



ARIADINY MONTEIRO DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DAS FOLHAS ÚMIDAS E  
SECAS, DA CANA-DE-AÇÚCAR, COM ÊNFASE NOS  
COMPONENTES LIGNINA, CELULOSE E HEMICELULOSE.**

**CAMPINAS**

**2012**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

ARIADINY MONTEIRO DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DAS FOLHAS ÚMIDAS E  
SECAS, DA CANA-DE-AÇÚCAR, COM ÊNFASE NOS  
COMPONENTES LIGNINA, CELULOSE E HEMICELULOSE.**

**Orientador: Prof. Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli**

**Co-orientador: Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE  
DEFENDIDA PELA ALUNA ARIADINY MONTEIRO DA SILVA  
E ORIENTADA PELO PROF. DR. RUBENS AUGUSTO CAMARGO LAMPARELLI**

Assinatura do orientador

A handwritten signature in black ink, appearing to be "R. Lamparelli", is written over a horizontal line.

**Rubens A. C. Lamparelli**  
Pesquisador  
NIPE/UNICAMP  
Matrícula 20.810-8

**CAMPINAS**

**2012.**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Si38c Silva, Ariadiny Monteiro da, 1984-  
Caracterização espectral das folhas úmidas e secas, da cana-de-açúcar, com ênfase nos componentes lignina, celulose e hemicelulose. / Ariadiny Monteiro da Silva. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Rubens Augusto Camargo Lamparelli  
Coorientador: Jansle Vieira Rocha.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Espectroradiômetro. 2. Palha. 3. Agricultura. 4. Sensoriamento remoto. 5. Análise espectral - Processamento de dados. I. Lamparelli, Rubens Augusto Camargo. II. Rocha, Jansle Vieira. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Spectral characterization of dry and wet sugar-cane leaves, emphasizing lignin, cellulose and hemicellulose contents.

Palavras-chave em Inglês: Spectroradiometer, Straw, Agriculture, Remote sensing, Spectral analysis - Data processing

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável

Titulação: Mestra em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Rubens Augusto Camargo Lamparelli, Flávio Jorge Ponzoni, Júlio César Dalla Mora Esquerdo

Data da defesa: 10-08-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola


Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Ariadiny Monteiro da Silva**, aprovada pela Comissão Julgadora em 10 de agosto de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

**FEAGRI**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli – Presidente e Orientador**  
Feagri/Unicamp

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Flávio Jorge Ponzoni**

INPE

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Julio Cesar Dalla Mora Esquerdo – Membro Titular**  
Embrapa/CNPTIA

**Faculdade de Engenharia Agrícola**  
**Unicamp**



*Dedico*

*A toda a minha família, em especial à  
minha mãe, meu amor, meu pilar, meu  
exemplo e principalmente, minha amiga.*

*Ao meu marido e parceiro de batalha  
diária, José Luiz, pelo apoio, convivência,  
aprendizado, amor e cumplicidade.*

*Aos meus queridos tios, João e  
Myrian, por sempre me apoiarem e  
acreditarem em mim.*

*E aos meus amigos “G7” da Unesp.*

## Agradecimentos

Ao Prof<sup>o</sup> Dr. Rubens Lamparelli pela orientação, incentivo e total solicitude durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Prof<sup>o</sup> Dr. Flávio Ponzoni (Pesquisador e Coordenador do Curso de Pós-graduação do INPE) pela presteza em disponibilizar o equipamento de medição (espectroradiômetro FieldSpec), mas principalmente por ter ido ao campo auxiliar na coleta das assinaturas espectrais. Por ceder a utilização do laboratório de Radiometria do INPE para a segunda medição das folhas. Pela orientação dada durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu amigo Jefferson Rodrigo Batista de Mello (Setor Corporativo Agrícola de Geotecnologias da Raízen) que facilitou o agendamento da coleta de dados em campo, sendo o contato direto entre a Unicamp e Raízen. Obrigado por ter entrado no canavial para coletar as amostras. Obrigado pelas diversas vezes em que me auxiliou.

Ao Felipe (funcionário Raízen) que foi muito solícito ao disponibilizar uma sala para instalar o equipamento e medir as amostras, e também disponibilizou um cortador de cana, o Sr. Jair, que auxiliou para entrarmos no talhão que estava tombado.

À empresa Raízen por disponibilizar o talhão para coleta dos dados em campo, bem como ceder as imagens RapidEye.

À Juliana da BAE, da Biblioteca Central da Unicamp, que sempre me orientou quanto às referências bibliográficas.

Ao Júnior e à Célia do Laboratório de Solos da Feagri por disponibilizarem a estufa ventilada.

À Danielle Pennachin pelo apoio na organização do material de campo.

Ao Prof. Dr. Lênio Galvão do INPE, pela ajuda durante o processamento das assinaturas espectrais.

Ao “Prof. Beto”, Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho, pesquisador responsável pelo Laboratório de pesquisa em Espectroscopia de Refletância (LER) e Processamento de Informações Geo-referenciadas (LAPIG) do Instituto de Geociências da Unicamp, por disponibilizar o aparelho *Leaf-clip*, indispensável para a pesquisa.

Ao Agmon Rocha, técnico responsável pelo Laboratório de Geoprocessamento da Feagri (Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp) pelo apoio durante a coleta e processamento dos dados.

A todos os colegas do Labgeo da Feagri pelas diversas trocas de informações, em especial para a Maria Angélica, Gleyce Araújo, Henrique e Rafael.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a realização da pesquisa.

À Feagri pela estrutura e apoio financeiro para o desenvolvimento da pesquisa e trabalho de campo.

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação da Feagri, sempre prestativos e atenciosos.

Ao Fernando Máximo, pesquisador da Embrapa Cnptia, pelas instruções para a construção da árvore hiperbólica da biblioteca espectral.

Ao meu tio João Villa e ao meu amigo João Francisco Antunes, pesquisadores da Embrapa, pelos diversos conselhos, conversas e dicas profissionais.

À minha mãe, pela preocupação diária.

Ao meu marido, por revisar meu texto.

À minha querida amiga Cosma, pelas palavras amigas e por estarmos crescendo juntas.

Essas pessoas e instituições me ajudaram muito e foram imprescindíveis para o desenvolvimento desta pesquisa.

**Meus sinceros e profundos agradecimentos...**

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xvi</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
OBJETIVO GERAL .....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
CANA-DE-AÇÚCAR – CONTEXTUALIZAÇÃO .....	4
CANA-DE-AÇÚCAR – PLANTA.....	14
MATÉRIA SECA, FIBRAS E COMPONENTES .....	17
SENSORIAMENTO REMOTO .....	19
SENSORES HIPERESPECTRAIS .....	21
COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO .....	22
ESPECTRORADIOMETRIA .....	24
ÍNDICES DE VEGETAÇÃO .....	34
REMOÇÃO DE CONTÍNUO.....	36
<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
ÁREA DE ESTUDO.....	37
APLICATIVO UTILIZADO .....	38
DADOS ESPECTRAIS .....	38
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	40
<i>Coleta e Primeira Medição dos Dados em Campo .....</i>	<i>40</i>
<i>Secagem em Estufa ventilada .....</i>	<i>45</i>
<i>Segunda Medição das Folhas.....</i>	<i>45</i>
<i>Processamento das Assinaturas Espectrais .....</i>	<i>46</i>
<i>Análise do Fator de Refletância das Folhas .....</i>	<i>47</i>
<i>Análise da Remoção de Contínuo .....</i>	<i>50</i>
<i>Análise dos Índices de Vegetação.....</i>	<i>51</i>

<i>Análises Estatísticas</i> .....	52
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>54</b>
ANÁLISES ESTATÍSTICAS BÁSICAS.....	55
ANÁLISE DO FATOR DE REFLETÂNCIA E REMOÇÃO DE CONTÍNUO.....	58
<i>Primeiro método de análise do Fator de Refletância</i> .....	66
Primeiro Intervalo de Análise: Absorções entre 1650 e 1850 nm.....	66
Segundo Intervalo de Análise: Absorções entre 2015 e 2220 nm.....	69
Terceiro Intervalo de Análise: Absorções entre 2220 e 2400 nm .....	72
Conclusão da primeira análise.....	75
<i>Segundo método de análise do Fator de Refletância</i> .....	77
Análise próxima a 1120 nm.....	77
Análise próxima a 1420 nm.....	81
Análise próxima a 1700 nm.....	85
Análise próxima a 1730 nm .....	86
Análise próxima a 1780 nm .....	88
Análise próxima a 1820 nm.....	93
Análise próxima a 2100 nm.....	98
Análise próxima a 2300 nm.....	102
Análise próxima a 2340 nm .....	103
Análise próxima a 2350 nm .....	106
Conclusão da segunda análise .....	110
Conclusão sobre os dois métodos de análise.....	112
ANÁLISE DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO .....	115
<i>Correlação entre CAI e LCA</i> .....	115
<i>Correlação entre CAI e NDVI</i> .....	120
<i>Correlação entre LCA e NDVI</i> .....	124
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>130</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>131</b>
<b>APÊNDICE</b> .....	<b>141</b>



## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição municipal das emissões de metano provenientes da queima de cana-de-açúcar, no Estado de São Paulo estimadas pelo método do IPCC (2006).....	6
Figura 2. Área plantada da cana entre 1990 a 2010. Fonte: IBGE (2010). .....	9
Figura 3. Quantidade de cana Produzida entre 1990 a 2010. ....	9
Figura 4. Área plantada de Cana-de-açúcar em 2010.....	12
Figura 5. Experimento (pontos) e simulação (linha) para medir acúmulo de matéria seca. ....	25
Figura 6. Área de Estudo – município de Capivari / Santa Bárbara D’Oeste - SP. ....	37
Figura 7. Espectrorradiômetro FieldSpec* Pro, <i>Leaf-clip</i> e amostras. ....	40
Figura 8. Primeira Medição das amostras (folhas úmidas). ....	41
Figura 9. Doze amostras do ponto 32 (3 ponteiras, 3 verdes, 3 senescentes e 3 palhas). ....	42
Figura 10. Três amostras de Ponteira do ponto 32. ....	43
Figura 11. Três amostras de Folha Verde do ponto 32.....	43
Figura 12. Três amostras de Folha Senescente do ponto 32.....	44
Figura 13. Três amostras de Palha do ponto 32.....	44
Figura 14. Segunda Medição das amostras (folhas secas).....	46
Figura 15. Fluxograma da coleta, medição, conversão e geração das médias finais.....	47
Figura 16. Absorções visíveis no espectro de Fator de Refletância. ....	48
Figura 17. Valor e Absorção da Remoção de Contínuo da Ponteira próxima a 2100 nm.....	50
Figura 18. Fluxograma da Pesquisa.....	53
Figura 19. Desvio Padrão das médias finais das folhas.....	56
Figura 20. Coeficiente de Variação das médias finais das folhas. ....	57
Figura 21. FR das folhas (Ponteira, Verde, Senescente e Palha), úmidas e secas.....	58
Figura 22. Comparação visual do Fator de refletância entre as folhas úmidas e secas. ....	60
Figura 23. Fator de refletância das folhas (Ponteira, Verde, Senescente e Palha) úmidas.....	61
Figura 24. Fator de refletância das folhas (Ponteira, Verde, Senescente e Palha) secas.....	61
Figura 25. Fator de refletância da Ponteira úmida e seca. ....	62
Figura 26. Fator de refletância da Folha Verde úmida e seca. ....	62
Figura 27. Fator de refletância da Folha Senescente úmida e seca. ....	63
Figura 28. Fator de refletância da Palha úmida e seca. ....	63
Figura 29. Absorções visíveis no espectro de Fator de Refletância das folhas.....	64

Figura 30. FR (a) e CR (b) das folhas entre 1650 e 1850 nm.....	66
Figura 31. Remoção de Contínuo das folhas entre 1650 e 1850 nm.....	67
Figura 32. FR (a) e CR (b) das folhas entre 2015 e 2220 nm.....	69
Figura 33. Remoção de Contínuo das folhas entre 2015 e 2220 nm.....	70
Figura 34. FR e CR das folhas entre 2220 e 2400 nm.....	72
Figura 35. Remoção de Contínuo das folhas entre 2220 e 2400 nm.....	73
Figura 36. FR das Folhas próximo a 1120nm. ....	77
Figura 37. FR das Folhas próximo a 1120nm, separadamente.....	78
Figura 38. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 1110 e 1130 nm.....	79
Figura 39. Remoção de Contínuo das folhas próximo a 1120nm. ....	80
Figura 40. FR das Folhas próximo a 1420nm. ....	81
Figura 41. FR das Folhas próximo a 1420 nm separadamente.....	82
Figura 42. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 1410 e 1430 nm.....	83
Figura 43. Remoção de Contínuo das folhas em 1420nm.....	84
Figura 44. FR das Folhas próximo a 1700nm. ....	85
Figura 45. FR das Folhas próximo a 1730nm separadamente.....	87
Figura 46. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 1710 e 1740 nm.....	88
Figura 47. FR das Folhas próximo a 1780 nm, separadamente.....	89
Figura 48. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 1765 e 1790 nm.....	90
Figura 49. Remoção de Contínuo das folhas entre 1700 e 1800nm.....	91
Figura 50. FR das Folhas próximo a 1820nm. ....	93
Figura 51. FR das Folhas próximo a 1820 nm separadamente.....	94
Figura 52. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 1810 e 1830 nm.....	95
Figura 53. Remoção de Contínuo das folhas próximo a 1820nm. ....	96
Figura 54. FR das Folhas próximo a 2100 nm. ....	98
Figura 55. FR das Folhas próximo a 2100 nm separadamente.....	100
Figura 56. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 2090 e 2110 nm.....	100
Figura 57. Remoção de Contínuo das folhas próximo a 2100nm. ....	101
Figura 58. FR das Folhas próximo a 2340nm. ....	102
Figura 59. FR das Folhas próximo a 2340 nm separadamente.....	104
Figura 60. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 2330 e 2350 nm.....	105

Figura 61. Remoção de Contínuo das folhas próxima a 2340nm.....	105
Figura 62. FR das Folhas próximo a 2352nm. ....	107
Figura 63. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 2340 e 2360 nm.....	108
Figura 64. Remoção de contínuo das folhas próximo a 2350 nm. ....	108
Figura 65. Absorção da Remoção de Contínuo - 1º método de análise. ....	113
Figura 66. Absorção da Remoção de Contínuo - 2º método de análise. ....	114
Figura 67. Correlação entre CAI e LCA de todas as folhas. ....	116
Figura 68. Correlação entre CAI e LCA das folhas úmidas.....	116
Figura 69. Correlação entre CAI e LCA das folhas secas.....	117
Figura 70. Correlação entre CAI e LCA de todas as folhas separadamente. ....	118
Figura 71. Correlação entre CAI e NDVI de todas as folhas. ....	120
Figura 72. Correlação entre CAI e NDVI das folhas úmidas.....	121
Figura 73. Correlação entre CAI e NDVI das folhas secas.....	121
Figura 74. Correlação entre CAI e NDVI de todas as folhas separadamente. ....	122
Figura 75. Correlação entre LCA e NDVI de todas as folhas.....	124
Figura 76. Correlação entre LCA e NDVI das folhas úmidas.....	125
Figura 77. Correlação entre LCA e NDVI das folhas secas.....	125
Figura 78. Correlação entre LCA e NDVI de todas as folhas separadamente. ....	126
Figura 79. Síntese das Correlações entre os índices (CAI, LCA e NDVI).....	129

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Lei 11.241/2002 sobre a redução gradativa da queima da palha da cana. ....	5
Tabela 2. Área colhida, quantidade produzida e valor da produção da Cana em 2010. ....	10
Tabela 3. Feições de absorção associada à concentração de lignina, celulose e hemicelulose. ....	27
Tabela 4. Informações sobre o talhão de campo. ....	38
Tabela 5. Informações técnicas do espectrorradiômetro. ....	39
Tabela 6. Codificação das amostras. Exemplos do ponto 32. ....	42
Tabela 7. Maiores e menores valores de Desvio Padrão das folhas. ....	56
Tabela 8. Coeficiente de Correlação dos Índices de Vegetação. ....	57
Tabela 9. Valores de Absorção da Remoção de Contínuo entre 1650 e 1850 nm. ....	68
Tabela 10. Valores de Absorção da Remoção de Contínuo entre 2015 e 2220 nm. *Ruídos ...	70
Tabela 11. Valores de Absorção da Remoção de Contínuo entre 2220 e 2400 nm. ....	74
Tabela 12. Síntese das absorções dos componentes no Fator de Refletância - 1ª análise. ....	75
Tabela 13. Síntese das absorções dos componentes na Remoção de Contínuo - 1ª análise. ....	75
Tabela 14. Valor da absorção da lignina no FR próximo a 1120nm. ....	79
Tabela 15. Valores das Absorções da Remoção de contínuo próximos a 1120nm. ....	80
Tabela 16. Valor da absorção da lignina no FR próximo a 1420 nm. ....	83
Tabela 17. Valores das Absorções da Remoção de contínuo próximos a 1420nm. ....	84
Tabela 18. Valor da absorção dos componentes no FR próximo a 1730 nm. ....	87
Tabela 19. Valor da absorção dos componentes no FR próximo a 1780 nm. ....	90
Tabela 20. Valores das Absorções da Remoção de contínuo próximos a 1730 e 1780 nm. ....	92
Tabela 21. Valor da absorção da celulose no FR próximo a 1820 nm. ....	95
Tabela 22. Valores das Absorções da Remoção de contínuo próximos a 1820nm. ....	96
Tabela 23. Valor da absorção dos componentes no FR próximo a 2100 nm. ....	100
Tabela 24. Valor da absorção dos componentes no FR próximo a 2340nm. ....	104
Tabela 25. Valor da absorção dos componentes no FR próximo a 2350nm. ....	107
Tabela 26. Síntese das absorções dos componentes no FR da 2ª análise. ....	110
Tabela 27. Síntese das absorções dos componentes na Remoção de Contínuo da 2ª análise. ....	110
Tabela 28. Coeficiente de Correlação entre CAI e LCA das folhas. ....	117
Tabela 29. Coeficiente de Correlação entre CAI e NDVI das folhas. ....	123
Tabela 30. Coeficiente de Correlação entre LCA e NDVI das folhas. ....	127

## RESUMO

A palha é um dos principais subprodutos gerado no final do ciclo vegetativo da cana-de-açúcar. Ela tem um significado importante no contexto brasileiro dado que a partir dela pode-se gerar álcool e energia limpa, beneficiando o meio ambiente e a matriz energética. Assim é imprescindível aprofundar os estudos em torno da palha da cana e estimar a quantidade de resíduos produzidos ao final da colheita com o intuito de otimizar o processo de reaproveitamento desta. A lignina, celulose e hemicelulose, presentes na palha em grandes quantidades, são responsáveis pela estrutura fibrosa da cana-de-açúcar e é a partir deles que são dimensionados os processos de geração de energia (álcool e eletricidade). Neste contexto este trabalho teve o objetivo de utilizar o sensoriamento remoto para identificar estes componentes na cana-de-açúcar para subsidiar futuros levantamentos de estimativa de palha para fins energéticos e ambientais. Foram caracterizadas espectralmente 384 amostras de folhas de cana-de-açúcar, nas condições úmidas e secas, utilizando o espectroradiômetro FieldSpec Pro\* com o intuito de identificar possíveis feições de absorções associadas aos componentes lignina, celulose e hemicelulose. Verificou-se que houve melhor discriminação das feições de absorção nas folhas secas, sendo que estas apresentaram valores de CAI e LCA superiores às folhas úmidas, pois 100% das amostras secas apresentaram valores de CAI positivos. O CAI foi o melhor estimador dos componentes se comparado ao LCA. As correlações entre CAI, LCA e NDVI permitiram a segregação/distinção entre as folhas nas condições úmidas e secas. E o CAI das palhas foi significativamente maior que o CAI do restante das folhas. Os resultados mostraram que nas feições visíveis próximo a 1730, 1780, 2100, 2270 e 2330 nm foram encontradas feições ligadas à lignina, hemicelulose e celulose e este estudo permite concluir que as ferramentas do sensoriamento remoto podem ajudar como indicador de teores de lignina e celulose utilizando-se de índices de vegetação apropriados a estas finalidades, neste caso LCA e CAI, à luz dos novos programas espaciais de sensoriamento remoto hiperespectrais.

