

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**PÂMELA AUDE PITHAN**

**Dados hiperespectrais aplicados na avaliação de videiras da  
cultivar Cabernet Sauvignon infectadas com alguns patógenos**

**PORTO ALEGRE, RS**

**2019**

**PÂMELA AUDE PITHAN**

**Dados hiperespectrais aplicados na avaliação de videiras da cultivar Cabernet  
Sauvignon infectadas com alguns patógenos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Ricardo Ducati

**PORTO ALEGRE, RS**

**2019**

**Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção  
do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto.**

---

**Dra. Denise Cybis Fontana (UFRGS)**

---

**Dr. Lucas da Ressureição Garrido (Embrapa)**

---

**Dr. Vitor Fernandez Nascimento (UFRGS)**

---

**Dr. Jorge Ricardo Ducati (UFRGS)**

**Orientador**

**Pâmela Aude Pithan**

**Porto Alegre – RS, Brasil**

**2019**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, pela estrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu orientador, Prof. Jorge Ricardo Ducati, pela paciência, dedicação, conselhos e incentivo a mim dados, para o desenvolvimento deste trabalho.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa – Uva e Vinho), em especial ao Pesquisador Dr. Lucas da Ressurreição Garrido pela condução e empenho que depositou neste trabalho e à pesquisadora Dr<sup>a</sup>. Rosemary Hoff, pela parceria e apoio nos projetos.

À minha mãe Queles Aude pelo amor incondicional e apoio, obrigada por tudo, sempre.

Ao meu namorado Jean Conceição, meu maior incentivador, é maravilhoso poder compartilhar meus sonhos contigo.

À minha avó Ceni Muniz Pithan (*in memoriam*), que acompanhou o início deste sonho, minha gratidão eterna por quem a senhora foi para mim.

Aos colegas do LARAE pelo bom convívio, em especial ao meu amigo Diniz Arruda, que ao longo desses dois anos se tornou um grande irmão, obrigada pela companhia nas viagens à campo, pelos conselhos e até pelas discussões que sempre acabaram em boas risadas.

Aos amigos do "Hora do chá", aos amigos de moradia e aos amigos colegas da pós-graduação, vocês trouxeram leveza e alegria nessa jornada.

*Que nada nos limite, que nada nos defina, que nada nos sujeite, que a liberdade seja a nossa própria substância, já que viver é ser livre.*

*Simone de Beauvoir*

## RESUMO

As doenças bióticas afetam o desenvolvimento e a produção de videiras, o que pode resultar em perda econômica, social e ambiental. As plantas doentes têm seu metabolismo modificado, levando a alterações em seus espectros de reflectância (ER). Pouco se sabe sobre essas alterações, e mais pesquisas devem ser realizadas para se desenvolver sensores capazes de detectar “sintomas” de doenças através de técnicas rápidas e não destrutivas. O presente estudo teve como objetivo detectar mudanças no ER de videiras da cv. Cabernet Sauvignon infectado com alguns patógenos causadores das doenças míldio, oídio, pé-preto e doença de Petri com o intuito de descrever os domínios espectrais onde as alterações são mensuráveis entre as plantas doentes em relação às videiras saudáveis. Plantas de videiras da cv. Cabernet Sauvignon foram cultivadas em solo contido em vasos, mantidos em casa-de-vegetação e inoculadas com *Plasmopara vitícola*, *Uncinula necator*, *Dactylonectria macrodidyma* e *Phaeoacremonium* sp. Neste estudo, realizou-se análises do ER em plantas jovens e nos estágios iniciais do desenvolvimento da doença. As medidas de reflectância foram realizadas utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec 3. Os ER foram investigados e as alterações na sua forma, característicos de cada doença, foram analisadas. Os descritores das doenças foram baseados em razões entre feições dentro de um espectro, o que permitiu a derivação de parâmetros intrínsecos para cada doença. Um conjunto de limiares, que são as razões de intensidade de reflectância em comprimentos de onda, foram derivados para as doenças estudadas utilizando análises estatísticas e percepções visuais. As razões de comprimentos de onda selecionadas foram 443/496, 443/573, 443/695, 443/1900, 496/573, 496/695, 516/1900 e 1900/2435 (valores em nanômetros), para os quais os ER de plantas infectadas apresentaram mudanças de forma de até 20% em relação a plantas saudáveis. As deformações espectrais observadas são maiores para as doenças pé preto e oídio, mas algumas razões de comprimento de onda também são indicadores de míldio e doença de Petri. Os dados do infravermelho próximo são, em geral, melhores, em comparação com as medições do infravermelho distante entre 1900 e 2435 nm. Estas informações podem ser usadas para o desenvolvimento de dispositivos de baixo custo que podem realizar medições de campo em tempo real para avaliação antecipada do estado de saúde das videiras e conseqüentemente diminuir as perdas econômicas causadas por estas doenças ou até mesmo reduzir o uso excessivo de pesticidas.

**Palavras-chave:** Doenças da videira, reflectância foliar, espectrorradiometria, detecção de doenças.

## ABSTRACT

Biotic diseases impact the development and yield of grapevines, which can result in economic, social and environmental losses. Sick plants have their metabolism changed, leading to alterations in their reflectance spectra. Little is known on these alterations, and a better knowledge could be used in the development of sensors able to detect diseases through fast, non-destructive techniques. The present study was aimed at detecting spectral changes on the reflectance spectra of vines of cv. Cabernet Sauvignon, infected with pathogens that cause downy mildew, powdery mildew, black-foot and Petri diseases, describing the spectral domains where alterations are measurable with respect to healthy control vines. Plants of vineyards of the cv. Cabernet Sauvignon were cultivated in soil contained in pots, kept in greenhouse and inoculated with *Plasmopara viticola*, *Uncinula necator*, *Dactylonectria macrodidyma* e *Phaeoacremonium* sp. In this study, ER analyzes were performed in young plants and in the early stages of disease development. Reflectance measurements were performed using a FieldSpec 3 spectroradiometer. The ER were investigated and the changes in their shape, characteristic of each disease, were analyzed. The disease descriptors were based on ratios between spectral features inside a spectrum, a procedure which allowed the derivation of parameters intrinsic to each disease. A set of thresholds, which are the intensity ratios of reflectance at selected wavelengths, was derived for the studied diseases. The selected wavelength ratios were 443/496, 443/573, 443/695, 443/1900, 496/573, 496/695, 516/1900, and 1900/2435 (values in nanometers), for which the spectra from infected plants present shape changes of as much as 20% with respect to healthy plants. The observed spectral deformations are larger for black-foot and powdery mildew, but some wavelength ratios are also indicators of downy mildew and Petri disease. Data from near-infrared are in general more useful, compared with measurements at 1900 and 2435 nm. This information can be used for the development of low cost devices that can perform field measurements in real time for early assessment of the health status of the vineyards and consequently reduce the economic losses caused by these diseases or even reduce the excessive use of pesticides.

**Keywords:** Grapevine diseases, leaf reflectance, spectroradiometry, disease detection.

## SÚMARIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1 Objetivo Geral</b> .....	16
<b>1.1.1 Objetivos Específicos</b> .....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
<b>2.1 Reflectância espectral de plantas doentes</b> .....	17
<b>2.2 Sensor Remoto Hiperespectral</b> .....	18
2.3 Doenças fúngicas da videira .....	20
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	23
<b>3.1 Produção do inóculo</b> .....	23
<b>3.2 Procedimentos observacionais</b> .....	24
<b>3.3 Redução de dados espectrais</b> .....	26
<b>3.4 Detecção de alterações espectrais</b> .....	27
<b>3.5 Análise Discriminante</b> .....	28
<b>3.6 Derivação de limiares de plantas doentes</b> .....	28
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	29
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	44
REFERÊNCIAS .....	46
APÊNDICE A.....	51

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.</b> Avaliação espectral com o espectrorradiômetro Field Spec® 3 ASD em folhas de videiras utilizando o acessório <i>ProbeLeaf Clip</i> .....	24
<b>Figura 2.</b> Ilustração dos experimentos onde cada lote de plantas foi formado por dez vasos devidamente identificados por número e código de doença (A), em cada vaso houve o enraizamento de uma planta (B), foram efetuadas as leituras de três folhas localizadas preferencialmente na parte central da planta e previamente marcadas (C), em cada folha efetuaram-se quatro leituras adquiridas sempre na face adaxial evitando o sistema vascular (D).....	25
<b>Figura 3.</b> Obtenção do valor relativo de clorofila em folha de videira utilizando o clorofilômetro modelo SPAD-502.....	26
<b>Figura 4.</b> Gráficos de reflectância de espectros médios normalizados (eixo y) da doença míldio e sua respectiva testemunha.....	29
<b>Figura 5.</b> Gráficos de reflectância de espectros médios normalizados (eixo y) das doenças pé-preto e doença de Petri e a respectiva testemunha em função dos comprimentos de onda (eixo x).....	30
<b>Figura 6.</b> Gráficos de reflectância de espectros médios normalizados (eixo y) da doença oídio I. (estágio inicial) e sua respectiva testemunha em função dos comprimentos de onda (eixo x).....	30
<b>Figura 7.</b> Gráficos de reflectância de espectros médios normalizados (eixo y) da doença oídio F. (estágio final) e sua respectiva testemunha em função dos comprimentos de onda (eixo x).....	31
<b>Figura 8.</b> Gráfico de reflectância de espectros médios normalizados (eixo y) das doenças míldio, pé-preto, doença de Petri, oídio I. (estágio inicial) e oídio F. (estágio final) em função dos comprimentos de onda (eixo x).....	32
<b>Figura 9.</b> Espectro-razão obtido a partir do quociente de reflectâncias entre plantas sintomáticas e suas testemunhas, apresentando as regiões espectrais em que as doenças míldio, pé-preto, doença de Petri e oídio apresentam diferenças em relação a suas plantas saudáveis.....	33

<b>Figura 10.</b> Desvio padrão derivado dos quocientes reflectâncias entre plantas sintomáticas e suas testemunhas, apresentando os comprimentos de onda 443, 496, 516, 573, 695, 1420, 1900 e 2435 nm destacados.....	33
<b>Figura 11.</b> Curvas gaussianas projetadas, expressando a distribuição das razões de reflectância para as oito razões (443/496, 443/573, 443/695, 443/1900, 496/573, 496/695, 516/1900 e 1900/2435 nm) que apresentaram melhor desempenho entre as demais, possibilitando observar como cada doença apresenta sua alteração espectral característica.....	36
<b>Figura 12.</b> Correlação de Pearson para os dados de clorofila total em relação a reflectância das doenças e suas respectivas testemunhas nos comprimentos de onda 443, 496, 516, 573, 695, 1420, 1900, 2435.....	42
<b>Figura 13.</b> Correlação de Pearson para os dados de clorofila A, clorofila B e clorofila total, em relação a reflectância de oídio e testemunha nos comprimentos de onda 443, 496, 516, 573, 695, 1420, 1900, 2435.....	43

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Matriz de confusão (%) resultante da classificação dos valores de reflectância foliar a partir dos comprimentos de onda selecionados para separação entre as doenças fúngicas (excluídas as testemunhas).....	35
<b>Tabela 2.</b> 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.).....	35
<b>Tabela 3.</b> Valores médios e desvios padrões das razões 443/496, 443/573, 443/695, 443/1900, 496/573, 496/695, 516/1900 e 1900/2435 nm, que apresentam as proporções de reflectância para as doenças míldio, pé-preto, doença de Petri e oídio.....	39
<b>Tabela 4.</b> Valores mínimos e máximos de reflectância das razões 443/496, 443/573, 443/695, 443/1900, 496/573, 496/695, 516/1900 e 1900/2435 nm, para a primeira coleta de dados (2017), que são indicadores diretos das doenças míldio, pé-preto, doença de Petri e oídio em folhas de videiras.....	40
<b>Tabela 5.</b> Valores mínimos e máximos de reflectância das razões 443/496, 443/573, 443/695, 443/1900, 496/573, 496/695, 516/1900 e 1900/2435 nm, para a segunda coleta de dados (2018), que são indicadores diretos das doenças míldio, pé-preto, doença de Petri e oídio em folhas de videiras.....	40
<b>Tabela 6.</b> Valores dos limiares para as doenças míldio, pé-preto, doença de Petri e oídio, derivadas da primeira e segunda coleta de dados (2017 e 2018), calibrados pelas medidas de suas respectivas testemunhas.....	41

## APÊNDICE

<b>APÊNDICE A</b> – Curvas gaussianas que expressam a distribuição das razões entre reflectâncias para os comprimentos de onda 443, 496, 516, 573, 695, 1420, 1900, 2435, das doenças míldio, pé-preto, doença de Petri e oídio e suas respectivas testemunhas, buscando encontrar os melhores casos de separação entre doenças a partir das suas características espectrais.....	51
---	----

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

- ACP - Análise de Componentes Principais  
AD - Análise Discriminante  
ADE - Análise de Dados Exploratória  
ASD - *Analytical Spectral Devices*  
BDA - Batata-dextrose-ágar  
CP - Componentes Principais  
ER - Espectro de reflectância  
VNIR - visíveis/infravermelhos-próximos  
RBE - Reflectância Bidirecional Espectral  
REM - Radiação Eletromagnética  
FRBE - Fator de Reflectância Bidirecional Espectral  
SNR - *Signal-to-Noise Ratio*

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil a videira é produzida em diversas condições climáticas destacando-se nos estados do Rio Grande do Sul, Pernambuco e Bahia, São Paulo, Minas Gerais e Paraná. Nessas áreas, as doenças fúngicas correspondem a um dos principais problemas enfrentados pelos viticultores (SHIMANO & SENTELHAS, 2013). De acordo com Garrido *et al.* (2004), tanto as pragas quanto às doenças quando não controladas adequadamente ocasionam a debilitação progressiva da planta, sendo que o número de casos de declínio e morte de plantas de videira tem aumentado de forma acentuada nos últimos anos, causando grande redução de produtividade e de qualidade da uva.

Cerca de 85% das doenças de plantas são causadas por organismos fúngicos, outras doenças graves das plantas são causadas por bactérias, vírus, e poucas doenças são causadas por certos nematoides (NACHTIGAL & MIGLIORINI, 2009; ISLEIB, 2012). Tem-se verificado o aumento da resistência de fungos em relação aos tratamentos químicos, o que pode determinar incremento no número de pulverizações e de princípios ativos utilizados (CARVALHO, 2012), afetando negativamente o processo de vinificação, pois alguns princípios ativos apresentam ação antagonista às leveduras, organismos responsáveis pelo processo fermentativo (CHAVARRIA & SANTOS, 2013), além de causar efeitos adversos no agroecossistema, entre eles o acúmulo de metais pesados no solo e nos lençóis freáticos (MUGANU & PAOLOCCI, 2013).

