrais médias normalizadas, foi calculada a média por planta, posteriormente normalizaram-se os espectros igualando-se a área de todas as curvas espectrais por meio da divisão da reflectância de cada comprimento de onda pela soma de todas as reflectâncias, isto é, pela área da curva espectral. Visualmente as variações entre os espectros são sutis e há um grande número de dados. Para quantificar as diferenças entre os espectros e reduzir a dimensionalidade dos dados foi calculado o espectro-razão, por meio da divisão do espectro médio de uma planta doente (inoculada) pelo espectro médio de uma planta sadia (testemunha). Os maiores valores de quociente desta divisão, nos revela em quais regiões espectrais uma planta doente apresenta maior diferença quando comparada a uma planta sadia. Os “picos” do quociente das reflectâncias foram utilizados para reduzir a dimensionalidade dos dados e selecionar os comprimentos de onda que caracterizam as diferenças entre doenças e plantas sadias. Com os comprimentos de onda selecionados, realizou-se a análise discriminante canônica pelo método *Stepwise* para obter a matriz de confusão.

3. RESULTADOS

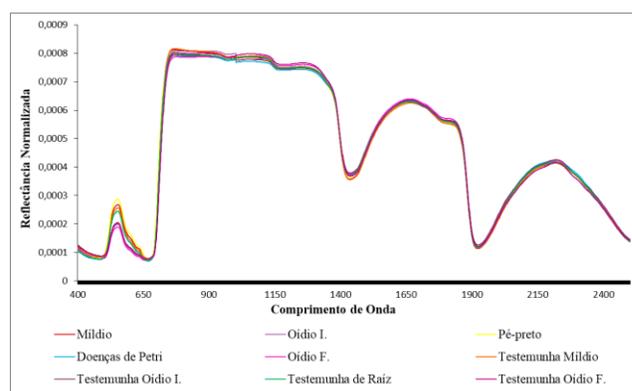


Figura 1. Gráfico da reflectância dos espectros médios normalizados dos patógenos e testemunhas.

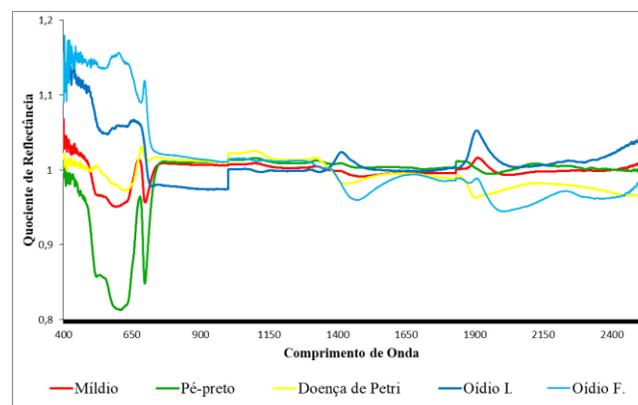


Figura 2. Curvas espectrais do quociente de reflectância entre plantas doentes e suas respectivas testemunhas.

Doenças	Doença de Petri	Míldio	Oídio I.	Oídio F.	Pé-preto	Σ
Doença de Petri	85,7	0	0	0	14,3	100
Míldio	0	100,0	0	0	0	100
Oídio I.	0	0	100,0	0	0	100
Oídio F.	0	0	0	100,0	0	100
Pé-preto	14,3	0	0	0	85,7	100

Tabela 1. Matriz de confusão (%) resultante da classificação dos valores de reflectância foliar a partir dos comprimentos de onda selecionados para separação entre as doenças fúngicas analisadas (excluídas as testemunhas).

Doenças	Míldio	T. míldio	Pé-preto	D. Petri	T. raíz	Oídio I.	T. oídio I.	Oídio F.	T. oídio F.	Σ
Míldio	85,7	0	0	14,3	0	0	0	0	0	100
T. míldio	14,3	85,7	0	0	0	0	0	0	0	100
Pé-preto	0	0	71,4	14,3	14,3	0	0	0	0	100
D. Petri	0	0	0	100,0	0	0	0	0	0	100
T. raíz	0	0	0	0	85,7	14,3	0	0	0	100
Oídio I.	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100
T. oídio I.	0	0	0	0	0	0	85,7	0	14,3	100
Oídio F.	0	0	0	0	0	14,3	0	85,7	0	100
T. oídio F.	0	0	0	0	0	0	28,6	0	71,4	100

Tabela 2. Matriz de confusão (%) resultante da classificação dos valores de reflectância foliar a partir dos comprimentos de onda selecionados para separação entre as doenças fúngicas analisadas incluindo suas testemunhas (T.).