**Palavras-chave:** espectroradiômetro, palha, agricultura, sensoriamento remoto, análise espectral - processamento de dados.



## ABSTRACT

The straw is one of the main by-products generated at the end of the sugarcane vegetative cycle. It is significantly important in the Brazilian context, as alcohol and clean energy can be generated, thus benefiting the environment and the energy matrix. It is therefore essential to deepen the studies on the sugarcane straw and to estimate the amount of waste produced at the end of the harvest, in order to optimize its reuse process. Lignin, cellulose and hemicelluloses, present in the straw in large quantities, are responsible for the sugarcane fibrous structure; they enable to dimension the processes of energy generation (alcohol and electricity). The paper aimed to use remote sensing to identify these components in sugarcane in order to give support to future surveys on the use of straw for energy and environmental purposes. 384 samples of sugarcane leaf were characterized spectrally, in both wet and dry conditions, with the use of FieldSpec Pro\* spectroradiometer, so as to identify possible absorption features associated with lignin, cellulose and hemicelluloses. There was better discrimination of the absorption features in the dried leaves, which showed higher values of LCA and CAI than the wet leaves, as 100% of the dried samples showed positive values of CAI. CAI was the best estimator of the components when compared to LCA. The correlations between CAI, LCA and NDVI allowed the segregation / distinction between the leaves in wet and dry conditions. The CAI of the straw was significantly higher than the CAI of the other leaves. The results showed that the visible features near 1730, 1780, 2100, 2270 and 2330 nm were found features linked to lignin, hemicellulose and cellulose and this study shows that remote sensing tools can help as an indicator of lignin and cellulose using vegetation index appropriate for these purposes, in which case LCA and CAI, the light of new space programs of hyperspectral remote sensing.

**Keywords:** spectroradiometer, straw, agriculture, remote sensing, spectral analysis - data processing.

## INTRODUÇÃO

---

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido da Índia, da China e da Tailândia (VEIGA FILHO et al., 2010). Em 2010, o Brasil produziu 717 milhões de toneladas de cana em 2010, numa área colhida de 9 milhões de hectares, o que rendeu ao país pouco mais de 28 bilhões de reais (IBGE, 2010).

Ao final do ciclo vegetativo da cana-de-açúcar são gerados vários subprodutos, como por exemplo: o açúcar, o álcool, a cachaça, o melado, a energia elétrica, a palha *in natura* usada para o adubo orgânico ou alimento para animais, etc. Existem tecnologias que utilizam o bagaço e a palha *in natura* para produzir álcool e energia elétrica, sendo que, para cada tonelada de bagaço são produzidos mais de 100 litros de álcool (ROSSETO, 2010).

A palha contém fibras, que por sua vez são compostas por estruturas químicas, como por exemplo, a lignina, a celulose e a hemicelulose, responsáveis pela rigidez e pelo vigor das paredes celulares das plantas (KOKALY et al., 2009). As variedades de cana mais ricas em fibras possuem maior resistência ao tombamento, são mais resistentes à penetração de pragas nos colmos, são utilizadas para queima nas caldeiras gerando energia elétrica por meio do vapor, que abastecem a indústria e, seu excedente é vendido para a sociedade (FERNANDES, 2000; LAVANHOLI, 2010). Uma tonelada de bagaço gera 342,4 KWh e uma tonelada de bagaço somado à palha produzem 560,3 KWh (KITAYAMA, 2007).

É de vital importância determinar a quantidade de lignina, celulose e hemicelulose da palha, pois estes componentes são responsáveis pela estrutura fibrosa da cana-de-açúcar, e sua estrutura determina a quantidade de etanol e energia que será gerada a partir desta matéria seca.

Aliado a esses fatores econômicos, existem os fatores ambientais que, por meio de normativas, incentivam as mudanças nas políticas internas das usinas, sendo elas: o Protocolo Agro-Ambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista assinado em 04/06/2007, que tem por objetivo induzir a redução da queima da palha da cana-de-açúcar em prazo mais curto daquele previsto pela Lei Estadual de Queima (Lei 11.241/02). A regulamentação dada pelo protocolo desencadeia uma série de iniciativas no sentido de destinar o aproveitamento da cana, já que a palha não poderá mais ser queimada ao fim das colheitas. Em geral, todas as indústrias serão obrigadas a remanejar toda a matéria seca, gerada após a colheita da cana, para o

reaproveitamento, a fim de que se transforme em energia renovável. Desta maneira poderá ser aproveitada para queima na usina e produzir energia elétrica.

Aliado ao Protocolo Agroambiental, existe outro fator que incentiva a utilização da biomassa para geração de eletricidade, que é a criação do Programa Nacional de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, que possui a finalidade de agregar 3.300 MW de potência a partir de fontes renováveis ao sistema elétrico brasileiro. E este programa foi instituído pela Medida Provisória nº14 em 21 de dezembro de 2001 (RIPOLI e RIPOLI, 2010).

Neste contexto, a palha tem um significado importante no Brasil, uma vez que a partir dela pode-se gerar álcool e energia limpa, beneficiando o meio ambiente e a matriz energética. Deste modo, é imprescindível aprofundar os estudos em torno da palha da cana e estimar a quantidade de resíduos produzidos ao final da colheita com o intuito de otimizar o processo de reaproveitamento desta.

Para enfrentar este desafio, técnicas de sensoriamento remoto estão sendo testadas para identificar a matéria seca e os componentes estruturais da vegetação. Por esta razão, propõe-se utilizar uma ferramenta auxiliar do sensoriamento remoto para identificar os componentes lignina, celulose e hemicelulose da palha.

Muitos índices de vegetação têm estimado valores de biomassa durante o ciclo vegetativo de diversos cultivos, porém são poucos os que estimam valores de matéria seca durante e após um ciclo vegetativo. Por outro lado, a utilização de sensoriamento remoto com resoluções espectrais altas, devido ao seu potencial de discriminação utilizando faixas estreitas do espectro eletromagnético, pode ajudar na avaliação e na estimativa de biomassa seca no que diz respeito à identificação e à discriminação de componentes desta como a lignina, celulose e hemicelulose. Atualmente há poucas pesquisas que caracterizam espectralmente a palha da cana-de-açúcar para estimativa de sua produção e de seus componentes (lignina, celulose e hemicelulose). Por este motivo, a hipótese deste trabalho é que a espectroradiometria permite definir com maior detalhamento os comprimentos de onda onde há absorção dos componentes estruturais da planta cana-de-açúcar em relação aos dados da literatura assim como aumentar a possibilidade de separação entre a palha e as folhas verdes através de índices de vegetação apropriados.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo Geral**

Caracterizar a refletância espectral das folhas da cana-de-açúcar, nas condições úmidas e secas, por meio de espectrorradiometria, e identificar faixas de comprimento de onda associadas à absorção dos componentes lignina, celulose e hemicelulose.

### **Objetivos Específicos**

1. Gerar curvas espectrais dos fatores de refletância das folhas da cana-de-açúcar;
2. Analisar as curvas espectrais das folhas da cana-de-açúcar quanto ao seu formato (pico, absorção, patamares);
3. Analisar as curvas espectrais das folhas da cana-de-açúcar aplicando-se a técnica da remoção de contínuo;
4. Calcular e analisar os índices de vegetação das folhas da cana-de-açúcar;
5. Identificar nas curvas espectrais as faixas de comprimento de onda que melhor caracterizam a presença da lignina, celulose e hemicelulose.

### **Cana-de-açúcar – Contextualização**

Além da lucratividade, a produção da cana possui o intuito de solucionar problemas ambientais criados e vividos pela sociedade contemporânea, como por exemplo, a crise energética causada pelas limitações das reservas de petróleo, que resulta na demanda pela substituição dos combustíveis fósseis pelos biocombustíveis. Outro fator que demanda a substituição pelas fontes renováveis é a questão do efeito estufa gerado pelo excesso de emissões de gases poluentes e nocivos ao meio ambiente.

Esses fatores aumentam a demanda por biocombustíveis e torna a cana-de-açúcar elemento significativo nas questões econômicas e ambientais para o país e para o mundo.