As doenças bióticas induzem alterações perceptíveis no espectro de reflectância das plantas, especialmente devido a mudanças no conteúdo de clorofila e água, entre outros fatores. 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 (MAHLEIN, 2016). Em videiras foram relatadas diferenças nas medidas de reflectância associadas a doenças, produzindo uma assinatura espectral diferente das medidas na vegetação saudável (NAIDU *et al.* 2009, CALCANTE *et al.*, 2012; JUNGES *et al.*, 2018).

Geralmente estudos de comportamento espectral dos alvos são realizados através de métodos experimentais de laboratório e campo, que permitem estimar sua reflectância. O estudo de mudanças das características da reflectância espectral das plantas vem sendo muito utilizado para identificação da sanidade das plantas (MUTANGA *et al.*, 2017). Doenças em plantas causaram e podem causar grandes perdas econômicas, social e ambiental na produção agrícola, em todo o mundo.

Métodos não invasivos vêm sendo frequentemente desenvolvidos e aplicados para detectar doenças de plantas, que são baseadas em análises da reflectância, como por exemplo, a espectroscopia de fluorescência, visíveis/infravermelhos-próximos (VNIR), espectroscopia, imagem de fluorescência e imagem hiperespectral (SANKARAN *et al.* 2010). Técnicas rápidas, em tempo real, de baixo custo e não destrutivas podem, portanto, ser vantajosas. A detecção precoce de doenças de plantas (antes do início dos sintomas da doença) pode possibilitar ações preventivas, reduzindo perdas e custos, além de possibilitar benefícios ambientais por meio do manejo mais adequado de agrotóxicos (MAHLEIN, 2016).

Sensores hiperespectrais possibilitam a obtenção de dados em uma ampla faixa do espectro eletromagnético, no entanto, uma desvantagem para o processamento e análise é o grande volume de dados coletados. A redução de dados é a solução para o problema apresentado. Tais métodos, que se fundamentam na seleção de características são vantajosos, pois se baseiam na separabilidade entre classes, evitando redundância sem a modificação dos dados originais (ETTABAA & SALEM, 2018). Índices também são úteis no diagnóstico de doenças de plantas, uma vez que podem melhorar características espectrais em posições específicas através de certas transformações (por exemplo, subtração, divisão e normalização dos dados).

Como os sintomas característicos variam dependendo da doença, diferentes comprimentos de onda são adequados para a detecção de diferentes doenças e gravidade da infecção (MUTANGA *et al.*, 2017). Os comprimentos de ondas espectrais investigados como preditores do estado de saúde das plantas, normalmente variam de 400 a 2500 nm, indicando que os sensores hiperespectrais são ferramentas, não destrutivas, eficientes para detecção e diagnóstico de doenças, porém a iniciativa para seleção de um número menor de comprimentos de onda é permitir a aplicação de sistemas de sensores mais simples e baratos. Para isso, é importante identificar os comprimentos de onda mais relevantes do conjunto de dados hiperespectrais.

Nesse trabalho foram realizadas medidas espectroscópicas utilizando um espectrorradiômetro FieldSpec® 3, que possui sensibilidade espectral entre 350 e 2500 nm, na análise de plantas *Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon, sob condições de casa de vegetação, sadias ou infectadas por patógenos causadores do míldio, oídio, pé-preto e doença de Petri. Aplicou-se um método de detecção, baseado em medidas de reflectância espectral de folhas de videira, que produziu um conjunto de valores relacionados à reflectância, na forma de limiares, que podem ser utilizados em medições gerais realizadas em campo.

## 1.1 Objetivo Geral

Desenvolver metodologias para a definição de indicadores que permitam a detecção precoce de algumas doenças fúngicas ou crômista em plantas de videiras, a partir de tecnologias não destrutivas como a espectrorradiometria.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Compreender a diferença de respostas espectrais entre plantas doentes e plantas saudáveis (testemunhas), a nível de folha em plantas de *Vitis vinífera*;
- Identificar feições espectrais adequadas para diferenciar cada uma das doenças estudadas;
- Estabelecer um conjunto de descritores espectrais que caracterizem cada uma das doenças estudadas;
- Definir, para cada uma das doenças estudadas, quais são as alterações espectrais mais conspícuas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Reflectância espectral de plantas doentes

Um dos principais propósitos do sensoriamento remoto é o de obter informações que ajudem a descrever o comportamento espectral de alvos. O comportamento espectral é dado pela reação da radiação a diferentes alvos em relação ao seu iluminante, com influência das suas características químicas e físicas (NOVO, 2010). Toda matéria (alvo) emite energia e é considerada uma fonte de radiação eletromagnética (REM). A forma mais comum para se categorizar a REM, ao longo do espectro eletromagnético, é através do comprimento de onda (SISMANOGLU *et al.*, 2003). A assinatura espectral de um alvo, também conhecida como caracterização espectral, é a representação gráfica da reflectância em faixas de comprimento de onda bem estreitas e adjacentes, representando de forma detalhada o resultado da interação entre a energia radiante e o objeto de estudo (FONSECA *et al.*, 2003).

Os padrões de reflectância de uma planta são influenciados pelas características da superfície da folha, arquitetura interna e composição bioquímica. No que diz respeito a uma folha isolada podemos destacar algumas características específicas sobre seu comportamento com a REM, que pode ser refletida, absorvida ou transmitida, em diferentes quantidades dependendo da espécie ou até mesmo dentro da própria espécie. Entende-se que parte dessa radiação eletromagnética é refletida ao entrar em contato com a cutícula, formada por pelos e camada de cera, que interagem diretamente com a radiação solar; parte é absorvida pelas células fotossintetizantes do parênquima paliádico, parte sofre espalhamento nos espaços intracelulares do parênquima esponjoso, composto por células ricas em cloroplasto, onde se encontram os pigmentos fotossintetizantes (clorofilas), por fim, a porção que não for retida pela folha é transmitida para as camadas inferiores, formada por células semelhantes às encontradas na epiderme superior, mas com presença de estômatos. Entretanto, esse comportamento é variável, pois cada tipo de radiação tem comportamento diferenciado em cada parte da folha (MOREIRA, 2014; NOVO, 2010; PONZONI & SHIMABUKURO, 2007; CASTRO-ESAU *et al.* 2006).

A reflectância espectral das folhas fornecem um vasto recurso de dados para avaliar a saúde das plantas, e têm sido amplamente pesquisadas. Exemplos de alterações na reflectância de plantas doentes são descritos em: Naidu *et al.* (2009) que relataram as diferenças nas medidas de reflectância foliar para o vírus do enrolamento das folhas nos comprimentos de onda 684, 752 e 970 nm em videiras; Delalieux *et al.* (2007) identificaram que as regiões espectrais 1350-

1750 e 2200-2500 nm foram mais importantes para separar plantas saudáveis de plantas com estresse causado por *Venturia inaequalis* em macieiras logo após a infecção; De acordo com Graeff *et al.* (2006) a detecção e discriminação de oídio em plantas de trigo pode ser realizada pelo uso dos comprimentos de onda 490, 510, 516, 540, 780 e 1300 nm, apresentando uma resposta mais sensível, a faixa 490-780 nm; Delwiche e Kim (2000) avaliaram as características espectrais da doença de Gibberela em trigo de inverno, e descobriram que as reflectâncias em 550, 568, 605, 623, 660, 697, 715 e 733 nm são os melhores indicadores de presença de doença; e Bravo *et al.* (2004) que relataram que a reflectância em 680, 725 e 750 nm poderia ser usada para detectar a ferrugem amarela no trigo de inverno.

Na classificação de imagem hiperespectral, combinações específicas de patógeno-hospedeiro com base em dados definidos, escolhendo bandas características, foram utilizadas para a detecção de níveis de infecção de *Erysiphe necator* em cachos da variedade Chardonnay (KNAUER *et al.*, 2017). Quocientes de fluorescência medidos foram correlacionados com teores de polifenóis e a quantidade relativa de DNA fúngico, para detectar a infecção da ferrugem marrom do trigo de forma não invasiva em um estágio inicial e, possivelmente, antes do aparecimento de sintomas visíveis (TISCHLER *et al.*, 2018).

O conteúdo de clorofila também é um importante indicador usado na avaliação da sanidade das plantas. Na região do infravermelho a reflectância é menor, o que pode ser atribuído à invasão de hifas nos espaços intercelulares, que tendem a compactar a estrutura interna das folhas (PONZONI, *et al.* 2015). Quando as plantas sofrem devido à infecção por patógeno, o cloroplasto é danificado, levando ao contato da clorofila com a clorofilase no cloroplasto danificado, degradando-a rapidamente (HAO *et al.*, 2009). Pesquisas relataram que a infecção por patógenos diminuiria significativamente o conteúdo de clorofila nas plantas (KHAN *et al.*, 2016; HAO *et al.*, 2009). Essas mudanças ópticas descritas nas pesquisas apresentam o potencial do uso de sinais ópticos para detectar a presença de doenças em culturas.

## **2.2 Sensor Remoto Hiperespectral**

O comportamento espectral de um alvo é explicado graficamente em faixas de comprimentos de onda expressando sua radiância e também os fatores que podem afetar a sua trajetória como, por exemplo, componentes atmosféricos, que diferem considerando a escala espacial, espectral e o sensor utilizado. O gráfico impresso pelo espectrorradiômetro fornece a reflectância de um alvo em função do comprimento de onda, de todo o espectro em que opera.

A calibração do sensor é fundamental para a coleta de dados, Pacheco (2001) descreveu a calibração como um ajuste do sistema que impede a obtenção de respostas incoerentes sendo essencial para a padronização e processamento dos dados. As medidas radiométricas feitas com o auxílio do acessório *Probe leaf clip*, o equivalente a uma esfera integradora, que torna o equipamento um sensor ativo, com fonte de luz própria, em contato direto com o alvo, excluindo a interferência da variação de ângulo solar, ângulo de coleta, interferência de outros alvos e atmosfera (ASD, 2012). Trata-se de um método totalmente controlado, em que se tem sempre uma iluminação com incidência ortogonal e mesma intensidade para todas as amostras, eliminando interferências do ambiente e permitindo resultados precisos e significativos (QUITÉRIO *et al.*, 2007).

Medições espectrais usando espectrorradiômetro produzem uma grande quantidade de dados espectrais que requerem pré-processamento. No pré-processamento espectral, a redução de volumes de dados hiperespectrais de alta dimensionalidade é uma aplicação importante e eficiente para o gerenciamento dos dados, mas também é um desafio decidir um número apropriado de dados, exigindo extensas análises (ETTABAA & SALEM, 2018; BULANON *et al.* 2013). Uma riqueza de informações pode ser obtida por sensoriamento remoto hiperespectral, mas, ao mesmo tempo, a informação redundante aumenta relativamente motivando a busca por menos comprimentos de onda. Para os comprimentos de onda mais relevantes do conjunto de dados hiperespectrais, índices como, por exemplo, subtração, divisão e normalização de dados podem ser úteis, uma vez que melhoram as características espectrais em posições específicas através de certas transformações.

Dados hiperespectrais são basicamente de natureza multivariada. A análise multivariada conduz à redução de dados sem sacrificar informações. Segundo Arruda (2016), as técnicas de análise multivariadas são úteis no reconhecimento e na descoberta de novos padrões de dados em grandes volumes de observações, mais conhecidas como Análise de Dados Exploratória (ADE). Dentre as técnicas de agrupamento de variáveis as mais citadas estão Análise de Componentes Principais (ACP) e Análise Discriminante (AD).

A análise de componentes principais é um método multivariado que elimina a redundância da amostra de dados, transformando um grande número de variáveis correlacionadas em um número menor de variáveis não correlacionadas, chamada de componentes principais (CP) (ZHAO *et al.* 2011). A ACP foi recentemente utilizada para a detecção das doenças fúngicas (ferrugem amarela e giberela) em trigo e cevada, em diferentes estágios de crescimento (WHETTON *et al.* 2018). Lu *et al.* (2018) utilizaram ACP para avaliar

57 índices de vegetação espectral, os resultados revelaram seis CPs, selecionados para classificação e detecção de doenças foliares.

A análise discriminante é aplicável em situações nas quais a amostra total pode ser dividida em grupos baseados em uma variável dependente não métrica que caracteriza diversas classes conhecidas. Os objetivos primários da análise discriminante múltipla são entender diferenças de grupos e prever a probabilidade de que uma entidade (indivíduo ou objeto) pertencerá a uma classe ou grupo em particular com base em diversas variáveis independentes métricas (HAIR, 2009).

### **2.3 Doenças fúngicas da videira**

A vitivinicultura brasileira nasceu com a chegada dos colonizadores portugueses no século XVI, somente no século XX, principalmente no Rio Grande do Sul, se tornou viável a disseminação do cultivo de castas europeias, devido ao advento dos fungicidas sintéticos (PROTAS *et al.*, 2006). Atualmente as regiões vitivinícolas do estado do Rio Grande do Sul são as grandes produtoras dos vinhos finos no Brasil, concentrando na Serra Gaúcha a maior parte dos vinhedos e vinícolas, com condições favoráveis ao cultivo de cultivares *Vitis vinifera*. Nas regiões vitícolas do sul do Brasil, períodos de altas temperaturas e umidade são frequentes durante a estação vegetativa, e surtos de doenças fúngicas são comuns em vinhedos desprotegidos (TONIETTO *et al.*, 2012).

As doenças fúngicas têm uma alta taxa de incidência em regiões vitícolas com ou sob certas condições ambientais, das quais a alta umidade é um componente importante na epidemiologia das doenças de plantas (MAGALHÃES, 2015). Durante os últimos anos, principalmente devido aos efeitos das mudanças climáticas, observam-se o aumento de condições ambientais favoráveis, para o desenvolvimento dos patógenos causadores de doenças na videira, provocando a diminuição considerável de áreas tradicionais do cultivo. Ao mesmo tempo, o amplo uso de certos tipos de agroquímicos para controlar as doenças da videira acarreta o acúmulo de metais pesados no solo e nos lençóis freáticos, além de afetar a microflora e microfauna do solo (MUGANU & PAOLOCCI, 2013; KOMÁREK *et al.*, 2010). Geralmente, o uso intensivo de fungicidas nas videiras é atualmente motivo de preocupação pública, devido à presença de resíduos na água, nos produtos vitivinícolas utilizados para consumo humano (JACOBSON *et al.*, 2005), além dos efeitos negativos sobre a saúde do aplicador e meio ambiente.