Na Figura 1 são apresentadas as curvas espectrais médias normalizadas para cada doença. Os tratamentos Oídio I. e Oídio F. apresentaram diferenças visuais acentuadas na região do visível em relação as demais doenças, visto que as medidas espectrais foram conduzidas posteriormente as demais. Os quocientes de reflectância obtidos entre a razão das plantas doentes e suas respectivas testemunhas são apresentados na Figura 2. Observando as feições espectrais resultantes, os seguintes comprimentos de onda se destacaram: 443; 496; 516; 573; 695; 1420; 1900; 2435nm.

A matriz de confusão da Tabela 1 apresenta os resultados da separação das classes doenças a partir dos comprimentos de onda escolhidos. Os resultados obtidos (excluídas as testemunhas) apresentaram acurácia global de 94,3%, indicando separação entre as doenças analisadas. A classificação dos dados incluindo suas testemunhas apresentada na matriz de confusão da Tabela 2, resultou em uma acurácia global de 85,7%.

4. DISCUSSÃO

As doenças oídio e míldio são causadas por patógenos biotróficos, que durante a fase de infecção, anterior ao aparecimento das “manchas de óleo”, não apresentam sintomas cloróticos nem redução da clorofila. Na região do visível, oídio apresentou a menor reflectância entre as demais curvas espectrais, tanto Oídio I., quanto Oídio F., isto deve ter ocorrido devido as medidas destes tratamentos terem sido realizadas posteriormente, e as folhas estavam mais desenvolvidas. Na região do infravermelho a partir de 750nm, o oídio em estágio de infecção inicial tem maior reflectância do que na segunda coleta com oídio em estágio de infecção final, porém, a partir de 1000nm as curvas

inverteram os valores de reflectância e o tratamento Oídio F., passa a ter maior reflectância entre todas as doenças e segue esse padrão até o final do espectro.

Míldio na região do infravermelho próximo apresenta o maior valor de reflectância entre as doenças começando a reduzir em 850nm, apresentando maior absorção na região do infravermelho médio (1400 – 1900nm). O agente causal tem como efeito a redução da assimilação de CO₂ com baixo impacto na estrutura do tecido foliar durante a infecção inicial, mas produzindo manchas cloróticas e a produção de florescência branca (esporulação) na superfície abaxial da folha que podem influenciar a interação espectral.

Os agentes causais do pé-preto e doença de Petri são patógenos hemibiotróficos que apresentam diferenciação entre os espectros na região do visível com maior reflectância de pé-preto, no comprimento de onda 530nm dentre todas as análises. Esses parasitas facultativos ocasionam a degradação dos cloroplastos e redução da clorofila, afetando principalmente os vasos das plantas. Foram percebidas variações sutis entre os comportamentos espectrais das doenças analisadas, que seguiram o mesmo padrão de resposta espectral, ou seja, os valores de reflectância foram similares.

A relação entre espectros de reflectância de folhas de uma planta doente e de uma planta sadia, apresentadas na forma de quociente de reflectância, indicam a maior diferença espectral na região do visível para as doenças analisadas, em que se destacam os comprimentos de onda 443, 496, 516, 573 e 695nm, e na região do infravermelho médio, os comprimentos de onda 1420, 1900 e 2435nm apresentam maior diferenciação espectral para as doenças oídio e doença de Petri. Pode-se dizer também que o míldio apresentou a menor diferenciação espectral em relação à sua

testemunha, ao longo de todo o espectro, levando em consideração a avaliação no estágio de infecção inicial. Os comprimentos de onda selecionados usados na análise discriminante levaram a uma boa separabilidade para as classes de doenças.

A classificação que avaliou a separação apenas entre as doenças apresentou confusão entre doença de Petri e pé-preto. Já a classificação que avaliou a separação entre as doenças incluindo suas testemunhas apresentou confusão entre as classes míldio e doença de Petri, a classe da testemunha de míldio com o míldio, pé-preto confundiu com doença de Petri e a sua testemunha T.raiz. Já a classe da testemunha T.raiz confundiu com a classe de míldio. A classe oídio inicial confundiu com a classe oídio final e a sua testemunha.