BARROS (2007) enfatiza esta idéia quando afirma que a tendência da participação do petróleo na matriz energética mundial é diminuir mais rápido que o estimado, e que a bioenergia se mostra uma alternativa viável e promissora, a curto e médio prazos, para ocupar um maior espaço na matriz energética mundial.

Segundo o IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2007), o aumento dos gases do efeito estufa tem causado alterações significativas no clima, ocasionando diversos desastres ambientais que atingem diretamente a sociedade.

BARROS (2007) reforça que o efeito estufa e o desenvolvimento agrícola fazem com que o investimento na pesquisa, produção e utilização dos combustíveis oriundos de fontes vegetais (biocombustíveis), em especial o etanol e o biodiesel, se propaguem por todo o mundo.

Com a redução das reservas de petróleo no mundo, a produção de energias oriundas de fontes vegetais tem aumentado, uma vez que diminui as emissões de gases do efeito estufa se comparado aos combustíveis oriundos do petróleo, fato que ameniza os danos ambientais.

SANTOS (2001) define o efeito estufa como o aumento constante da temperatura média da Terra, em função de um acelerado acúmulo de gases na atmosfera, como o gás carbono, metano, hidrofluorcarbonos, hexafluoreto de enxofre, óxido nitroso e perfluorcarbonos. Isso aumenta a temperatura atmosférica, impulsionando a problemática da mudança climática.



Segundo LIMA et al. (2010), a prática da queima da cana no período de pré-colheita é realizada com o intuito de aumentar o rendimento do corte manual e auxiliar o preparo do terreno para novos plantios. Para eles, a prática da queima tem sido reduzida no Estado de São Paulo, em função da forte legislação ambiental e melhoramento das tecnologias de colheita mecanizada.

Uma das legislações aplicadas foi a Lei Estadual de Queima nº 11.241, decretada em setembro de 2002 no Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2002), que dispõe sobre a redução gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar até sua eliminação total, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1. Lei 11.241/2002 sobre a redução gradativa da queima da palha da cana.

Conforme a Lei Estadual de Queima 11.241, não pode queimar:		
Ano	Área mecanizável	Área não mecanizável
1º	(2002) 20% da área cortada	
5º	(2006) 30% da área cortada	
10º	(2011) 50% da área cortada	(2011) 10% da área cortada
15º	(2016) 80% da área cortada	(2016) 20% da área cortada
20º	(2021) 100% da área cortada	(2021) 30% da área cortada
25º		(2026) 50% da área cortada
30º		(2031) 100% da área cortada

Fonte: Adaptada de Estado de São Paulo (2002).

Neste sentido, LIMA et al. (2010) elaboraram uma estimativa de emissões de gases de efeito estufa provenientes da queima de resíduos da cana-de-açúcar no estado de São Paulo no período de 1986 a 2008, utilizando o método proposto pelo manual de inventário de gases de efeito estufa do IPCC (2006), e verificaram que os valores médios estimados de emissão de gases provenientes da queima de resíduos de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, no período de 1986 a 2008, foram de 60.462,68 t.

LIMA et al. (2010) observaram que entre os anos de 1986 a 2008, a área colhida de cana no Estado de São Paulo aumentou 170% e a produtividade cresceu 23%, ocasionando um acréscimo de 180% na produção (de 137.835.000 t em 1990 para 386.061.274 t em 2008). No entanto, as emissões dos gases CH<sub>4</sub>, CO, N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub>, aumentaram 20,6%, em função do aumento da mecanização da colheita no Estado.

A Figura 1, extraída de LIMA et al. (2010), demonstra a distribuição das emissões de metano provenientes da queima de cana-de-açúcar, no Estado de São Paulo em 2007 estimadas pelo método do IPCC (2006).

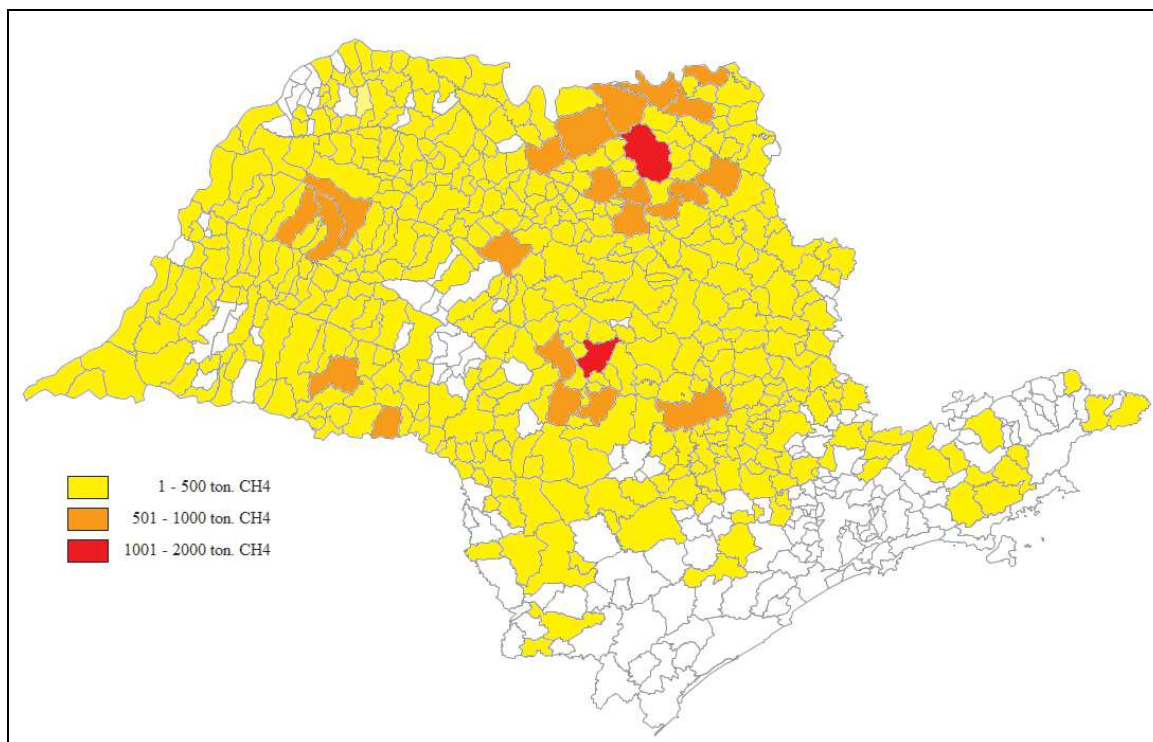


Figura 1. Distribuição municipal das emissões de metano provenientes da queima de cana-de-açúcar, no Estado de São Paulo estimadas pelo método do IPCC (2006).

Fonte: LIMA et al. (2010).

Em função desta problemática, surge em 04 de junho de 2007 o **Protocolo Agro-Ambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista** (SÃO PAULO, 2007), que tem por objetivo induzir a redução da queima da palha da cana-de-açúcar em prazo mais curto daquele previsto pela Lei Estadual de Queima (Lei 11.241/02). Este Protocolo de Cooperação Sucroalcooleiro (2007) foi acordado entre o Governo do Estado de São Paulo, a Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento e a União da Agroindústria Canavieira de São Paulo (UNICA).

Este Protocolo Sucroalcooleiro (SÃO PAULO, 2007) reafirma que o etanol oriundo de fonte renovável é uma opção economicamente viável para a diminuição do efeito estufa e importante instrumento para prevenção e controle da poluição atmosférica. E enfatiza ainda a preocupação com as mudanças climáticas no mundo, ressaltando que são necessárias medidas de responsabilidade das empresas públicas e privadas, a fim de evitar maiores danos

ambientais e conseqüentemente a queda da qualidade de vida da população. Sendo de vital importância o planejamento da expansão agrícola energética para que haja um desenvolvimento ordenado da economia paulista.

Conforme descrito na cláusula terceira do Protocolo Sucroalcooleiro (SÃO PAULO, 2007), os produtores de cana-de-açúcar e as indústrias preocupadas com a questão da emissão do gás carbono oriundo da queima da cana, se comprometeram-se a respeitar as seguintes diretrizes técnicas, devendo:

*A. Antecipar, nos terrenos com declividade até 12%, o prazo final para a eliminação da queimada da cana, de 2021 para 2014, adiantando o percentual de cana não queimada, em 2010, de 50% para 70%.*

*B. Antecipar, nos terrenos com declividade acima de 12%, o prazo final para a eliminação da queimada da cana, de 2031 para 2017, adiantando o percentual de cana não queimada, em 2010, de 10% para 30%.*

*C. Não utilizar a prática da queima da cana para fins de colheita nas áreas de expansão de canaviais.*

*D. Adotar ações para que não ocorra a queima, a céu aberto, do bagaço de cana, ou de qualquer outro subproduto da cana.*

*E. Proteger as áreas de mata ciliar das propriedades canavieiras, devido à relevância de sua contribuição para a preservação ambiental e proteção à biodiversidade.*

*F. Proteger as nascentes de água das áreas rurais do empreendimento canavieiro, recuperando a vegetação ao seu redor.*

*G. Implementar Plano Técnico de Conservação do Solo, incluindo o combate à erosão e a contenção de águas pluviais nas estradas internas e carreadores.*

*H. Implementar Plano Técnico de Conservação de Recursos Hídricos, favorecendo o adequado funcionamento do ciclo hidrológico, incluindo programa de controle da qualidade da água e reuso da água utilizada no processo industrial.*

*I. Adotar boas práticas para descarte de embalagens vazias de agrotóxicos, promovendo a tríplex lavagem, armazenamento correto, treinamento adequado dos operadores e uso obrigatório de equipamento de proteção individual.*

*J. Adotar boas praticas destinadas a minimizar a poluição atmosférica de processos industriais e otimizar a reciclagem e o reuso adequados dos resíduos gerados na produção de açúcar e etanol.”*

Observa-se que os itens A, B, C, D do protocolo tratam das diretrizes técnicas voltadas diretamente à questão da queima da cana, realçando a preocupação com as excessivas emissões de gases nocivos ao meio ambiente.