Os resíduos de agroquímicos podem afetar negativamente o processo de vinificação, pois apresenta ação antagonista às leveduras, organismos responsáveis pelo processo fermentativo (CHAVARRIA & SANTOS, 2013). Em geral, infecções fúngicas diminuem o rendimento e a qualidade das bagas e do vinho, através da redução da vitalidade da planta ou pela infecção direta nas bagas. Segundo Sônego *et al.* (2005), as doenças fúngicas constituem-se num dos principais entraves para a produção qualitativa e quantitativa de uva onde as condições climáticas são favoráveis ao desenvolvimento das doenças, podendo comprometer até 30% do custo de produção da uva com os tratamentos fitossanitários. A taxa de incidência e importância de determinadas doenças fúngicas nas videiras varia frequentemente de ano para ano, dependendo da variedade de uvas, da região, das práticas agrícolas e das condições meteorológicas (FREIRE *et al.*, 2017; JACKSON, 2016).

Existe uma série de doenças causadas por fungos, vírus, bactérias, nematoides e fitoplasmas que prejudicam a videira; entretanto, as doenças fúngicas constituem o principal problema na maioria das regiões produtoras de uva do Brasil (NACHTIGAL & MIGLIORINI, 2009). Segundo Carvalho (2012), em sucessivas safras tem-se verificado o aumento da resistência de fungos em relação aos tratamentos químicos, o que pode determinar incremento no número de pulverizações e de princípios ativos utilizados. Em diversas regiões do Brasil, os produtores usualmente realizam pulverizações semanais (método por calendário) com a intenção de garantir a produção, mas muitas vezes, sem a real necessidade de aplicação de fungicidas (CHAVARRIA & SANTOS, 2013).

O conhecimento da biologia do patógeno e das condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento das epidemias, bem como a identificação correta do agente causal da doença, auxiliam no estabelecimento de um programa de controle racional de doenças, tornando os tratamentos mais eficientes e reduzindo os custos de produção e os riscos de contaminação do ambiente (GARRIDO & SÔNEGO, 2004).

*Plasmopara vitícola* (Berk & Curt) Berl & de Toni, agente causal do míldio da videira é considerada o patógeno mais importante da videira no Brasil, principalmente nas regiões com alta umidade relativa. Ataca todas as regiões vegetativas da planta e se não controlada adequadamente acarreta perdas que podem chegar a 100%. *Uncinula necator* (Schw.) Burr. é causador do oídio da videira, doença importante em anos de “La Niña”, períodos de veranicos, ou regiões com estação seca durante o ano. Afeta folhas, ramos e bagas. *Dactylonectria macrodidyma* (Halleen, Schroers & Crous) P. Chaverri & C. Salgado ocasiona o pé-preto da videira, infecta as raízes e coloniza os vasos condutores culminando no declínio e morte da planta. *Phaeoacremonium* sp. W. Gams, Crous et M. J. Wingf é um dos patógenos responsáveis

pela doença de Petri da videira. Infecta os vasos condutores e também está envolvida no declínio e morte de plantas.

Considerando as perdas ecológicas, os limites impostos do uso de fungicidas para o consumo da uva *in natura* ou processada e a grande pressão do mercado consumidor por vinhos de qualidade, sem resíduos de agroquímicos, que possam expressar as características do seu *terroir*, pesquisadores e produtores de todas as regiões vitícolas do mundo têm buscado alternativas para o controle dos principais agentes patogênicos da videira (MUGANU & PAOLOCCI, 2013). Diversos métodos foram desenvolvidos para detectar doenças de plantas, que são baseadas em análises morfológicas das estruturas reprodutivas e análises utilizando marcadores moleculares (SANKARAN *et al.*, 2010).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Produção do inóculo

Isolados de *Dactylonectria macrodidyma* (Pé-preto), *Phaeoacremonium* sp. (Doença de Petri), da coleção de fungos filamentosos do Laboratório de Fitopatologia da Embrapa Uva e Vinho (SisGen n° A99F2F2) foram repicados para meio de cultura BDA (batata-dextrose-ágar), incubadas à temperatura 24 °C e fotoperíodo de 12 horas, por 20 dias. A seguir, as colônias foram raspadas e os esporos coletados. A suspensão de inóculo foi calibrada para 10<sup>6</sup> esporos/ml utilizando um hemocitômetro. A inoculação de *D. macrodidyma* e *Phaeoacremonium* sp. foi realizada pela imersão das raízes cortadas das plantas na suspensão de inóculo, durante 15 minutos. As plantas testemunhas também tiveram as raízes cortadas, porém permaneceram imersas em água destilado-esterilizada. 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 ferimentos nas raízes. As plantas foram plantadas e incubadas durante 13 dias, quando foram avaliadas espectralmente.

O inóculo de *P. viticola* (Míldio) foi obtido coletando-se folhas infectadas com o patógeno em um vinhedo Cabernet Sauvignon, da vinícola Miolo. As folhas foram mantidas em câmara úmida por 48 horas. Após este período as mesmas foram lavadas em um becker para a coleta dos esporângios. A suspensão do inóculo foi ajustada para 10<sup>5</sup> esporângios/ml. Para a inoculação da *P. viticola*, dez plantas da cultivar Cabernet Sauvignon foram pulverizadas com a suspensão de inóculo sobre as folhas. A seguir as plantas inoculadas e as testemunhas, composta por dez plantas, uma em cada vaso, foram incubadas a 24 °C e umidade relativa acima de 92%, fotoperíodo de 12 horas durante oito dias, quando foram então retiradas da câmara de incubação e mantidas na bancada da casa-de-vegetação até a avaliação espectral.

Já o inóculo de *U. necator* (Oídio) ocorreu naturalmente sobre as folhas das plantas de Cabernet Sauvignon mantidas na casa-de-vegetação, devido ao ambiente de baixa umidade relativa. As plantas testemunhas desse último ensaio foram pulverizadas com fungicida do grupo triazol, para evitar a infecção das folhas pelo patógeno. As plantas apresentando sintomas de oídio foram mantidas sobre a bancada da casa de vegetação até a avaliação.

O delineamento experimental foi de blocos casualizados com 10 repetições. Onde os tratamentos foram: a) plantas inoculadas com *P. viticola*; b) plantas inoculadas com *U. necator*; c) testemunha sem inoculação de *P. viticola*; d) testemunha sem infecção por *U. necator*; e) plantas inoculadas com *D. macrodidyma*; f) plantas infectadas com *Phaeoacremonium* sp.; e g)

testemunhas para patógenos radiculares. Um total de setenta plantas estavam disponíveis para medições.

Os procedimentos descritos acima foram realizados para uma primeira análise realizada em 2017. Isso foi repetido com novas plantas para uma segunda análise em 2018, com a diferença de que para o míldio tínhamos apenas cinco plantas como testemunhas.

### 3.2 Procedimentos observacionais

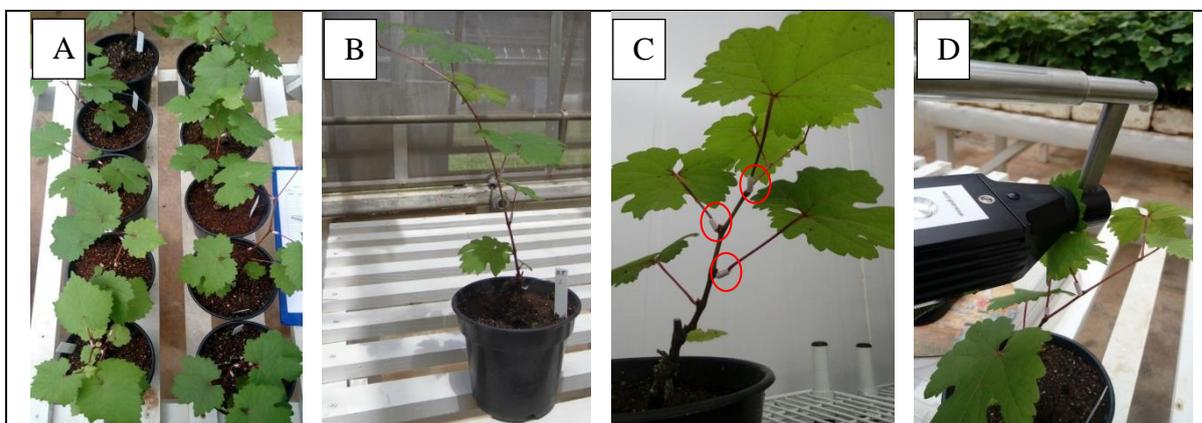
Na avaliação espectral das plantas utilizou-se o espectrorradiômetro Field Spec® 3 ASD – (sigla em inglês de *Analytical Spectral Devices*), cedido pelo Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto e Meteorologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o equipamento opera entre os comprimentos de onda 350 a 2500 nm em faixas de três a cinco angstroms (ASD, 2012). As medidas foram feitas com o acessório *ProbeLeaf Clip*, que torna o equipamento um sensor ativo, pois emite luz própria que incide diretamente na folha eliminando qualquer interferência do ambiente (**Figura 1**). A calibração foi realizada por meio de placa interna do tipo *Spectralon*®.



**Figura 1.** Avaliação espectral com o espectrorradiômetro Field Spec® 3 ASD em folhas de videiras utilizando o acessório *ProbeLeaf Clip*.

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 forma de calibração, primeiramente realizou-se a otimização do sensor e coletada a referência branca, monitorando a possível presença de ruídos ao longo do espectro, depois a cada três plantas (vasos) tornou-se a otimizar o sensor e coletar a referência branca; foram efetuadas as medidas de reflectância *in vivo*, inicialmente no lote de plantas testemunhas e posterior no lote de plantas com a doença em desenvolvimento. As medidas das plantas de oídio e suas testemunhas foram realizadas em duas fases, quando a doença estava em estágio inicial (Oídio I.) e seis dias depois quando a doença estava em estágio avançado (Oídio F.), as demais doenças foram avaliadas espectralmente no desenvolvimento inicial das doenças. Na **Figura 2** é apresentada uma ilustração da aquisição dos dados espectrais.



**Figura 2.** Ilustração dos experimentos onde cada lote de plantas foi formado por dez vasos devidamente identificados por número e código de doença (A), em cada vaso houve o enraizamento de uma planta (B), foram efetuadas as leituras de três folhas localizadas preferencialmente na parte central da planta e previamente marcadas (C), em cada folha efetuaram-se quatro leituras adquiridas sempre na face adaxial evitando o sistema vascular (D).

Para as medidas com o clorofilômetro o procedimento adotado foi semelhante. Para cada planta foi tomada uma medida de clorofila nas mesmas folhas marcadas para a coleta dos dados espectrais. O teor relativo de clorofila foi obtido no míldio, pé-preto e doença de Petri, usando um clorofilômetro modelo SPAD-502 marca Minolta (**Figura 3**), disponibilizado pelo Departamento de Plantas de Lavoura da Faculdade de Agronomia/UFRGS; este equipamento calcula os valores referentes ao teor de clorofila total da folha, é um aparelho portátil que mede, a transmitância de luz através da folha, no comprimento de onda com pico em 650 nm, região de alta absorbância pelas moléculas de clorofila, e com pico em 940 nm, na qual a absorbância pela folha é baixa (MINOLTA, 1989).

O teor relativo de clorofila para o oídio, foi adquirido usando o clorofilômetro modelo clorofiLOG CFL1030 da marca Falker, disponibilizado pelo Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da Embrapa Uva e Vinho, que gera os valores referente a clorofila A e clorofila B. São utilizados fotodiodos emissores em três comprimentos de onda: dois emitem dentro da banda do vermelho, próximos aos picos de cada tipo de clorofila 635 e 660 nm e um outro no infravermelho próximo 880 nm (FALKER, 2008).

Os clorofilômetros são sensores ativos que propiciam a medição rápida e fácil sem causar danos as folhas. Necessitam de calibração sempre que forem ligados, realizada com o fechamento da cabeça de medição por alguns instantes até o equipamento emitir um aviso sonoro de que está calibrado; as medições são realizadas da mesma forma com o fechamento da cabeça de medição sobre a folha, a visualização do valor referente ao teor de clorofila é instantâneo, mostrado no visor.



**Figura 3.** Obtenção do valor relativo de clorofila em folha de videira utilizando o clorofilômetro modelo SPAD-502.

### 3.3 Redução de dados espectrais

O banco de dados contém em cada linha uma medida, estas são radiométricas (2.150 valores de reflectância), para a manipulação desses dados a preparação de espectros para análise estatística e espectral passou por alguns estágios preliminares. A região espectral do ultravioleta, de 350 a 400 nm não foi utilizada nas análises em função dos ruídos verificados.

Para cada folha, uma média dos quatro espectros foi calculada, e para cada planta foi produzida uma média para as três folhas. Todos os espectros foram normalizados. Esta operação foi realizada para garantir que todos os espectros tenham a mesma área, fazendo assim

operações entre diferentes espectros diretos. Dado  $R_\lambda$  como a reflectância no comprimento de onda  $\lambda$ , e  $\Sigma$  sendo a área ou integral de um espectro, um espectro normalizado terá para cada  $\lambda$  um novo valor  $R_\lambda$ , através da operação dada na Eq. 1:

$$R_\lambda = \frac{R_\lambda}{\sum_{n=1}^n R_{400} + R_{401} + \dots + R_{2050}} \quad (1)$$

Esta operação foi realizada para garantir que todos os espectros tivessem a mesma área, simplificando as operações entre diferentes espectros. Deve-se notar que a normalização, apresentada na Eq.1, não altera a forma de um espectro, transformando apenas a sua escala. Portanto, essa operação modifica somente a escala vertical. O banco de dados final tinha 90 e 65 espectros de plantas na casa-de-vegetação na primeira coleta em 2017 e na segunda coleta em 2018, respectivamente.