5. CONCLUSÕES

Os resultados do trabalho indicaram que as infecções causadas pelos patógenos *Plasmopara viticola* (míldio), *Uncinula necator* (oídio), *Ilyonectria macrodidyma* (pe-preto) e *Phaeoacremonium sp.* (doença de Petri), após a inoculação de plantas jovens de videiras, quando os sintomas ainda se encontram no estágio inicial, já apresentam alterações no comportamento espectral das folhas nas mesmas regiões espectrais. O patógeno *Uncinula necator* (oídio) avaliado espectralmente no estágio de infecção final da doença, apresentou uma curva espectral muito próxima daquela do estágio inicial, com diferença na região espectral relativa ao conteúdo de água da planta, demonstrando que mesmo em estágios de infecção diferentes as curvas espectrais continuaram com o mesmo padrão entre elas, principalmente na região do visível.

Os comprimentos de onda escolhidos a partir da metodologia proposta apresentaram bons resultados na classificação, separando os tipos de doenças até mesmo quando avaliados com suas respectivas testemunhas. Porém, quanto maior o número de variáveis na análise, maior a mistura entre as classes. As técnicas aplicadas de sensoriamento remoto hiperespectral (espectrorradiometria) utilizadas neste trabalho apresentam potencial para diferenciar doenças fúngicas na videira.

6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CEPSRM/UFRGS) e da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA) Uva e Vinho.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Novo, E.M.L de M., “Sensoriamento remoto: princípios e aplicações”, 4ª. Ed, São Paulo: Blucher, 2010.
- [2] Mahlein, A.K., “Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping”, *Plant Disease*, v. 100, p. 241-251, 2016.
- [3] Guyot, G., “Synthésé sur les propriétés optiques des couverts végétaux dans le spectre solaire”. In: Spectel colloquio internacional – Propriedades espectrales y teledeteccion de los suelos y rocas del visible al infrarrojo medio, La Serena, p. 27-70, 1995.
- [4] Hillnhütter, C.; Mahlein, A.K.; Sikora, R.A. e Oerke, E.C., “Remote sensing to detect plant stress induced by *Heterodera schachtii* and *Rhizoctonia solani* in sugar beet fields”, *Field Crops Research*, v. 122, p. 70-77, 2011.
- [5] Mahlein, A.K.; Steiner, U.; Hillnhütter, C.; Dehne, H.W. e Oerke, E.C., “Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet disease”, *Plant Methods*, v. 8, n. 3, 2012b.
- [6] Delalieux, S.; Van Aardt, J.; Keulemans, W.; Schrevels, E. e Coppin, P., “Detection of biotic stress (*Venturia inaequalis*) in apple trees using hyperspectral data: Non-parametric statistical approaches and physiological implications”, *European Journal of Agronomy*, v. 27, p. 130-143, 2007.
- [7] Naidu, R.A.; Perry, E.M.; Pierce, F.J. e Mekuria, T., “The potential of spectral reflectance technique for the detection of Grapevine leafroll-associated virus in two red-berried wine grape cultivars”, *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 66, p. 38-45, 2009.
- [8] Calcante, A.; Mena, A. e Mazzetto, F., “Evaluation of “ground sensing” optical sensors for diagnosis of *Plasmopara viticola* on vines”, *Spanish Journal of Agricultural Research*, v. 10, p. 619-630, 2012.
- [9] Junges, A.H.; Almança, M.A.K.; Ducati, J.R. e Lampugnani, C.S., “Espectrorradiometria para detecção de alterações na assinatura espectral de folhas de videiras por doenças de causa fúngica e viral”, In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Anais..., Santos - SP, Brasil, INPE, p. 3680 – 3686, 2017.
- [10] Knauer, U.; Matros, A.; Petrovic, T.; Zanker, T.; Scott, E.S. e Seiffert, U., “Improved classification accuracy of powdery mildew infection levels of wine grapes by spatial-spectral analysis of hyperspectral images”, *Plant Methods*, v. 13, n. 47, p. 15, 2017.