O Protocolo Sucroalcooleiro (SÃO PAULO, 2007) coloca em evidência o papel da Administração Pública que deve fomentar pesquisas voltadas ao aproveitamento energético e econômico da palha da cana; deve também incentivar instalações de infraestrutura logística sustentável para circulação dos produtos da cana, com ênfase nas exportações; conceder certificado de conformidade Agro-Ambiental aos produtores que aderirem ao protocolo; bem como estimular a adequada transição do sistema de colheita de cana crua, especialmente para os pequenos e médios produtores com até 150 hectares.

Deste modo a regulamentação dada pelo protocolo desencadeia uma série de iniciativas no sentido de destinar o aproveitamento da cana, já que a palha não poderá mais ser queimada ao fim das colheitas. Em geral, todos os produtores serão obrigados a remanejar toda a matéria seca, gerada após a colheita da cana, para o reaproveitamento, a fim de que se transforme em energia renovável. Desta maneira poderá ser aproveitada para queima na usina e produzir energia elétrica.

Com isto, a cana-de-açúcar torna-se matéria-prima de interesse às indústrias nacionais, pois proporciona auto-suficiência energética no setor sucroalcooleiro, porque, além de produzir diversos produtos como o etanol, o açúcar, a aguardente, a rapadura, o melado, o adubo orgânico, a silagem para alimentação animal, ela ainda gera energia elétrica, ou seja, toda energia utilizada no processamento industrial é oriunda da própria cana-de-açúcar. O que reforça a afirmação de BARROS (2007) quando ressalta que as fontes de energias renováveis já demonstraram poder sustentar a economia mundial de diversas maneiras.

Para BARROS (2007), a política dos biocombustíveis alternativos deve ser pensada estrategicamente, pois é necessário avaliar as potencialidades da produção agrícola de cada região, o desempenho energético e ambiental de cada cultura.

De acordo, com VEIGA FILHO et al. (2010), em 2007 o Brasil foi responsável por 19,88% da produção mundial de álcool etílico. Atualmente, existem mais de 400 usinas e destilarias no país.

Dados do IBGE indicam o aumento, ano a ano, das áreas plantadas (Figura 2) e Quantidade Produzida (Figura 3) da cana do ano de 1990 a 2010.

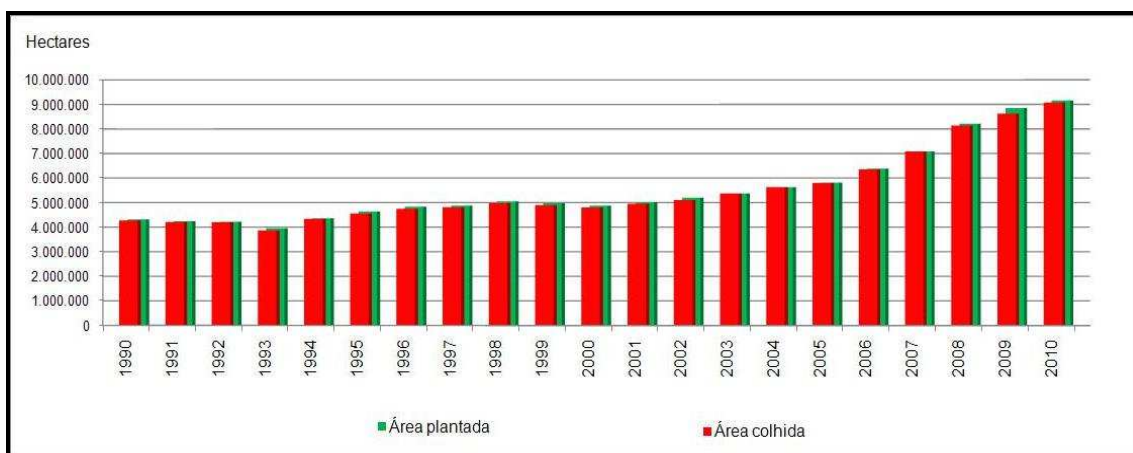


Figura 2. Área plantada da cana entre 1990 a 2010. Fonte: IBGE (2010).



Figura 3. Quantidade de cana Produzida entre 1990 a 2010. Fonte: IBGE (2010).

Dados da CONAB (2011) afirmam que os maiores índices de aumento de área cultivada ocorreram nos Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais. Sendo que o Estado de São Paulo possui papel significativo na produção nacional, uma vez que produz mais da metade da cana-de-açúcar do Brasil.

Segundo o IBGE (2010), o Estado de São Paulo produziu 426 milhões de toneladas de cana em 2010, valor que representa quase 60% da produção nacional, e com uma área colhida de 4,9 milhões de hectares, o que representa aproximadamente 55% da área nacional plantada com cana-de-açúcar. A produção de 2010 rendeu ao Brasil pouco mais de 28 bilhões de reais conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Área colhida, quantidade produzida e valor da produção da Cana em 2010.

Brasil, Região e UF	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida		Valor da produção (Mil Reais)
		Toneladas	%	
<b>Brasil</b>	<b>9.076.706</b>	<b>717.462.101</b>		<b>28.313.638,00</b>
<b>Norte</b>	<b>32.302</b>	<b>2.071.620</b>	<b>0,29</b>	<b>190.406,00</b>
Rondônia	3.824	233.527	0,03	9.195,00
Acre	1.999	107.251	0,01	9.684,00
Amazonas	5.258	341.186	0,05	71.747,00
Roraima	420	1.455	0,00	509,00
Pará	10.891	668.738	0,09	29.621,00
Amapá	130	4.146	0,00	1.712,00
Tocantins	9.780	715.317	0,10	67.938,00
<b>Nordeste</b>	<b>1.233.739</b>	<b>68.789.726</b>	<b>9,59</b>	<b>4.039.931,00</b>
Maranhão	50.477	3.176.531	0,44	329.813,00
Piauí	12.841	779.084	0,11	39.907,00
Ceará	43.024	2.306.004	0,32	114.556,00
Rio Grande do Norte	65.320	3.962.017	0,55	192.814,00
Paraíba	123.691	5.646.151	0,79	292.685,00
Pernambuco	361.253	19.704.071	2,75	1.261.280,00
Alagoas	433.725	24.352.340	3,39	1.245.712,00
Sergipe	46.665	2.994.819	0,42	188.010,00
Bahia	96.743	5.868.709	0,82	375.154,00
<b>Sudeste</b>	<b>5.947.840</b>	<b>498.884.508</b>	<b>69,53</b>	<b>18.474.983,00</b>
Minas Gerais	746.527	60.603.247	8,45	2.387.347,00
Espírito Santo	81.393	5.314.685	0,74	249.667,00
Rio de Janeiro	133.286	6.394.477	0,89	210.872,00
<b>São Paulo</b>	<b>4.986.634</b>	<b>426.572.099</b>	<b>59,46</b>	<b>15.627.096,00</b>
<b>Sul</b>	<b>671.330</b>	<b>50.286.221</b>	<b>7,01</b>	<b>1.950.478,00</b>
Paraná	625.885	48.361.207	6,74	1.767.438,00
Santa Catarina	9.511	422.014	0,06	40.467,00
Rio Grande do Sul	35.934	1.503.000	0,21	142.573,00
<b>Centro-Oeste</b>	<b>1.191.495</b>	<b>97.430.026</b>	<b>13,58</b>	<b>3.657.840,00</b>
Mato Grosso do Sul	399.408	34.795.664	4,85	1.445.114,00

Mato Grosso	212.498	14.564.724	2,03	560.207,00
Goiás	578.666	48.000.163	6,69	1.648.003,00
Distrito Federal	923	69.475	0,01	4.516,00

Fonte: IBGE - Produção Agrícola Municipal (2010).

A produção de cana-de-açúcar é fundamental para o Estado de São Paulo, pois contribui significativamente para o seu desenvolvimento econômico, gerando empregos, renda, divisas e tributos para toda cadeia produtiva (SÃO PAULO, 2002).

O levantamento da safra 2011/12 da cana-de-açúcar, realizado pela CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), indica que a previsão do total de cana moída é de 571.471,0 milhões de toneladas, sendo que 283,9 milhões de toneladas (47,3% do total) deverão ser destinadas para a produção de açúcar e 287,6 milhões de toneladas de cana (51,88%) deverão ser usadas para a produção de etanol que estima produzir 22.857,6 bilhões de litros, que serão divididos em 9.069,3 bilhões de litros de etanol anidro e 13.788,3 bilhões de litros de etanol hidratado.

Conforme a CONAB (2011) os maiores produtores são os Estados de São Paulo com 52,2% (4.370 mil ha), seguido por Minas Gerais com 8,87% (742,65 mil ha), Goiás com 8,1% (678,42 mil ha), Paraná com 7,3% (611,44 mil ha), Mato Grosso do Sul com 5,7% (480,86 mil ha), Alagoas com 5,45% (463,65 mil ha) e Pernambuco com 3,89% (326,11 mil ha), conforme mostra a Figura 4.