### 3.4 Detecção de alterações espectrais

A alteração espectral nas plantas, e no caso, as videiras, podem ser sutis e métodos apropriados para detectar essas alterações devem ser utilizados. A sutileza de alterações espectrais por doenças em vegetação, e a consequente dificuldade para a sua detecção, tem sido relatado, por exemplo, por Ettabaa & Salem (2018) e Delalieux *et al.* (2007). No entanto, a detecção de tais características sutis é possível quando os espectros analisados têm uma alta relação sinal-ruído (SNR, sigla em inglês de *Signal-to-Noise Ratio*). É possível estimar a qualidade das aquisições de reflectância através de uma avaliação do SNR; O resultado foi que os valores típicos de SNR foram 5900 em  $\lambda = 850$  nm e 7500 em  $\lambda = 1800$  nm, indicando medições de alta qualidade (SCHROEDER, 1999). Essa percepção permitiu realizar operações envolvendo espectros de folhas de testemunhas e folhas sintomáticas, dada pela razão entre os espectros.

A razão entre os espectros é o resultado da divisão do valor de reflectância de uma planta sadia pelo valor de reflectância de uma planta sintomática. Dado que as alterações espectrais, são sutis, o quociente resultante tende a exibir valores quase iguais em todo o domínio de espectral. No entanto, se existem diferenças presentes nas razões de espectro derivadas de diferentes pares de espectros, os comprimentos de onda em que estas diferenças persistem, são regiões dos espectros de videira onde os efeitos metabólicos de uma doença em uma planta

levam a alterações. Foi aplicado o desvio padrão nos resultados dos quocientes reflectâncias para evidenciar os comprimentos de onda em que há alterações.

### **3.5 Análise Discriminante**

Com os comprimentos de onda selecionados, realizou-se a análise discriminante canônica no programa estatístico SPSS pelo método *Stepwise*, para os grupos de plantas com doenças e também para os grupos de plantas de doenças junto com suas testemunhas. Como os grupos de testemunhas foram desenvolvidos associados à suas respectivas doenças, é possível que fisiologicamente e espectralmente os grupos de testemunhas tenham relações entre si, por esse motivo uma das análises foi realizada sem o conjunto de testemunhas. A partir dessa análise, maiores precisões foram obtidas.

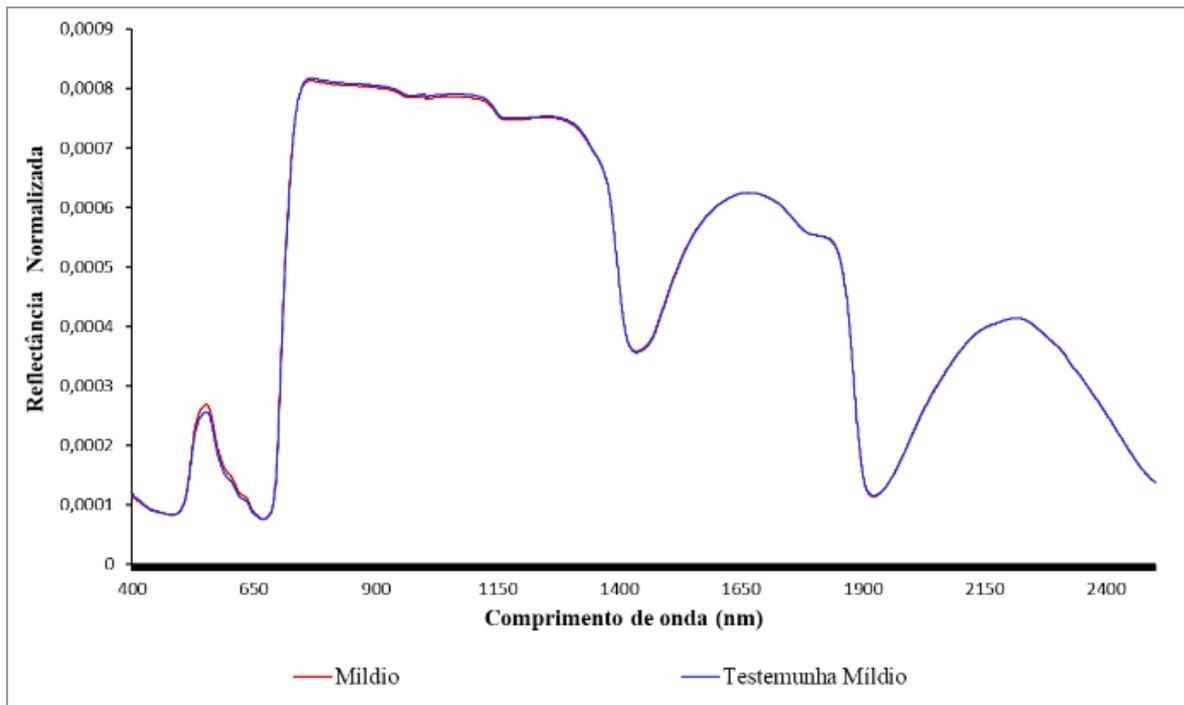
### **3.6 Derivação de limiares de plantas doentes**

A partir das etapas metodológicas anteriormente descritas, surgiu a percepção de que as doenças estudadas apresentam alterações espectrais nos comprimentos de onda característicos, mas com intensidades variadas, uma vez que cada patógeno se comporta de maneira característica a cada comprimento de onda. A forma do espectro de uma planta sintomática é tipicamente alterada, sendo possível procurar relações entre os valores de reflectância nesses comprimentos de onda como descritores de uma doença específica. Um conjunto de oito comprimentos de onda selecionados, a partir da análise da razão espectral foi utilizado nesta etapa, na qual procurou-se o impacto espectral relativo de cada doença, expresso pela razão entre reflectâncias nesses oito comprimentos de onda, tomadas dois a dois. Isso resultou em 28 possíveis razões.

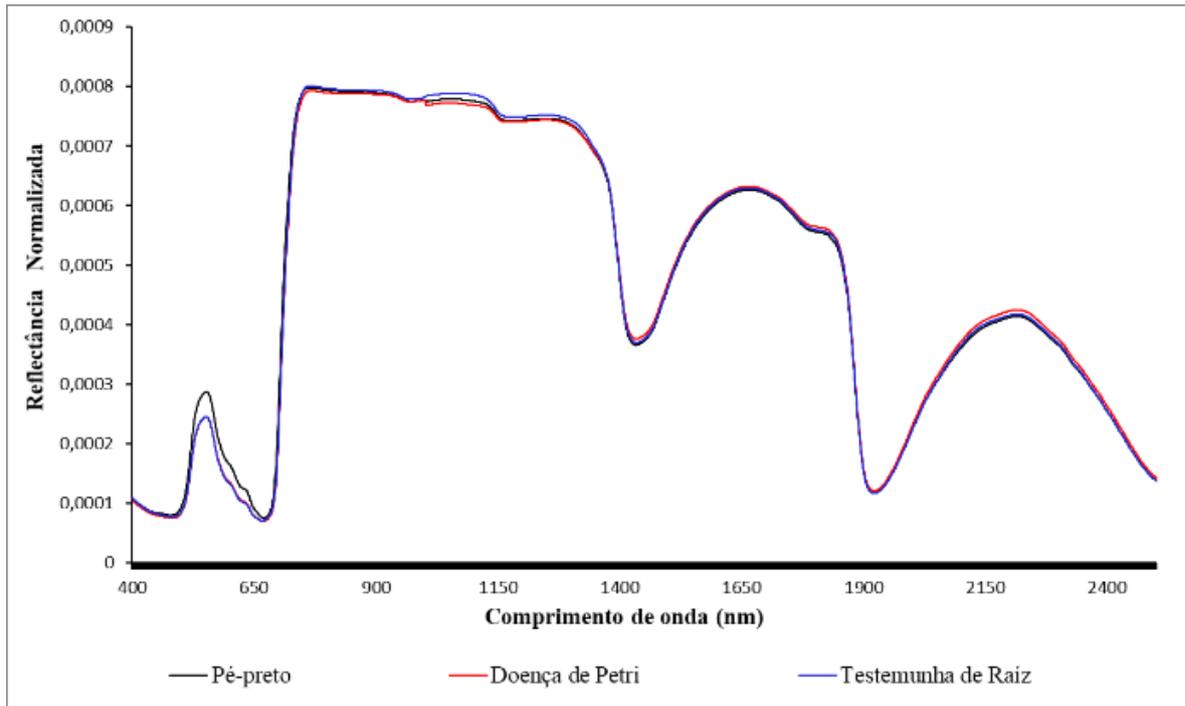
Como método analítico, e considerando que havia para cada doença, dez plantas individuais, projetamos curvas gaussianas de 50 pontos expressando a distribuição das razões de reflectância, para os comprimentos de onda considerados. Para cada uma dessas 28 proporções, foi plotado as curvas para cada doença, procurando os casos com melhor separação entre as doenças. Selecionando um conjunto de oito proporções, onde as doenças são separadas por valores limiares, característicos de cada doença.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

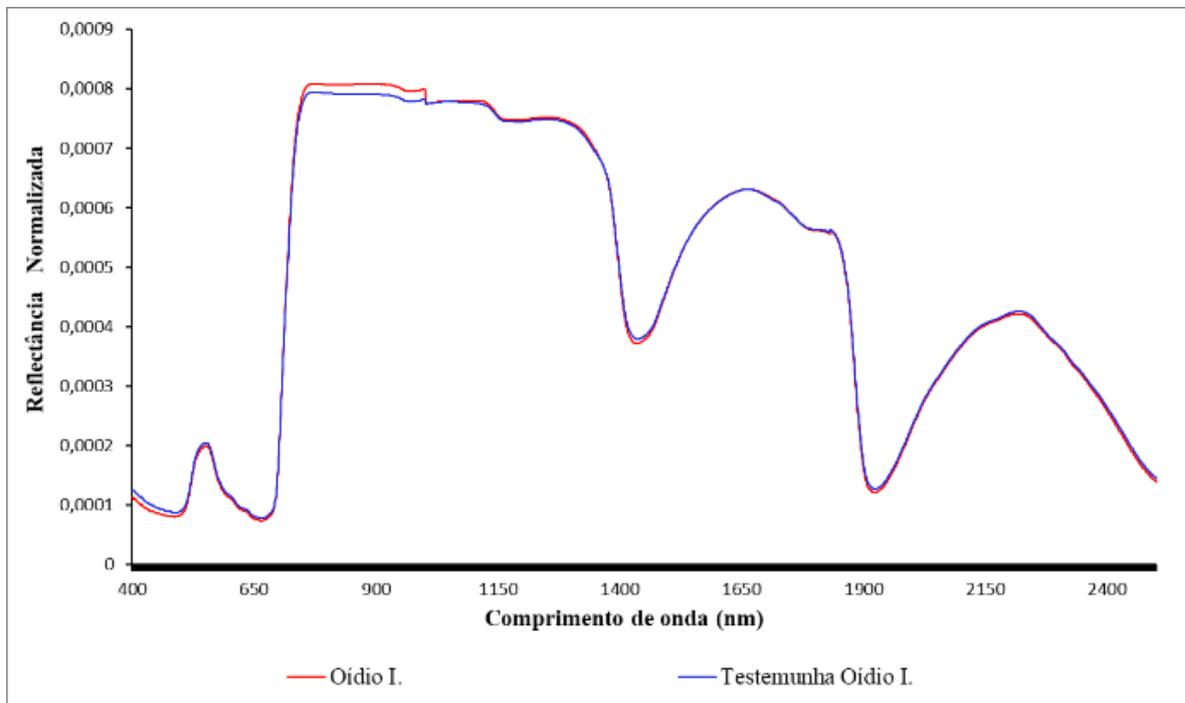
Recorrendo as médias aritméticas dos dados radiométricos, foram gerados os gráficos das curvas espectrais de reflectância das doenças analisadas. Com a breve análise visual das curvas é possível perceber diferenças, ainda que sutis, entre cada doença e testemunhas (**Figura 4, Figura 5, Figura 6 e Figura 7**). Observam-se as curvas espectrais das doenças e suas respectivas testemunhas, referente aos dados da primeira coleta, a região de 400 - 700 nm representa a região em que os pigmentos definem a forma da curva variando com a presença do aumento ou redução da clorofila (BALTZER & THOMAS, 2005), as folhas infectadas pelos fungos nessa região exibiram maior reflectância do que as suas testemunhas, exceto para a doença de Petri, que apresentou uma curva de mesma intensidade que sua testemunha.



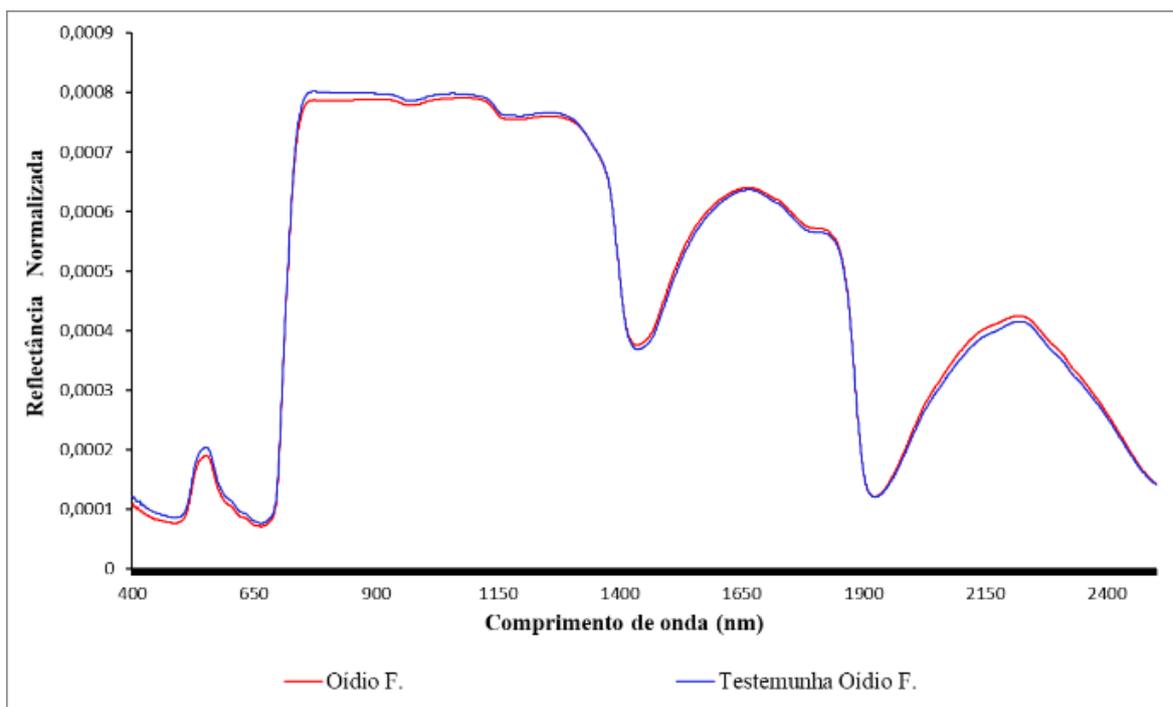
**Figura 4.** Gráficos de reflectância de espectros médios normalizados (eixo y) da doença míldio e sua respectiva testemunha.



**Figura 5.** Gráficos de reflectância de espectros médios normalizados (eixo y) das doenças pé-preto e doença de Petri e a respectiva testemunha em função dos comprimentos de onda (eixo x).

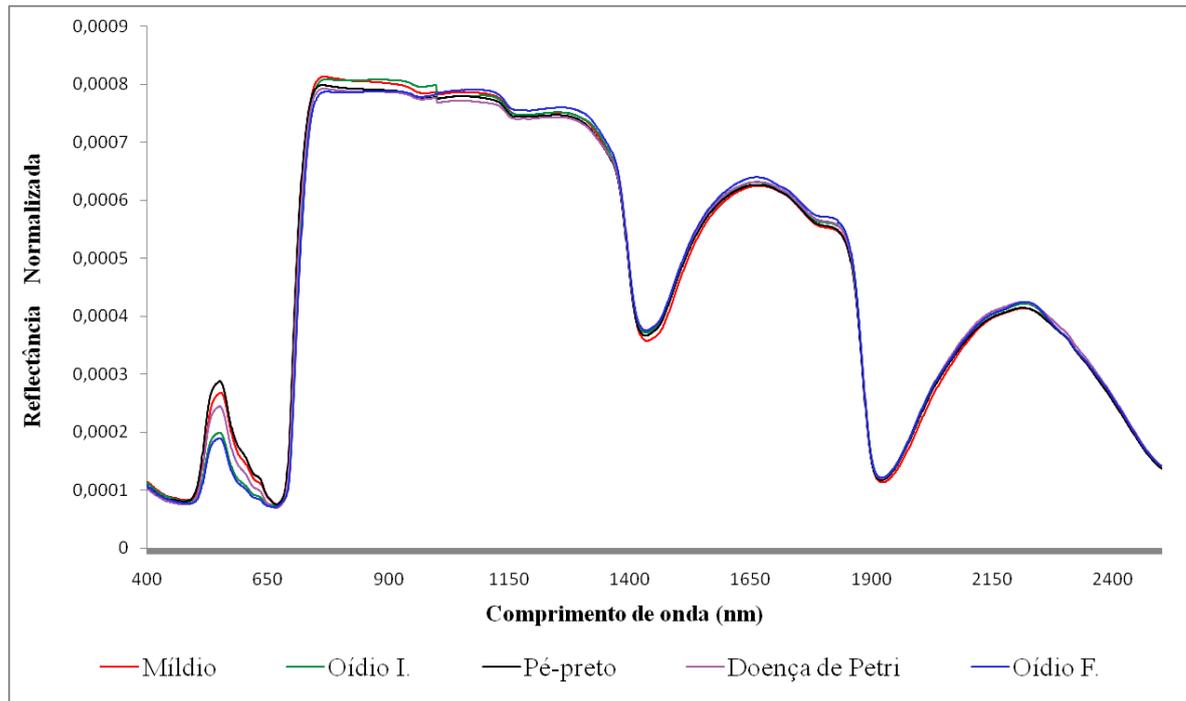


**Figura 6.** Gráficos de reflectância de espectros médios normalizados (eixo y) da doença oídio I. (estágio inicial) e sua respectiva testemunha em função dos comprimentos de onda (eixo x).



**Figura 7.** Gráficos de reflectância de espectros médios normalizados (eixo y) da doença oídio F. (estágio final) e sua respectiva testemunha em função dos comprimentos de onda (eixo x).

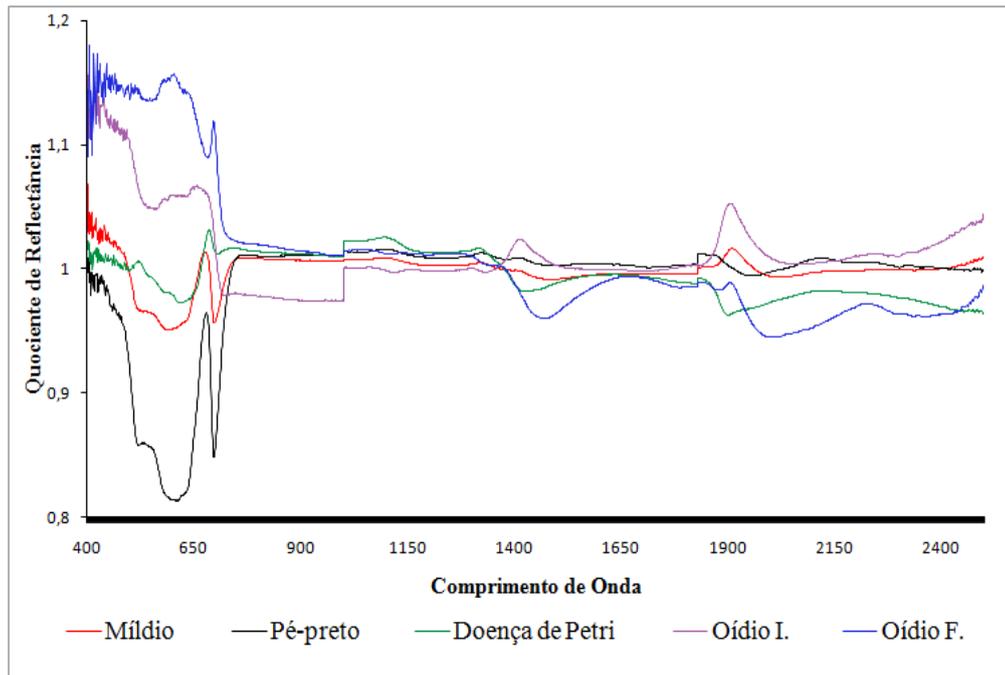
As doenças oídio e míldio são causadas por patógenos biotróficos, que durante a fase de infecção, anterior ao aparecimento das “manchas de óleo”, não apresentam sintomas cloróticos nem redução da clorofila. Na região do visível, oídio apresentou a menor reflectância entre as demais curvas espectrais, tanto Oídio I., quanto Oídio F. Na região do infravermelho próximo, região influenciada pela estrutura celular da planta (SLATON *et al.*, 2001) a partir de 750 nm, o oídio em estágio de infecção inicial tem maior reflectância do que na segunda coleta com oídio em estágio de infecção avançado, porém, a partir de 1000 nm 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, região influenciada pelo teor de água nos tecidos das plantas (MOREIRA, 2014; NOVO, 2010) (**Figura 8**). Blazquez & Edwards (1986) observaram que a reflectância de folhas de melancia, com sintomas de murcha de Fusarium, míldio e o virose do mosaico, era maior nos estádios iniciais das doenças, do que nos estádios avançados, em todos os comprimentos de onda. Por outro lado, Kurschner *et al.* (1984) estudando a resposta espectral do oídio em quatro espécies (pepino, alface, trevo vermelho e carvalho) encontraram que a reflectância aumentou com a presença de doença. Da mesma forma, estudos conduzidos com o oídio da cevada (*Erysiphe graminis* f.sp. *hordei*) mostraram que mudanças na reflectância ocorreram mais cedo na porção do espectro (400 – 700 nm) do que na região do infravermelho próximo (700 – 1100 nm) (LORENZEN & JENSEN, 1989).



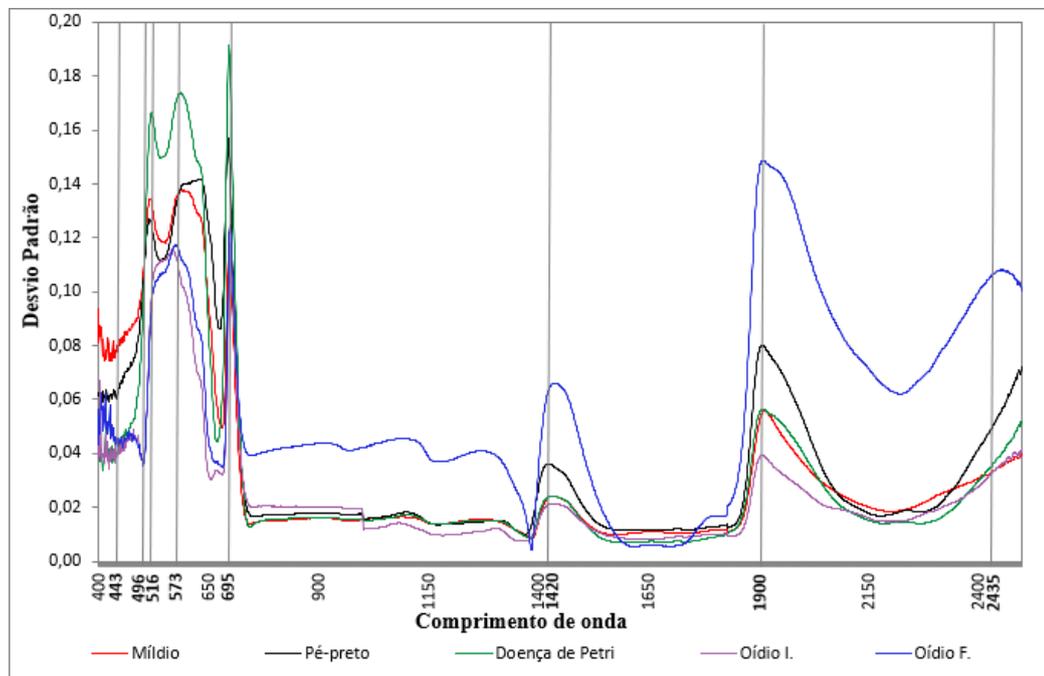
**Figura 8.** Gráfico de reflectância de espectros médios normalizados (eixo y) das doenças míldio, pé-preto, doença de Petri, oídio I. (estágio inicial) e oídio F. (estágio final) em função dos comprimentos de onda (eixo x).

Míldio na região do infravermelho próximo apresenta o maior valor de reflectância entre as doenças começando a reduzir em 850 nm, apresentando maior absorção na região do infravermelho médio (1400 – 1900 nm). O agente causal tem como efeito a redução da assimilação de  $\text{CO}_2$  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 (MAREK, 2016). 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 observada na doença pé-preto.

A partir do espectro-razão foram percebidas as variações 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, são apresentadas na forma de quociente de reflectância na **Figura 9**. Aplicando o desvio padrão nos valores obtidos com os quocientes as variações espectrais ficam evidentes em determinados comprimentos de onda (**Figura 10**).



**Figura 9.** Espectro-razão obtido a partir do quociente de reflectâncias entre plantas sintomáticas e suas testemunhas, apresentando as regiões espectrais em que as doenças míldio, pé-preto, doença de Petri e oídio apresentam diferenças em relação a suas plantas saudáveis.



**Figura 10.** Desvio padrão derivado dos quocientes reflectâncias entre plantas sintomáticas e suas testemunhas, apresentando os comprimentos de onda 443, 496, 516, 573, 695, 1420, 1900 e 2435 nm destacados.

Na **Figura 9** e **Figura 10** -foram observados que certos comprimentos de onda são indicadores dos efeitos da doença. Os comprimentos de onda escolhidos a partir da metodologia proposta apresentaram bons resultados na classificação, separando os tipos de doenças. Os quocientes entre espectros de reflectâncias 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 695 nm que são comprimentos semelhantes aos encontrados por Graeff *et al.* (2006) na detecção de oídio em trigo. Na região do infravermelho médio, os comprimentos de onda 1420, 1900 e 2435 nm em que a maior diferenciação espectral foi 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. Todas as doenças apresentam alterações espectrais nesses comprimentos de onda, mas com intensidades variadas, pois cada patógeno se comporta de maneira característica a cada comprimento de onda (MUTANGA *et al.*, 2017).

Na **Tabela 1** apresentamos o resultado da análise discriminante para os cinco grupos sintomáticos, com uma precisão geral de 94,3%. Alguma confusão apareceu entre as doenças que afetam as raízes. Na **Tabela 2**, apresentamos os resultados da análise envolvendo todos os oito grupos, com uma precisão de 85,7%. A partir destas informações, vemos que os grupos de testemunhas não apenas estão separados, mas também revelam uma associação com seus respectivos grupos sintomáticos, apresentando 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. Resultados similares foram obtidos por Knauer *et al.* (2017) utilizando a análise de discriminante linear, para dados de reflectância de cachos de uvas, cv. Chardonnay, infectadas ou não com oídio. Foi obtida uma acuracidade de 87% na classificação dos cachos infectados, sadios e severamente doentes.