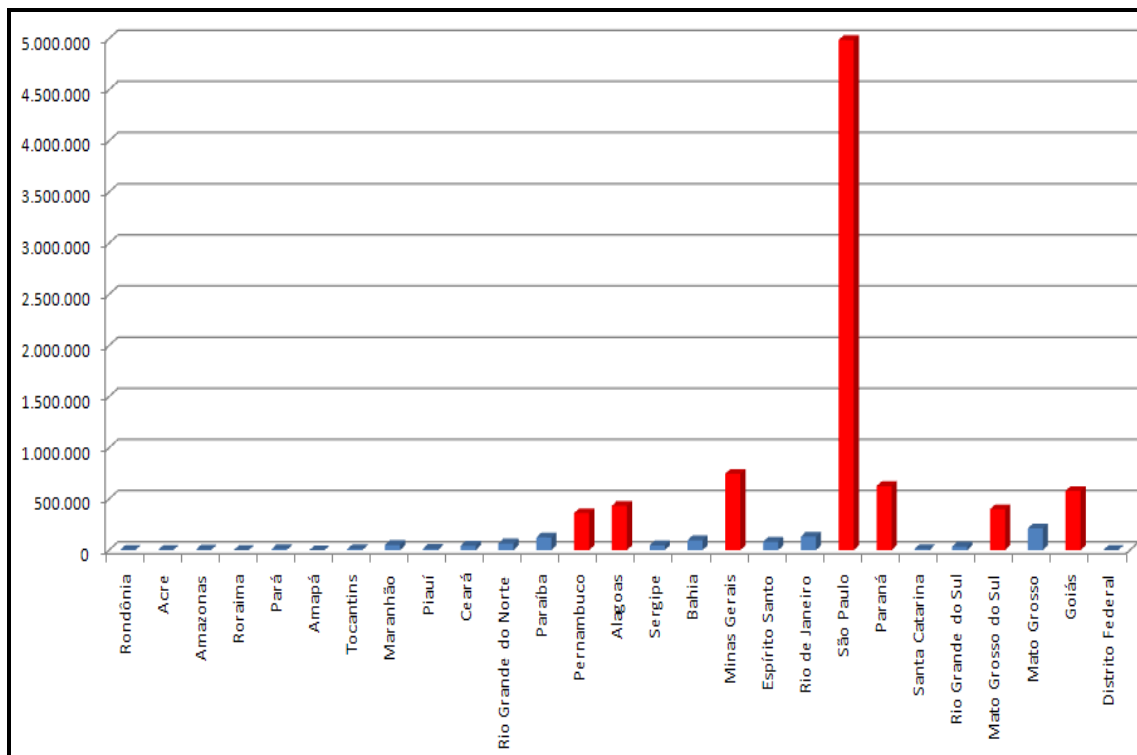


Figura 4. Área plantada de Cana-de-açúcar em 2010.

Fonte: Adaptado da IBGE (2010).

Diante deste contexto, observa-se que estimar a quantidade de cana e palha que estarão disponíveis no campo para ser reaproveitada, torna-se um dos desafios dos próximos anos, primeiro porque pode ser utilizada na queima para geração de energia elétrica e segundo, porque pode ser transformada em álcool por processos químicos.

SUGAWARA e RUDORFF (2011) ressaltam que é importante acompanhar o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, por meio de imagens de sensoriamento remoto, para estimar a produtividade agrícola, otimizando-se o planejamento dos produtos derivados da cana.

O fato de o Brasil ser um grande produtor de cana-de-açúcar reforça como é imprescindível aprofundar o conhecimento sobre esta cultura, no que tange ao acompanhamento e melhoramento do ciclo vegetativo, estimativa da produção com o intuito de otimizar o processamento industrial, reaproveitar a matéria seca, gerar energia limpa e beneficiar os setores de planejamento das usinas canavieiras, bem como a comunidade científica que a partir destes resultados poderão auxiliar no aperfeiçoamento das técnicas e modelagens matemáticas para estimar a produtividade da cana e de sua matéria seca.



Para enfrentar este desafio, novas tecnologias estão sendo testadas com o objetivo de analisar o seu potencial em identificar a quantidade de folhas e matéria seca gerada após um ciclo vegetativo da cana-de-açúcar.

O difícil acesso aos campos agrícolas devido à vasta dimensão de área plantada de diversas culturas fez surgir um aumento pela demanda de informações oriundas do sensoriamento remoto.

Um dos vários problemas da efetiva utilização da palha é a sua quantificação (variedade, período de safra e idade) segundo CORTEZ e LEAL (2010). Por este motivo, técnicas de sensoriamento remoto estão sendo utilizadas para acompanhamento de alvos agrícolas com bons resultados e apresentando alto potencial de utilização (STRECK et al. 2002 e GOETZ et al., 2009).

As folhas da cana tornaram-se foco desta pesquisa por serem destaques nas questões ambientais e econômicas (fim das queimadas, balanço de carbono, melhora na qualidade do ar, transformação para etanol e energia elétrica), por esta razão, propõe-se uma possível substituição das estimativas da palha, realizadas atualmente com muito trabalho de campo, por outra ferramenta, o Sensoriamento Remoto.

## **Cana-de-açúcar – Planta**

A cana-de-açúcar pertence à família das gramíneas semiperenes, pertencente ao gênero *Saccharum*, apresenta máximo potencial de crescimento na fase vegetativa, e por meio de um déficit hídrico ou térmico, acumula altos níveis de sacarose nos colmos (SCARPARI e BEAUCLAIR, 2010).

De acordo com BRUNINI (2010), a cana-de-açúcar é cultivada predominantemente em regiões tropicais e subtropicais, aproximadamente entre as latitudes 35°N a 35°S, pois possui grande capacidade de adaptação climática.

Basicamente, o ciclo vegetativo da cana inicia-se com o plantio da muda, que germina, perfilha, amadurece e recebe o primeiro corte, conforme explicam SEGATO et al. (2006).

SUGAWARA e RUDORFF (2011) ao descrevem o ciclo da cana, destacam dois tipos: a cana de primeiro corte recebe o nome de cana-planta de ano (12 meses) e a cana-planta de ano e meio (18 meses), e que após o primeiro corte, os estágios de corte seguintes são denominados de cana-soca, a cada corte ocorre a brotação da soqueira e o início de um novo estágio de corte.

SEGATO et al. (2006) ressaltam que quanto maior o número de cortes de cana-soca, menor será a produtividade desta lavoura, sendo necessário reformar esta lavoura e plantar uma nova cana-planta.

BENVENUTI (2005) que estudou a relação entre imagens do sensor ETM+/Landsat 7 e a produtividade da cana avaliando a influência dos atributos físicos e químicos do solo sobre a variação dos dados espectrais em 15 talhões no município de Santa Maria da Serra (SP), lembra que as variedades da cana são consideradas precoces quando a colheita é realizada no início de safra (entre maio e junho), as variedades médias acontecem quando a colheita ocorre no meio da safra (entre julho e setembro) e as tardias quando a colheita ocorre no fim da safra (entre outubro e novembro).

A CONAB (2011) reforça que uma lavoura de cana reformada produz em média 115 t/ha e o canavial que está no sexto ano tem média inferior a 55 t/ha, resultando numa diferença bastante significativa de 60 t/ha, o que faz as usinas repensarem sobre o custo benefício de uma safra de cana-soca que já passou por inúmeros cortes.

Segundo a CONAB (2011), o sistema usual de plantio da cana é o convencional, em que a cana-de-açúcar é cultivada em solos bem preparados com revolvimento de 20 a 30 centímetros. As mudas de cana-planta de ano ou cana-planta de ano e meio recebem tratamento preventivo com fungicida e inseticida para ficarem livres de pragas e doenças.

A CONAB (2011) elucida que o consumo de mudas por hectare é de 15 toneladas, em média. Quando o plantio é mecanizado, o consumo de cana (muda) aumenta, chegando a ultrapassar 20 toneladas.

BENVENUTI (2005) ressalta que o número de folhas verdes é pequeno em plantas jovens e aumenta na medida em que os colmos crescem, até fechar o dossel. Esclarece ainda que canas cultivadas com boas condições de luminosidade têm os colmos mais grossos e mais retos, as folhas mais largas, mais grossas e mais verdes e as raízes mais desenvolvidas.

SCARPARI e BEAUCLAIR (2010) colocam que à medida que planta cresce, as folhas mais velhas diminuem suas atividades e com o passar do tempo morrem e se desprendem do colmo.

ALEXANDER (1973) ressalta que a taxa de fotossíntese de um determinado dossel de cana varia de acordo com as condições das folhas, tais como: a idade, posição relativa ao sombreamento, geometria relativa à radiação solar, conteúdo de clorofila, conteúdo de água, situação nutricional da folha. Ele ainda salienta que próxima à fase de maturação ocorre a diminuição da atividade fotossintética e também ocorre o acúmulo de matéria seca em que a maioria das folhas entram na senescência, explica ainda que as condições climáticas influenciam na intensidade desse fenômeno.

De modo geral, declividade menor que 12° favorece o cultivo da cana, devido à utilização de maquinários agrícolas durante a colheita da safra, e para colheita manual, não há qualquer exigência quanto à declividade.

Segundo PRADO et al. (2010) os solos mais representativos para a plantação de cana no Estado de São Paulo são os latossolos vermelhos, latossolos vermelhos-amarelos e os argissolos vermelhos-amarelos.

DOORENBOS e KASSAM (1979) afirmam que a cana se desenvolve-se melhor em condições de temperatura e umidade elevadas, caracterizando-se essencialmente como uma planta tropical. Eles ainda listaram as temperaturas ótimas para a fase do brotamento em que o ideal é de 32°C a 38°C e a fase do crescimento da cana em que o recomendado é entre 22°C a

30°C. No entanto, para a maturação, são convenientes temperaturas relativamente baixas, de 20°C a 10°C.