**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 (excluídas as testemunhas).

Doenças	D. de Petri	Míldio	Oídio I.	Oídio F.	Pé-preto	$\Sigma$
D. 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

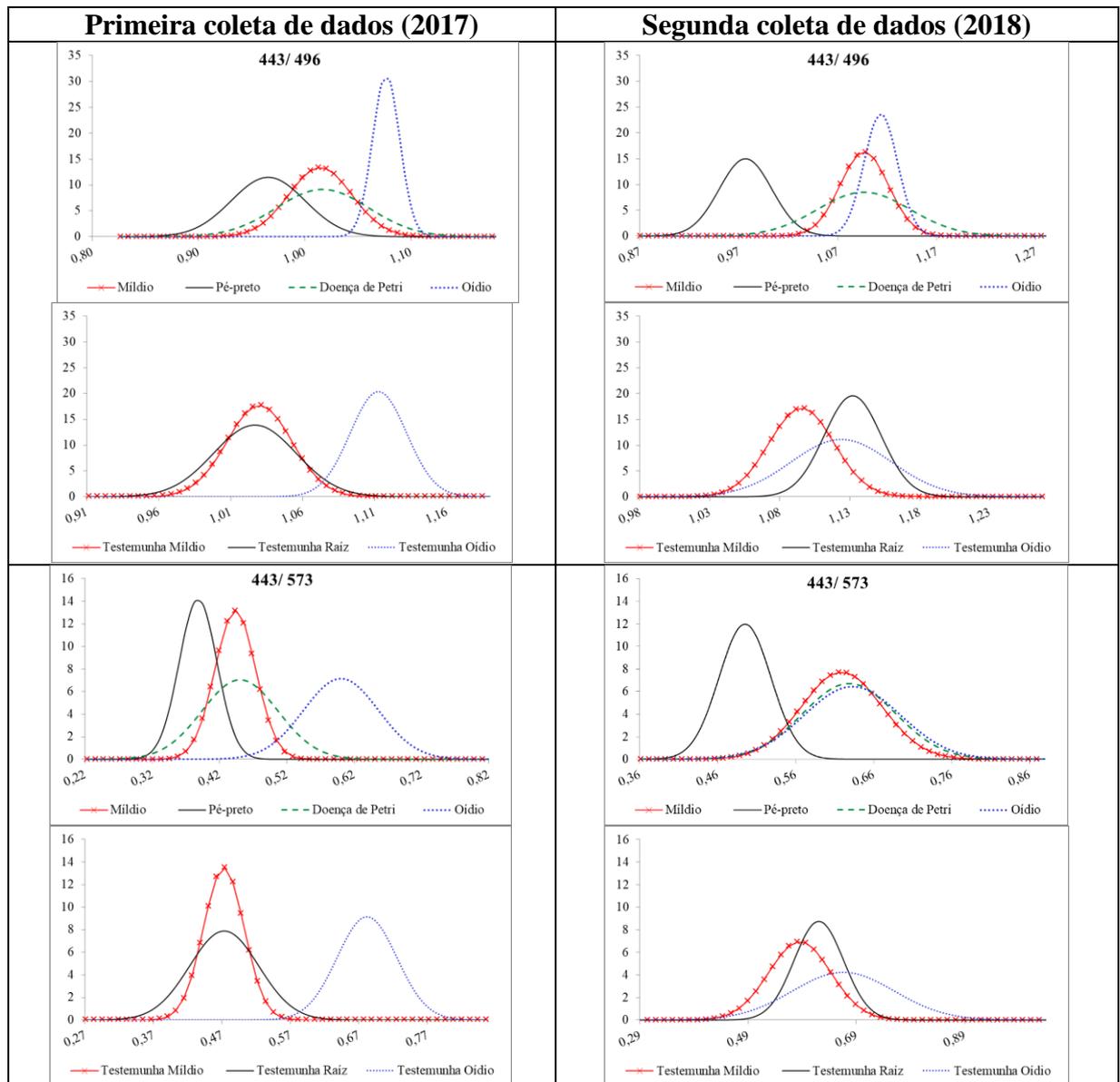
**Tabela 2.** Matriz de confusão (%) resultante da classificação dos valores de reflectância foliar a partir dos comprimentos de onda selecionados para separação entre as doenças fúngicas analisadas incluindo suas testemunhas (T.).

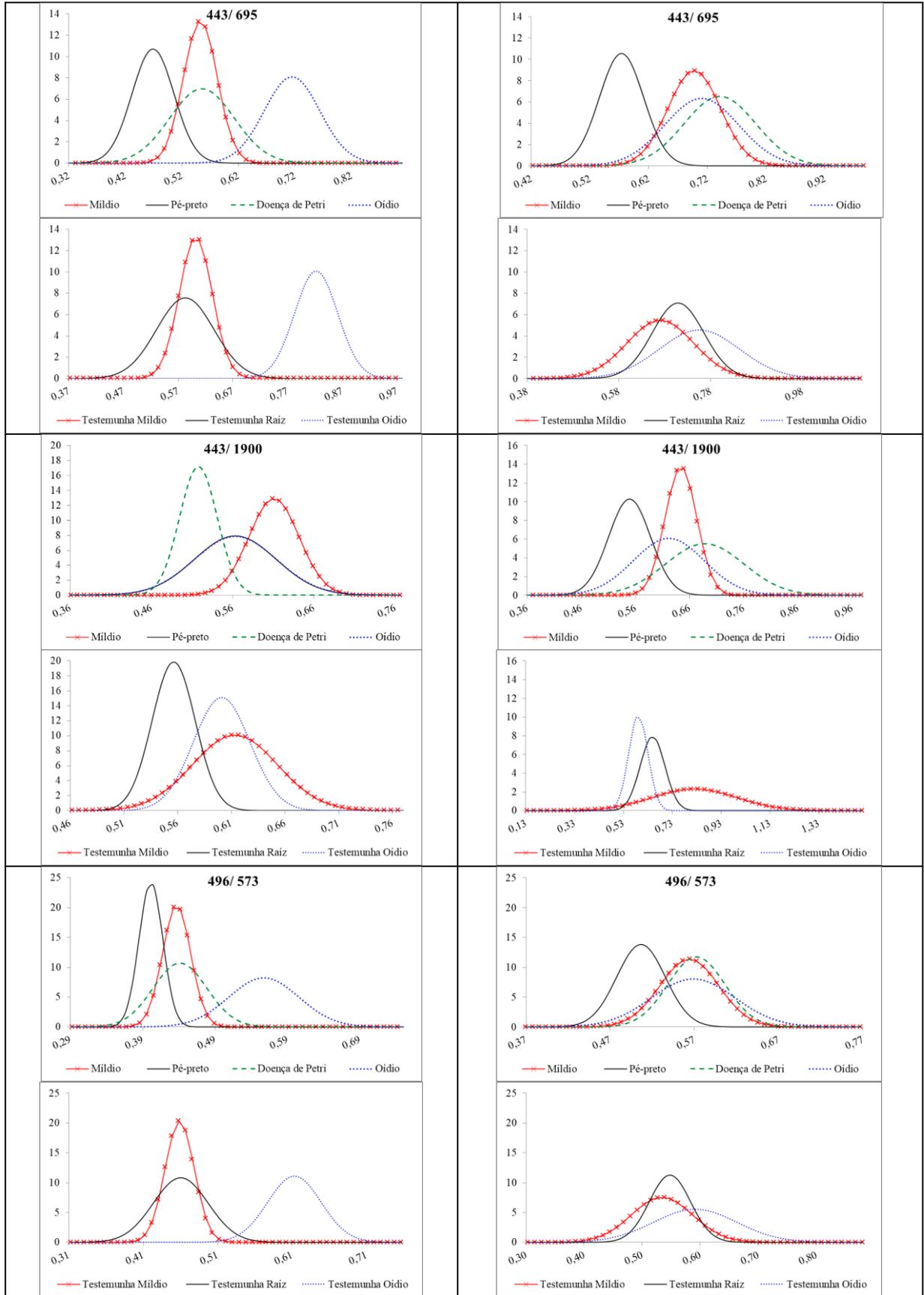
Doenças	Míldio	T. Míldio	Pé-preto	D. de Petri	T. Raíz	Oídio I.	T. Oídio I.	Oídio F.	T. Oídio F.	$\Sigma$
Míldio	85,7	0	0	14,3	0	0	0	0	0	100
T. Míldio	14,3	85,7	0	0	0	0	0	0	0	100
Pé-preto	0	0	71,4	14,3	14,3	0	0	0	0	100
D. de Petri	0	0	0	100,0	0	0	0	0	0	100
T. Raíz	0	0	0	0	85,7	14,3	0	0	0	100
Oídio I.	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

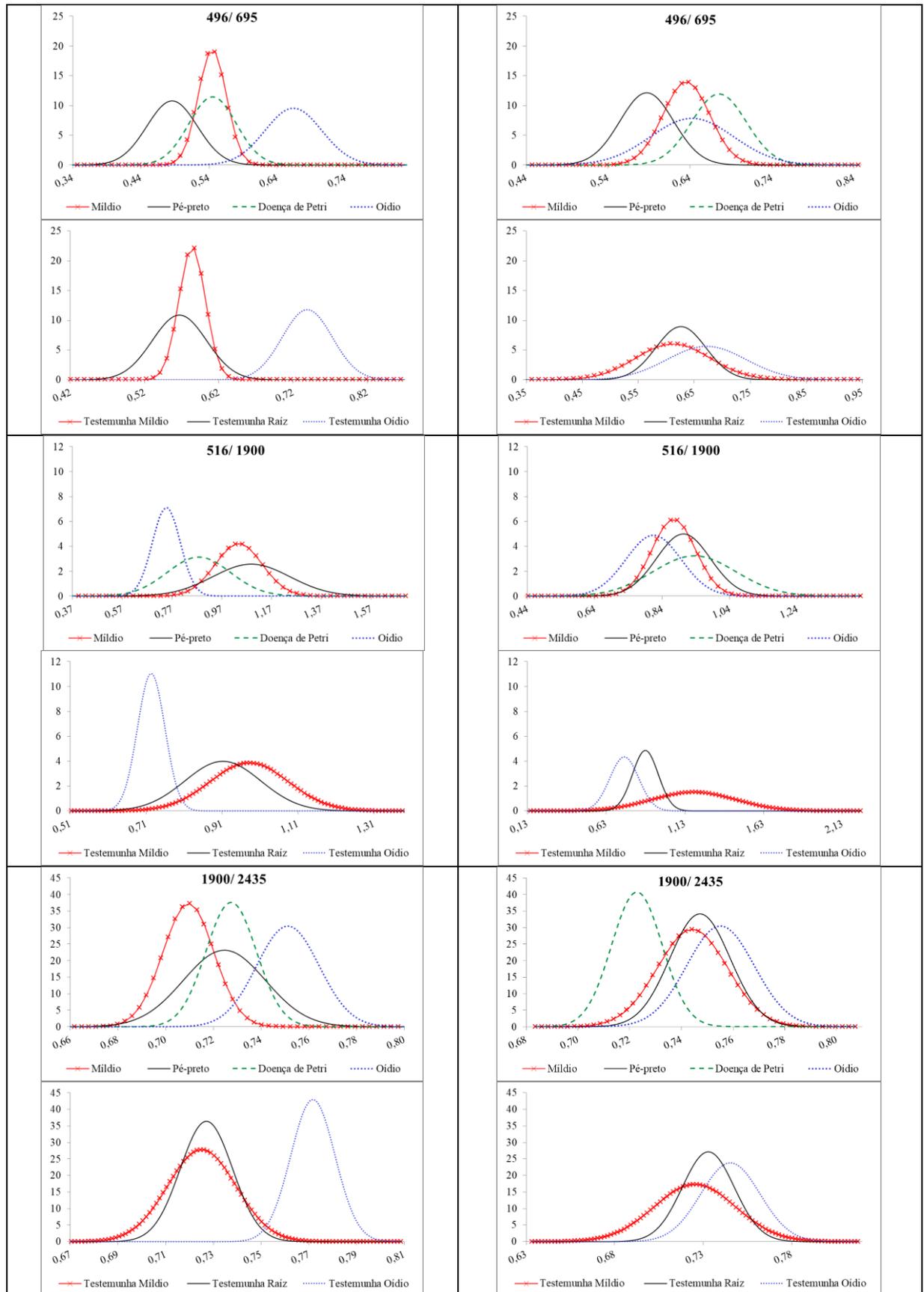
Dadas duas ou mais doenças, as alterações metabólicas induzidas na planta por cada doença são características, o que leva a alterações espectrais que possuem magnitudes típicas de cada doença. A percepção é que um espectro de uma planta infectada e ou sintomática, com relação a um espectro de uma planta testemunha, apresenta não somente alterações espectrais

em determinados comprimentos de onda, mas também as magnitudes dessas alterações são características de cada doença.

As relações entre a refletância que foram marcadores da ação de um certo patógeno mostraram melhores desempenhos para as relações entre os comprimentos de onda 443/496, 443/573, 443/695, 443/1900, 496/573, 496/695, 516/1900 e 1900/2435 nm, apresentando uma melhor separação entre as doenças, mesmo que em certas relações de comprimento de onda haja uma sobreposição das curvas de duas doenças. Para visualizar como essas proporções são distribuídas, as curvas gaussianas para as doenças estudadas apresentam as diferenciações espectrais (**Figura 11**).







**Figura 11.** Curvas gaussianas projetadas, expressando a distribuição das razões de reflectância para as oito razões (443/496, 443/573, 443/695, 443/1900, 496/573, 496/695, 516/1900 e

1900/2435 nm) que apresentaram melhor desempenho entre as demais, possibilitando observar como cada doença apresenta sua alteração espectral característica.

A **Tabela 3** apresenta os valores dessas proporções mostradas anteriormente em curvas gaussianas; por exemplo: para a razão 496/573 nm de medidas do pé preto, temos o valor médio de 0,40 com um desvio padrão de 0,02. Isso significa que os efeitos da doença do pé-preto na planta levam a tais alterações espectrais entre 496 e 573 nm, que fazem a proporção de reflectâncias nesses comprimentos de onda para assumir valores em torno de 0,40. As dez medidas de folhas sintomáticas (pé-preto) produziram proporções em torno desse valor. Outras doenças, para esta mesma razão (496/573 nm) podem apresentar diferentes valores de razão de reflectância.

**Tabela 3.** Valores médios e desvios padrões das razões 443/496, 443/573, 443/695, 443/1900, 496/573, 496/695, 516/1900 e 1900/2435 nm, que apresentam as proporções de reflectância para as doenças míldio, pé-preto, doença de Petri e oídio.

	Míldio		Pé-preto		D. de Petri		Oídio	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
443/496	1,01	0,03	0,97	0,03	1,02	0,04	1,08	0,01
443/573	0,44	0,03	0,39	0,03	0,45	0,06	0,60	0,06
443/695	0,55	0,03	0,47	0,04	0,56	0,06	0,71	0,05
443/1900	0,61	0,03	0,56	0,05	0,52	0,02	0,56	0,05
496/573	0,44	0,02	0,40	0,02	0,44	0,04	0,56	0,05
496/695	0,54	0,02	0,49	0,04	0,55	0,03	0,66	0,04
516/1900	1,04	0,09	1,09	0,16	0,88	0,13	0,75	0,06
1900/2435	0,71	0,01	0,72	0,02	0,73	0,01	0,75	0,01

A análise desses comprimentos de onda produziu a percepção que as alterações espectrais devido a diferentes doenças deixaram suas marcas em quase os mesmos comprimentos de onda: por exemplo, o míldio e o pé preto alteram um espectro normal nos mesmos locais. Neste caso, a observação de um espectro alterado pode ser útil para informar que a planta carrega uma doença, mas não informa qual doença está afetando a videira. A forma do espectro para uma determinada doença é única, e uma maneira possível de descrever essa forma é usar descritores internos a um espectro, ou seja, descritores que são proporções entre os valores de reflectância nos comprimentos de onda característicos. Desta forma, é possível obter um conjunto de limiares descritores de cada doença. Uma análise mais profunda permite desenvolver, para cada doença, um conjunto de limiares que descrevem cada doença.

As tabelas **Tabela 4** (primeira coleta de dados) e **Tabela 5** (segunda coleta de dados) indicam quais alterações espectrais, medidas a partir da reflectância direta de uma folha de

videira, são indicadores diretos das doenças estudadas. No entanto, um efeito da variação de um ano para outro, como, por exemplo, o desenvolvimento da planta e fatores ambientais como umidade, tem um impacto no metabolismo da planta e, portanto, as medidas de reflectância sofreram alteração, como pode ser visto e comparado pelas diferenças entre os dados da primeira e da segunda coleta.

**Tabela 4.** Valores mínimos e máximos de reflectância das razões 443/496, 443/573, 443/695, 443/1900, 496/573, 496/695, 516/1900 e 1900/2435 nm, para a primeira coleta de dados (2017), que são indicadores diretos das doenças míldio, pé-preto, doença de Petri e oídio em folhas de videiras.

	<b>Míldio</b>	<b>Pé-preto</b>	<b>Doença de Petri</b>	<b>Oídio</b>
443/496	0,97 - 1,06	0,90 - 1,01	0,96 - 1,08	1,06 - 1,10
443/573	0,39 - 0,47	0,33 - 0,42	0,38 - 0,56	0,54 - 0,72
443/695	0,50 - 0,60	0,40 - 0,53	0,48 - 0,66	0,65 - 0,82
443/1900	0,57 - 0,68	0,50 - 0,64	0,49 - 0,57	0,52 - 0,69
496/573	0,40 - 0,46	0,36 - 0,42	0,40 - 0,51	0,51 - 0,67
496/695	0,51 - 0,58	0,40 - 0,54	0,50 - 0,61	0,61 - 0,76
516/1900	0,93 - 1,20	0,92 - 1,37	0,71 - 1,12	0,67 - 0,83
1900/2435	0,69 - 0,73	0,71 - 0,76	0,71 - 0,74	0,73 - 0,77

**Tabela 5.** Valores mínimos e máximos de reflectância das razões 443/496, 443/573, 443/695, 443/1900, 496/573, 496/695, 516/1900 e 1900/2435 nm, para a segunda coleta de dados (2018), que são indicadores diretos das doenças míldio, pé-preto, doença de Petri e oídio em folhas de videiras.

	<b>Míldio</b>	<b>Pé-preto</b>	<b>D. de Petri</b>	<b>Oídio</b>
443/496	1,06 - 1,14	0,93 - 1,02	1,02 - 1,16	1,08 - 1,14
443/573	0,55 - 0,70	0,47 - 0,56	0,55 - 0,71	0,59 - 0,74
443/695	0,63 - 0,76	0,53 - 0,63	0,64 - 0,84	0,61 - 0,83
443/1900	0,59 - 0,69	0,49 - 0,59	0,59 - 0,85	0,54 - 0,75
496/573	0,51 - 0,62	0,46 - 0,55	0,51 - 0,61	0,48 - 0,66
496/695	0,59 - 0,68	0,54 - 0,64	0,61 - 0,72	0,57 - 0,74
516/1900	0,77 - 0,99	0,79 - 1,05	0,84 - 1,25	0,69 - 0,97
1900/2435	0,72 - 0,77	0,73 - 0,76	0,71 - 0,73	0,73 - 0,77

A **Tabela 4 e 5** apresentam para cada relação entre comprimentos de onda, o valor mínimo e o valor máximo de reflectância que foi obtido do conjunto de dados, das dez plantas analisadas para cada doença. Na **Tabela 4** para a relação 443/496 nm o valor de reflectância obtido para míldio, no conjunto de dados (dez plantas da primeira coleta) foi de no mínimo 0,97 e no máximo 1,06. Na **Tabela 5** para a mesma relação de comprimentos de onda e mesma doença o valor mínimo obtido no conjunto de dados foi de 1,06 e o valor máximo 1,14.

Analisando os dados, do primeiro e segundo ano de observações, notou-se que existe certa relação entre as plantas testemunhas e o lote correspondente de videiras sintomáticas. Isso decorre do fato de que um grupo, envolvendo uma determinada doença, teve seu início de infecção a partir das mesmas condições e para outro grupo, envolvendo outra doença, as condições iniciais foram diferentes. E é especialmente verdadeiro quando analisados os dados de duas estações diferentes, que neste estudo são análises realizadas em diferentes anos. A solução foi que não apenas temos que considerar os descritores internos de uma planta sintomática para obter um diagnóstico, mas também, uma medida de calibração de uma planta saudável deve ser associada. Com as diferenças de medidas de uma coleta para outra foi necessário incorporar nas medidas os dados das plantas testemunhas para cada estação como um dado de calibração **Tabela 6**.

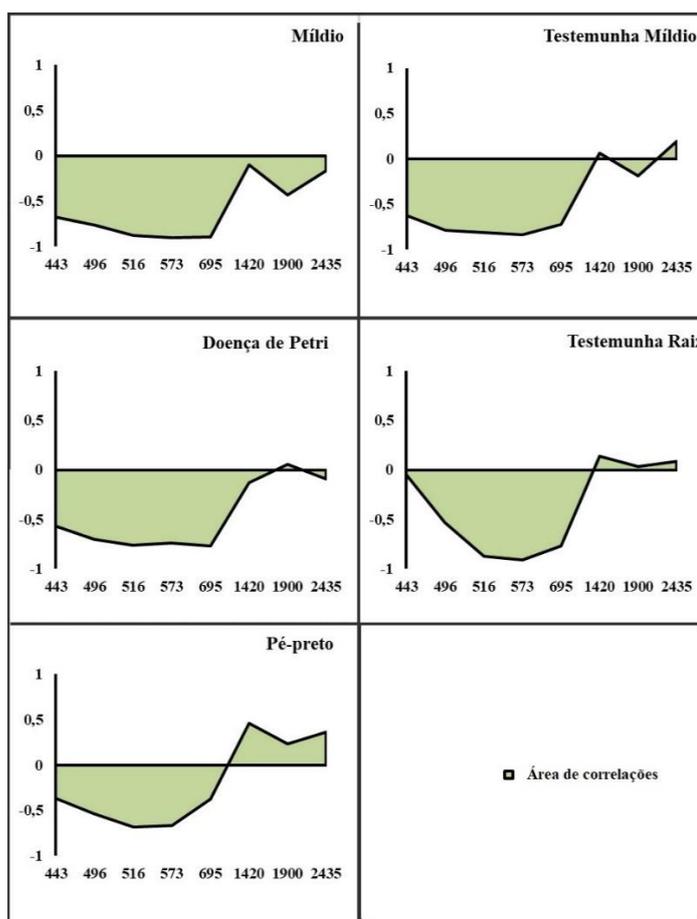
**Tabela 6.** Valores dos limiares para as doenças míldio, pé-preto, doença de Petri e oídio, derivadas da primeira e segunda coleta de dados (2017 e 2018), calibrados pelas medidas de suas respectivas testemunhas.

	<b>Míldio</b>		<b>Pé-preto</b>		<b>D. de Petri</b>		<b>Oídio</b>	
	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
443/496	0,98	1,00	0,94	0,86	0,99	0,96	1,05	0,99
443/573	0,94	1,06	0,83	0,81	0,97	1,01	0,92	0,97
443/695	0,92	1,04	0,83	0,82	0,98	1,05	0,91	0,96
443/1900	1,00	0,86	1,02	0,93	0,94	1,20	0,95	1,16
496/573	0,95	1,05	0,88	0,92	0,97	1,04	0,95	0,96
496/695	0,94	1,04	0,88	0,96	0,99	1,08	0,94	0,98
516/1900	1,06	0,74	1,18	1,03	0,95	1,06	1,01	1,09
1900/2435	0,98	1,03	1,00	1,02	1,00	0,99	0,98	1,01

A análise da **Tabela 6** pode nos dar algumas percepções, como as variações que o espectro de uma planta sintomática é deformado em relação ao espectro de uma planta saudável. Começando com as deformações expressas pela proporção 443/496, vemos que a doença do pé-preto leva a uma deformação de cerca de 10%. Esta mesma doença também deforma o espectro para a razão 443/573, mas em maior escala (até 17%); para esta relação, observa-se também uma deformação espectral sistemática para o oídio, mas em menor escala (3 a 5%). Estas duas doenças também são observadas para a razão 443/695, em escalas de até 20% (pé preto) e 5 a 8% (oídio). Para o míldio, a razão 443/1900 poderia ser um indicador útil, uma vez que deformações espectrais de até 14% foram observadas. As proporções 496/573, 496/695 e 510/1900 são indicadores úteis de sintomas do pé preto e do oídio. A razão 1900/2435 parece ser, a partir dos dados, menos útil.

Uma análise mais aprofundada da **Tabela 6** fornece percepções adicionais. Em alguns casos, a deformação espectral é grande, mas muda de direção de uma estação para outra. Isso acontece para a doença de Petri em 443/1900 e também para o oídio na mesma proporção. O mesmo é para Petri em 496/695 e para o míldio em 516/1900. A metodologia utilizada, portanto, funcionou melhor para a detecção de pé preto e oídio, e em certos casos, pode ser apropriada para míldio e doença de Petri, onde uma deformação espectral da planta doente é observada, mesmo se a direção de deformação mudar de ano para ano.

Por fim os dados de clorofila foram correlacionados pelo método de Pearson, foi atribuído um R para cada correlação. Correlação negativa é quando o processo é inverso, ou seja, quando um valor de uma variável aumentar o valor da outra variável no estudo diminui. As doenças míldio, doença de Petri e pé-preto e suas testemunhas, foram analisadas com clorofilômetro que mede a clorofila total e podem ser visualizadas na **Figura 12**.



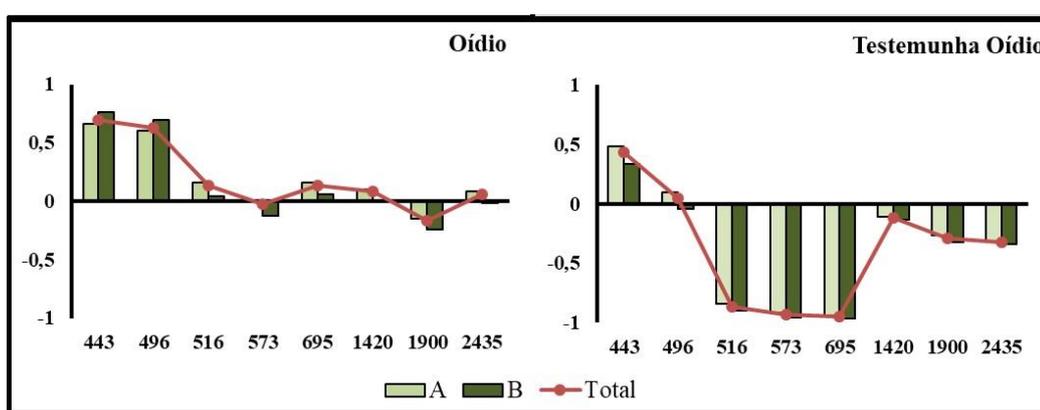
**Figura 12.** Correlação de Pearson para os dados de clorofila total em relação a reflectância das doenças míldio, doença de Petri, pé-preto e suas respectivas testemunhas nos comprimentos de onda 443, 496, 516, 573, 695, 1420, 1900, 2435.

Analisando os gráficos de clorofila total para os comprimentos de onda 443, 496, 516, 573 e 695 podemos observar que de modo geral as doenças em sua maioria registraram correlações negativas inversas, ou seja, quanto menor foi o valor de reflectância registrado, maior o valor de clorofila total. Já nos comprimentos de onda 1420, 1900 e 2435 os valores de clorofila reduziram e por consequência os valores de reflectância aumentaram. Essa baixa correlação no infravermelho médio se dá pela interação da radiação com a estrutura morfológica e conteúdo de água da folha. (MENESES *et al.* 2019).

As testemunhas e doença de Petri para esses mesmos comprimentos de onda do infravermelho médio apresentam pouca correlação positiva, ou seja, quanto menor for a reflectância, menor será a clorofila. A doença pé-preto não manteve os mesmos padrões das demais doenças, indicando no seu gráfico que há uma maior correlação direta positiva entre a reflectância e clorofila.

A doença oídio foi analisada com um clorofilômetro que mede a clorofila A, clorofila B e clorofila total e estão ilustrados na **Figura 13**. A doença oídio apresentou alta correlação positiva entre clorofila e reflectância nos comprimentos de onda 443 e 496, com valores mais altos para a clorofila B, e baixa clorofila para os demais comprimentos de onda.

Analisando o gráfico da testemunha nos comprimentos de onda 516, 573 e 695 apresentaram maiores valores de clorofila e baixa reflectância, ou seja, maior absorção da radiação nesses comprimentos de onda para a planta saudável, em conformidade com o descrito por MENESES *et al.* (2019).



**Figura 13.** Correlação de Pearson para os dados de clorofila A, clorofila B e clorofila total, em relação a reflectância de oídio e testemunha nos comprimentos de onda 443, 496, 516, 573, 695, 1420, 1900, 2435.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados do trabalho indicaram que as infecções causadas pelos patógenos *Plasmopara viticola* (míldio), *Uncinula necator* (oídio), *Dactylonectria macrodidyma* (pé-preto) e *Phaeoacremonium* sp. (doença de Petri) após a inoculação de plantas jovens de videiras, quando os sintomas ainda se encontram no estágio inicial, apresentaram alterações no comportamento espectral das folhas. O oídio avaliado 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.

O método baseado em medidas de reflectância espectral de folhas de videira produziu um conjunto de valores relacionados à reflectância, na forma de limiares, que podem ser usados em medições gerais realizadas em campo. O método produz dados que podem ser processados automaticamente para fornecer, um diagnóstico sobre o status de saúde da planta. Isto pode ser feito associando ao dispositivo de medição um processador capaz de realizar as operações básicas envolvendo os espectros observados. O dispositivo de observação em si não precisa ter a capacidade de observar completamente um espectro em alta resolução (que seria um espectrorradiômetro); dado que apenas alguns comprimentos de onda pré-determinados são necessários, um dispositivo fotossensível mais simples e menos dispendioso devidamente ajustadas às doenças a serem detectadas pode ser projetado para realizar as tarefas programadas.