CASAGRANDE (1991) reforça que, geralmente, a cana necessita de temperaturas elevadas, radiação solar intensa e precipitações regulares de seis a oito meses para que haja crescimento vegetativo vigoroso. Em seguida, é necessária uma estação seca e/ou temperaturas baixas de quatro a seis meses, pois não favorece o seu crescimento e beneficia o acúmulo de sacarose.

## **Matéria Seca, Fibras e Componentes**

FERNANDES (2000) define a matéria seca como sendo os colmos somados às impurezas da cana (plantas daninhas e terras) retiradas no momento da colheita. O autor conceitua a fibra como matéria insolúvel em água contida na cana. Ressalta que “a fibra botânica é aquela determinada quando a análise é realizada em colmos limpos (celulose, hemicelulose, lignina, pectina e outros componentes da parede celular)” e a fibra industrial é analisada sem separar as impurezas da análise que aumentam os sólidos insolúveis (palha, plantas daninhas, ponteiro de cana, terra, etc.).

RIPOLI e RIPOLI (2010) conceituam as diferenças técnicas entre palha, palhada e palhiço. A palha é considerada como sendo apenas a folha seca, agregada ao colmo ou já caída no chão. A palhada é considerada a parte da biomassa remanescente após a colheita, ou seja, as folhas e ponteiros com teor de umidade menor que 15%. O palhiço é considerado como sendo todas as folhas, os colmos, as plantas daninhas e as partículas de terras.

FERNANDES (2000) enfatiza que a fibra é de grande importância na indústria canavieira, pois as variedades de cana mais ricas em fibras possuem maior resistência ao tombamento, são mais resistentes à penetração de pragas nos colmos, são utilizadas para queima nas caldeiras gerando energia elétrica por meio do vapor, que abastecerá a indústria e seu excedente será vendido para a sociedade.

Outro benefício é que a biomassa da cana é técnica e economicamente mais competitiva do que outras fontes geradoras de energia, pois sua utilização promove auto-suficiência energética, bem como a geração de empregos local e descentralizada, de modo a reduzir o êxodo rural (RIPOLI e RIPOLI, 2010).

KOKALY et al. (2009) ressaltam que pelo fato da celulose e da lignina serem componentes primários da palha da planta, a identificação da feição lignocelulose é importante na estimativa dos resíduos de cultura.

Existem algumas tecnologias que aproveitam tanto o bagaço quanto a palha para produzir álcool, como por exemplo, a empresa Dedini que iniciou o projeto Dedini Hidrólise rápida, que por meio da hidrólise ácida quebra a molécula de celulose contida na palha em açúcares menores, que por sua vez, sofrem fermentação alcoólica e deste modo, produz o etanol. Para cada tonelada de bagaço são produzidos mais de 100 litros de álcool, com um potencial de 180 litros por tonelada (ROSSETO, 2010).

KOKALY et al. (2009) elucidam que a celulose é um constituinte bioquímico abundante nas folhagens das plantas, ela representa feições de absorção fortes e sobrepostas com a lignina e proteínas. Os autores afirmam que pesquisas acerca da separação e quantificação dos componentes podem auxiliar no desenvolvimento de melhores algoritmos para quantificação de constituintes bioquímicos e para caracterização da qualidade da matéria seca e resíduo de cultura. Eles definem a celulose como um polímero de moléculas de glicose sendo o principal constituinte das paredes celulares das plantas e sua função é proporcionar força e vitalidade às células parênquimas. A lignina é um dos compostos complexos polifenólicos das plantas e é utilizada nas paredes celulares secundárias do xilema (fibras vasculares). A celulose e lignina são entrelaçadas de maneira complexa, juntamente com outros polissacarídeos, nas paredes celulares das plantas, e o espectro deles tem feições de absorções largas e sobrepostas. A lignina e a celulose são responsáveis pela rigidez e vigor das paredes celulares das plantas. A lignina é resistente até a decomposição e as concentrações de lignina em palhas mostram uma forte influência no ciclo dos nutrientes do solo.

## Sensoriamento Remoto

COLWELL (1983) conceituou o sensoriamento remoto como sendo *a medição ou aquisição de informação de alguma propriedade de um objeto ou fenômeno, por um dispositivo de registro que não esteja em contato físico com o objeto ou fenômeno em estudo.*”

NOVO (2008) ressalta que estes conceitos são muito amplos e define o sensoriamento remoto como sendo a utilização conjunta de sensores e equipamentos para processamento e transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves ou outras plataformas, com a finalidade de estudar fenômenos, processos e eventos que ocorrem na superfície Terrestre por meio do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diferentes manifestações, fato que favorece o monitoramento de extensas áreas agrícolas, como por exemplo, a cana-de-açúcar.

Para CRÓSTA (2002) as imagens de sensoriamento remoto estão sendo cada vez mais utilizadas como base de conhecimento para pesquisas ambientais, cartográficas, agrícolas, meteorológicas, florestais, geológicas, urbanas, etc.

NOVO (2008) enfatiza vários exemplos das aplicações do sensoriamento remoto, como por exemplo, estudos e monitoramento dos processos da hidrosfera, monitoramento das emissões térmicas nas regiões costeiras, qualidade da água, variação sazonal das propriedades da água, mapeamento da distribuição de sedimentos em reservatórios hidrelétricos, mapeamento da vegetação aquática, determinação do campo de vento de superfície sobre os oceanos, avaliação de sensores de alta resolução em estudos urbanos e em cartografia, aperfeiçoamento das estimativas agrícolas, análise da capacidade de diferentes sensores na discriminação das variedades dentro de uma mesma cultura agrícola, estudos florestais, avaliação dos níveis de deficiência nutricional de culturas agrícolas, estudos de ocorrência de queimadas e cicatrizes do fogo, geologia, etc.

No entanto, a autora elucida que uma das principais aplicações do sensoriamento remoto na agricultura é auxiliar as estimativas de safras agrícolas, que são essenciais, pois fornecem subsídios para o planejamento agrícola, orientam as decisões do mercado agrícola e podem afetar a escolha da cultura que será plantada, sua comercialização e o seu preço no mercado agrícola.

ASSAD et al. (1993) acrescentam que a disponibilidade de informações confiáveis são fundamentais para tomadas de decisões no planejamento agrícola, na definição das prioridades e na liberação de recursos pelos setores privados e públicos.

CRÓSTA (2002, p.9) explica que *“as imagens de sensoriamento remoto passaram a representar uma das únicas formas viáveis de monitoramento ambiental em escalas locais e globais, devido à rapidez, eficiência, periodicidade e visão sinóptica que as caracterizam.”*

JENSEN (2009) define os dois principais tipos de sensores existentes. Leia-se:

*“os sistemas multiespectrais de sensoriamento remoto registram a energia refletida ou emitida de um objeto ou área de interesse em múltiplas bandas (regiões, canais) do espectro eletromagnético. Os sistemas hiperespectrais de sensoriamento remoto registram dados em centenas de bandas.”*

Atualmente, existem catálogos de imagens de satélite com diferentes características, resoluções (espaciais, espectrais, radiométricas entre outras). Cada imagem de satélite atende a uma determinada problemática, pois possui características específicas.



## **Sensores Hiperespectrais**

JENSEN (2009) define espectrometria de imageamento ou sensoriamento hiperespectral como a aquisição simultânea de imagens em centenas de bandas espectrais relativamente estreitas, contíguas e/ou não-contíguas do espectro eletromagnético.

CHANG (2003) define que uma imagem de sensoriamento remoto hiperespectral é efetivamente uma imagem cúbica com três dimensões definidas por comprimento de ondas espectrais e representadas por centenas de bandas espectrais contínuas. Cada informação espectral entre as bandas é muito útil e pode ser usada para caracterização espectral.

NOVO (2008) esclarece que sensores hiperespectrais permitem a aquisição de espectros contínuos para cada pixel da imagem e que seu componente fundamental é o sistema de dispersão da radiação eletromagnética que permitem decompô-la em pequenos intervalos de comprimentos de onda, para que cada intervalo possa incidir sobre uma matriz de detectores.

CHANG (2003) ressalta que o imageamento hiperespectral está crescendo rapidamente no sensoriamento remoto e que tem se expandido e melhorado a capacidade das análises se comparada às imagens multiespectrais. Uma vez que a informação espectral fornecida por cada pixel da imagem hiperespectral pode melhorar a detecção, discriminação, classificação e identificação material.

JENSEN (2009) enfatiza que quanto maior o número de bandas espectrais, maior a possibilidade de extrair informações detalhadas de alvos na superfície terrestre.

Por esta razão, esta pesquisa utilizou-se de ferramentas de espectralradiometria, com o intuito de adquirir maior detalhamento e qualidade dos dados coletados.

## Comportamento Espectral da Vegetação

A priori, é importante frisar que diversos fatores, como por exemplo, as propriedades físico-químicas e biológicas, influenciam o comportamento espectral de um alvo, seja ele, o solo, a água, as gramíneas, os tipos de florestas, as matérias secas de plantas, dentre outros. Neste sentido, alguns pesquisadores descrevem, a seguir, conceitos básicos sobre comportamento espectral da vegetação.

A princípio, leia-se as considerações de GATES et al. (1965), que esclarecem que os pigmentos, as estruturas celulares e os espaços ocupados pela água e pelo ar influenciam na quantidade de energia refletida pelas folhas. Além dos mecanismos citados por GATES et al. (1965), GAUSMAN (1985) acrescenta que o conteúdo de água, a idade da folha, posição nodal, condição de iluminação, pubescência e senescência influenciam a energia refletida pelas folhas. Para analisar o comportamento espectral de um alvo, é necessário conhecer três parâmetros básicos que, podem ocorrer quando um fluxo de radiação eletromagnética incide sobre uma superfície terrestre, são eles: refletância, absortância e transmitância. No caso da aplicação do sensoriamento remoto no estudo dos recursos naturais, a refletância é o processo mais relevante na interação entre a radiação e o alvo.