No que diz respeito ao desenvolvimento de dispositivos para observação de campo em tempo real, os resultados sugerem que tais dispositivos devem ter sensibilidade espectral do visível ao infravermelho médio, uma vez que utilizamos os valores limiares resultantes da observação de 443 até 1900 nm e 2435 nm. No entanto, é bem conhecido que os sensores sensíveis a esses comprimentos de onda mais longos tendem a ser significativamente mais caros e difíceis de operar. O uso de sensores menos caros, com sensibilidades limitadas ao visível e ao infravermelho próximo, mesmo que reduza um pouco a precisão do método, ainda produziria resultados úteis.

Observando os gráficos de clorofila foi constatado diferenças entre os sensores, maiores correlações no vermelho para as doenças, e na região do azul e verde para as testemunhas. Quanto maior foi a reflectância menor a clorofila (total), e vice-versa. Os aparelhos medem de forma não invasiva os comprimentos de onda pela transmitância da folha. Alta concentração de

pigmentos fotossintetizantes, maior absorção, menor reflectância e maior a transmissão dessa energia. Os resultados foram coerentes e compatíveis com literatura.

Este trabalho explorou o potencial do uso de observações espectroscópicas para a detecção de doenças em plantas, e foi totalmente desenvolvido em condições controladas em casa de vegetação. Em um projeto futuro serão analisados dados em condições de campo, com todo um conjunto de condições ambientais, há o interesse de ser analisado mais de um patógeno na mesma planta, e também, será estudada as possibilidades de desenvolvimento de um sensor de baixo custo que opere em faixas específicas para a detecção de doenças, a fim de auxiliar os projetos de monitoramento.

## REFERÊNCIAS

- ARRUDA, C. D. **Uso de dados espectrais na diferenciação de regiões vitivinícolas do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.70, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/150047>>. Acesso em: 22 jan. 2018.
- ASD - Analytical Spectral Devices. FieldSpec® 4 Hi-Res portable spectroradiometer. 2012. Disponível em: <<http://www.asdi.com/products/fieldspec-spectroradiometers/fieldspec-4-hi-res>>
- BALTZER, J. L.; THOMAS, S. C. Respostas ópticas foliares à luz e disponibilidade de nutrientes do solo em árvores decíduas temperadas. **Botanical Society of America**, ed. 92, p. 214-223, 2005. <https://doi.org/10.3732/ajb.92.2.214>
- BULANON, D. M.; BURKS T. F.; KIM D. G.; RITENOUR M. A. Citrus black spot detection using hyperspectral image analysis. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 15, ed. 3, p. 171-180. 2013. Disponível em: <http://www.cigrjournal.org>
- BLAZQUEZ, C.H.; EDWARDS, G.J. Spectral reflectance of healthy and diseased watermelon leaves. **Annual Applied Biology**, v. 108, p. 243-249, 1986.
- BRAVO, C.; MOSHOU, D.; OBERTI, R.; WEST, J.; MC CARTNEY, A.; BODRIA, L.; RAMON, H. Foliar disease detection in the field using optical sensor fusion. **Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development**. Manuscript, v. 4, p. 1-14, 2004. Disponível em: <http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/537/531>
- CALCANTE, A.; MENA, A.; 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.
- CARVALHO, N. L. Resistência genética induzida em plantas cultivadas. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. Santa Maria-RS, v.7, n. 7, p. 1379-1390. 2012.
- CASTRO-ESAU, K. L; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; RIVARD, B.; WRIGHT, S. J.; QUESADA M. Variability in leaf optical properties of Mesoamerican trees and the potential for species classification. **American Journal of Botany**, v. 93, p. 517-530. 2006. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.4.517>
- CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P. Cultivo protegido de videira: manejo fitossanitário, qualidade enológica e impacto ambiental. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 3, Jaboticabal. 2013.
- DELALIEUX, S.; VAN AARDT, J.; KEULEMANS, W.; SCHREVEN, 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.02.005>

DELWICHE, S. R.; KIM, M. S. Hyperspectral imaging for detection of scab in wheat. **Biological Quality and Precision Agriculture II**. International Society for Optics and Photonics. p. 13-21, 2000. <https://doi.org/10.1117/12.411752>

ETTABAA, K. S.; SALEM, M. B. Adaptive Progressive Band Selection for Dimensionality Reduction in Hyperspectral Images. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v.46, p. 157-167, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12524-017-0691-9>

FONSECA, E. L. da; ROSA, L. M. G.; FONTANA, D. C. Caracterização espectral de *Paspalum notatum* em diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília. v. 37, n. 3. p. 365-371. 2003. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/95429>>. Acesso em: 22 jan. 2018.

FREIRE, L.; PASSAMANI, F. R. F.; THOMAS, A. B.; NASSUR, R. DE C. M. R.; SILVA, L. M.; PASCHOAL, F. N.; PEREIRA, G. E.; PRADO, G.; BATISTA, L. R. Influence of physical and chemical characteristics of wine grapes on the incidence of *Penicillium* and *Aspergillus* fungi in grapes and ochratoxin A in wines. **International Journal of Food Microbiology**, v.241, p.181-190, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.10.027>

FALKER, AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA. MANUAL DO MEDIDOR ELETRÔNICO DE TEOR CLOROFILA (CLOROFILOG/CFL 1030). Porto Alegre, 2008. 33p. Disponível em: <[http://www.falker.com.br/produto\\_download.php?id=4](http://www.falker.com.br/produto_download.php?id=4)>. Acesso em: 20 jan. 2018.

GARRIDO, L.DA R.; SÔNEGO, O. R.; GOMES, V. N. Fungos associados com o declínio e morte de videiras no Estado do Rio Grande do Sul. **Fitopatologia brasileira**, v. 29, n. 3, p. 322-324, 2004.

GRAEFF, S.; LINK, J.; CLAUPEIN, W. Identification of powdery mildew (*Erysiphe graminis* sp. *tritici*) and take-all disease (*Gaeumannomyces graminis* sp. *tritici*) in wheat (*Triticum aestivum* L.) by means of leaf reflectance measurements. **Central European Journal of Biology**, 1, p.275-288, 2006. <https://doi.org/10.2478/s11535-006-0020-8>

HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. Bookman Editora. 2009.

HAO, S.; LIU, S.; ZHANG, Z.; CUI, H.; DUAN, J.; CHEN, Q. Characteristics of chlorophyll metabolism and chlorophyll fluorescence in the silvered leaf of summer squash. **Acta Horticultura e Sinica**, v.6, p. 879-884, 2009. Disponível em: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20103058146>

ISLEIB J. Signs and symptoms of plant disease: Is it fungal, viral or bacterial?, Michigan State University Extension, 2012. Disponível em: <[https://www.canr.msu.edu/news/signs\\_and\\_symptoms\\_of\\_plant\\_disease\\_is\\_it\\_fungal\\_viral\\_or\\_bacterial](https://www.canr.msu.edu/news/signs_and_symptoms_of_plant_disease_is_it_fungal_viral_or_bacterial)>. Acesso em: 17/12/2018.

JACKSON, R. S. Viticulture. **Reference Module in Food Science**, p. 14. 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.02871-7>

JACOBSON, A. R.; DOUSSET, S.; GUICHARD, N.; BAVEYE, P. C.; ANDREUX, F. Diuron mobility through vineyard soils contaminated with copper. **Environmental Pollution**, v. 138, p. 250-259, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.04.004>

JUNGES, A. H.; ALMANÇA, M. A. K.; DUCATI, J. R.; LAMPUGNANI, C. S. Remote Sensing to Detect Grapevine Leaf Stripe Symptoms (Esca Complex) in Grapevine Leaves. Poster presented at the 10th **International Workshop on Grapevine Trunk Diseases** (Reims, France), p. 536–537. 2018. Firenze: Firenze University Press. Abstract available at [www.fupress.net/index.php/pm/article/view/21865](http://www.fupress.net/index.php/pm/article/view/21865)

KHAN, A.; LUQMAN, S.; MASOOD, N.; SINGH, D. K.; SAEED, S. T.; SAMAD, A. Eclipta yellow vein virus enhances chlorophyll destruction, singlet oxygen production and alters endogenous redox status in *Andrographis paniculata*. **Plant Physiology and Biochemistry**, 104, p. 165-173, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.03.027>

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. <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0198-y>

KOMÁREK, M.; ČADKOVÁ, E.; CHRASTNÝ, V.; BORDAS, F.; BOLLINGER, J-C. Contamination of vineyard soils with fungicides: A review of environmental and toxicological aspects. **Environment International**, v. 36, p. 138-151, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.10.005>

KURSCHNER, E.; WALTER, H.; KOCH, W. Measurements of spectral reflectance of leaves as a method for assessing the infestation with powdery mildew. **Journal of Plant Disease Protection**, v. 91, p. 71-80, 1984.

LORENZEN, B.; JENSEN, A. Changes in leaf spectral properties induced in barley by cereal powdery mildew. **Remote Sensing of Environment**, v. 27, p. 201-209, 1989.

LU, J.; EHSANI, R.; SHI, Y.; CASTRO, A. I.; WANG, S. Detection of multi-tomato leaf diseases (late blight, target and bacterial spots) in different stages by using a spectral-based sensor. **Scientific Reports**, v. 8, p. 2793, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-21191-6

MAGALHÃES N. **Tratado de Viticultura – A Videira, a Vinha e o Terroir**. Publicações Chaves Ferreira, Lisboa, 2015. ISBN: 9789899820739

MAHLEIN, A.-K. Plant Disease Detection by Imaging Sensors – Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping. **Plant Disease**, v.100, n.2, p.241-251, 2016. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE>

MAREK, J. **Fungicidas de efeitos fisiológicos no controle do míldio e no desenvolvimento de mudas de videira**. 2016. Dissertação - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, 2016.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. de M. **Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação**. São Paulo. Ed. Oficina de Textos, p.193, 2019. ISBN: 978-85-7975-301-5

MINOLTA CAMERA, Ltda. **Manual for chlorophyll meter SPAD 502**. Osaka: Minolta, Radiometric Instruments divisions. p. 22.1989.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 4ª Edição Atualizada e Ampliada. Viçosa. MG. Ed. UFV. 2014. ISBN: 978-85-7269381-3.

MUGANU, M.; PAOLOCCI, M. **Adaptation of Local Grapevine Germplasm: Exploitation of Natural Defence Mechanisms to Biotic Stresses**. In: The Mediterranean Genetic Code - Grapevine and Olive. 2013. doi: 10.5772/51976 Disponível em: <<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/38869.pdf>> Acesso em: 20 fev. 2018.

MUTANGA, O.; DUBE, T.; GALAL, O. Remote sensing of crop health for food security in Africa: Potentials and constraints. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 8, p. 231-239, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.10.004>

NACHTIGAL, J. C.; MIGLIORINI, L. C. Recomendações para produção de videiras americanas e híbridas para processamento na região de Pelotas. **Circular técnica**, 77. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, p. 12. 2009. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/748260/1/circular77.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2018.

NAIDU, R. A.; PERRY, E. M.; PIERCE, F. J.; 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. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.11.007>

NOVO, E. M. L de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**, 4ª. Ed, São Paulo: Blucher, 2010.

PACHECO, A. P. Sensoriamento Remoto na faixa espectral do infravermelho termal. **Revista da Comissão Brasileira de Geodésia**. Recife, UFPE. 2001.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. Oficina de Textos, 2015.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, São Paulo. Editora: Parêntese. 2007.

PROTAS, J. F. S.; CAMARGO, U. A.; MELLO, L. M. R. Vitivinicultura brasileira: regiões tradicionais e pólos emergentes. Informe Agropecuário. Belo Horizonte, v.27, n.234, p.7-15. 2006

QUITÉRIO, G. C. M.; SOUZA FILHO, C. R. DE; ALMEIDA, T. I. R. Mudanças fisiológicas e espectrais induzidas por hidrocarbonetos em *Brachiaria brizantha* e *Dolichos lablab* – uma avaliação sobre o uso da cobertura vegetal como bioindicador de escape de hidrocarbonetos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** 2007. Florianópolis, Brasil. INPE. p. 4389 – 4391.

SANKARAN, S.; MISHRA, A.; EHSANI, R.; DAVIS, C. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.72, ed.1, p. 1-13. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.02.007>

SHIMANO I. S. H, SENTELHAS P. C. Risco climático para ocorrência de doenças fúngicas da videira no Sul e Sudeste do Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 527-537, 2013. Disponível em: <http://www.ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/2249/831>

SCHROEDER, D. J. 1999. *Astronomical Optics*. Cambridge: Academic Press. Van Leeuwen, C., and G. Seguin. 2006. The Concept of Terroir in Viticulture. **Journal of Wine Research** 17 (1): 1–10. <https://doi.org/10.1080/09571260600633135>

SISMANOGLU, B. N.; HOFFMANN, C. A.; BARBOSA, I. M. O uso do espectrorradiômetro refspecii-a como ferramenta útil, motivadora e auxiliar no ensino das ciências exatas e implementadora da interdisciplinaridade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2003, Belo Horizonte, Brasil. **Anais... INPE**, p. 805-812.

SLATON, M. R.; HUNT, E. R, JR.; SMITH, W. K. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. **American Journal of Botany**. v. 88, p. 278-284. 2001. <https://doi.org/10.2307/2657019>

SÔNIGO, O. R.; GARRIDO, L. DA R.; GRIGOLETTI, A. **Principais doenças fúngicas da videira no Sul do Brasil**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2005.

TISCHLER, K. Y.; THIESSEN, E.; HARTUNG, E. Early optical detection of infection with brown rust in winter wheat by chlorophyll fluorescence excitation spectra. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 146, p. 77-85, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.026>

TONIETTO J., MANDELLI F., ZANUS M. S., GUERRA C. C., PEREIRA G. E. O clima vitícola das regiões produtoras de uvas para vinhos finos do Brasil. **Clima, Zonificación y Tipicidad del Vino en Regiones Vitivinícolas Ibero americanas**, p. 111, 2012.

WHETTON, R. L.; HASSALL, K. L.; WAINE, T. W.; MOUAZEN, A. M. Hyperspectral measurements of yellow rust and fusarium head blight in cereal crops: Part 1: Laboratory study. **Biosystems Engineering**, v. 166, p. 101-115, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.11.008>

ZHAO, Y.; CHEN, P.; LIN, L.; HARNLY, J. M.; YU, L.; LI, Z. Tentative identification, quantitation, and principal component analysis of green pu-erh, green, and white teas using UPLC/DAD/MS. **Food Chemistry**, v. 126 (3), p. 1269-1277, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.055>

## APÊNDICE A