PONZONI e SHIMABUKURO (2009) ressaltam que uma das grandezas radiométricas mais utilizadas para caracterizar o comportamento espectral de um alvo é o Fator de Refletância Bidirecional, definida como a razão entre a radiância da amostra e a radiância de uma superfície lambertiana ideal (placa de sulfato de bário ou óxido de magnésio), em semelhantes condições de iluminação e observação. Completam que o Fator de Refletância Direcional-Hemisférica é definido pela iluminação direcional, uma vez que os valores dos ângulos azimutais e zenitais são conhecidos e a coleta da radiação refletida deve ser feita por meio de uma esfera integradora.

Alguns autores explicam de maneira didática os fatores químicos e estruturais que influenciam na refletância espectral de uma folha nas diferentes regiões do espectro óptico, principalmente, no visível, infravermelho próximo e infravermelho médio (GATES et al., 1965; GAUSMAN, 1985; MOREIRA, 2011; PONZONI e SHIMABUKURO, 2009).

Na região do visível, a refletância espectral é dominada pela influência dos pigmentos das folhas (clorofila, carotenos e xantofilas), ressaltando que somente a clorofila absorve radiação na faixa do vermelho. Entretanto, vale ressaltar que, sem a presença da água, a folha

absorverá menos, devido à degradação química das proteínas e dos pigmentos. Na região do infravermelho próximo, o comportamento espectral é dominado pela estrutura celular interna da folha e pelo conteúdo de água, ou seja, quanto menor a quantidade de água no interior da folha, maior será o espalhamento da radiação, e conseqüentemente os valores dos fatores de refletância dessa folha serão maiores. Já no infravermelho médio, a água domina a refletância espectral da folha, pois absorve significativamente a radiação incidente entre 1300 a 2000 nm, ou seja, quanto mais seca estiver a folha, maiores serão os fatores de refletância, sem a presença da água na folha, ocorrerá degradação das proteínas e dos pigmentos em sua estrutura, a folha absorverá menos radiação, aumentando os valores de fator de Refletância (GATES et al., 1965; GAUSMAN, 1985; MOREIRA, 2011; PONZONI e SHIMABUKURO, 2009).

Existem diversas maneiras para capturar o comportamento espectral de um alvo, como por exemplo, por meio de sensores a bordo de aeronaves e/ou satélites, ou até mesmo por meio de equipamentos portáteis levados ao campo e/ou laboratórios. No caso deste trabalho, foi acoplado ao espectrorradiômetro FieldSpec\* Pro um equipamento denominado *Leaf-clip*, que permite medições comparáveis a de uma esfera integradora, ou seja, sem interferências atmosféricas.

## **Espectroradiometria**

JENSEN (2009) ressalta que o espectro de refletância na região entre 400 e 2500 nm pode identificar diferentes classes de materiais que não podem ser identificados com imageamento de banda larga ou baixa resolução espectral.

Vários autores (NAGLER et al., 2000; DAUGHTRY, 2001; DAUGHTRY et al., 2004, 2005, 2006, 2010; DAUGHTRY e HUNT JR., 2008; ) identificaram absorção associada à lignina e à celulose próximas a 2100 nm no espectro da palha seca de diversas culturas, utilizando-se de dados de sensoriamento remoto.

Outros trabalhos (DAUGHTRY et al., 2004, 2005, 2010) observaram faixa de absorção, associada com a celulose e lignina, próximas a 2100  $\mu\text{m}$  e 2300  $\mu\text{m}$ .

DAUGHTRY et al. (2009) observaram que feições de absorção, próximas a 1710, 2100 e 2350 nm, foram amplamente correlacionadas com a concentração de hemicelulose, celulose e lignina.

Alguns autores (NAGLER et al., 2000; DAUGHTRY, 2001; STRECK et al., 2002; DAUGHTRY et al., 2004; DAUGHTRY et al., 2005; DAUGHTRY e HUNT JR., 2008; DAUGHTRY et al., 2009; SERBIN et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2010) afirmam que sensores hiperespectrais e com faixas estreitas geram resultados mais consistentes e próximos da realidade. E muitos autores vão mais além, reforçando que sensores multiespectrais e com bandas largas produzem resultados inconsistentes para estimativa de matéria seca.

Determinar a quantidade de lignina, celulose e hemicelulose da palha é importante porque estes componentes são responsáveis pela estrutura fibrosa de algumas culturas, como por exemplo, a da cana-de-açúcar, e esta estrutura fibrosa determina a quantidade de etanol e energia que será gerada a partir desta matéria seca.

LAVANHOLI (2010) explica que a fibra da cana é significativa para a cogeração de energia, que por sua vez, movimenta a própria usina canavieira para produção de diversos produtos e subprodutos. A energia excedente é vendida para companhias energéticas, ou seja, a cana produz açúcar, álcool e energia, tornando a usina autossuficiente, de forma que haja “*aproveitamento industrial ecologicamente correto*” da matéria seca sem desperdício de energia.

DAUGHTRY (2001) afirma que quantificar coberturas de resíduos de culturas é importante para avaliar a eficiência das práticas de conservação das lavouras e para estimar o

balanço de energia da superfície, bem como os ciclos dos nutrientes. Ele ainda salienta que os métodos tradicionais para quantificar os resíduos de cultura exigem intensos trabalhos de campo e geralmente são inadequados para uma avaliação rápida dos resíduos em muitos campos agrícolas.

MACHADO (1981) simulou o acúmulo de matéria seca para a cana-de-açúcar, utilizando-se de dados meteorológicos medidos durante a experimentação e modelos propostos para estimativas das taxas de fotossíntese e de respiração. A simulação apresentou resultados consistentes se comparado aos resultados obtidos experimentalmente. O modelo, levemente, superestimou os valores experimentais na fase intermediária de crescimento da cana, e subestimou nas fases, inicial e final, conforme mostra a Figura 5.

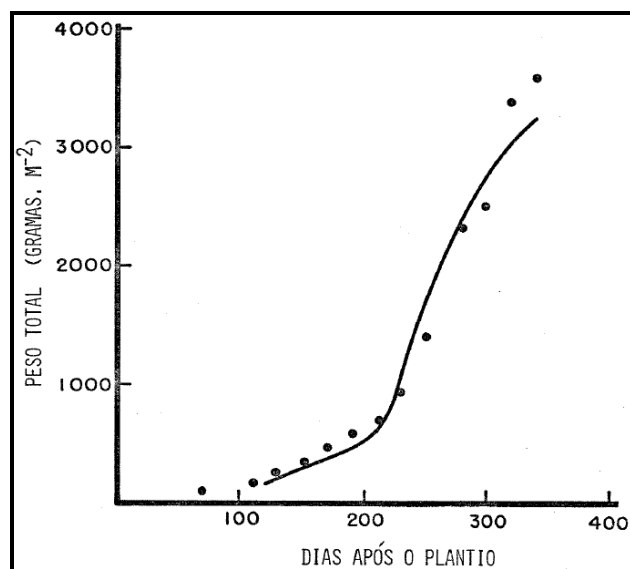


Figura 5. Experimento (pontos) e simulação (linha) para medir acúmulo de matéria seca.

Fonte: MACHADO (1981).

Os resultados de MACHADO (1981) ilustrados na Figura 5 demonstram que os pontos representam o acúmulo de peso seco medido e a linha representa o acúmulo de peso seco simulado para a cana, variedade NA 56-79, em Piracicaba-SP. A simulação elaborada pelo autor aproximou-se consideravelmente à realidade, fato que demonstra que modelos matemáticos aliados às informações detalhadas da cultura podem se tornar excelentes estimadores de produtividade.

A seguir, serão apresentados trabalhos que utilizaram como ferramenta de estudo espectrorradiômetros e matérias secas, nos quais foram obtidos bons resultados e que serviram de base para fundamentar esta pesquisa.

Antes de qualquer argumentação, cabe esclarecer que esta pesquisa tem como uma de suas primordiais fontes, os estudos realizados por Paul J. Curran em 1989.

CURRAN (1989) ressalta três argumentos para estimar o conteúdo químico foliar utilizando-se de dados de sensoriamento remoto: O primeiro deles é pela necessidade da informação sobre a química foliar, uma vez que mensurar o teor químico foliar fornece indicadores de produtividade da planta (ex. níveis de clorofila), fornece também o índice de decomposição da palha (ex. níveis de lignina) e a disponibilidade de nutrientes (ex. nitrogênio) em determinada cultura, no espaço e no tempo. O segundo motivo é aumentar o entendimento do espectro foliar, como demonstra o histórico científico produzido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, que em 1960, apresentou um avanço com o registro de 42 feições de absorção com medidas de espectroscopia detalhada. E em 1970, correlacionaram estas menores feições de absorção com a concentração de componentes orgânicos (ex. celulose, lignina, proteína, óleo, açúcar, amido) em folhas secas. A terceira razão para estimar o conteúdo químico foliar utilizando-se de dados de sensoriamento remoto é o aumento da capacidade para mensurar o espectro foliar.

CURRAN (1989) reuniu 42 feições de absorções relacionadas às concentrações químicas foliares numa tabela, dessas feições foram relacionados apenas os componentes focos deste trabalho, sendo a lignina, celulose e hemicelulose (Tabela 3).

Tabela 3. Feições de absorção associada à concentração de lignina, celulose e hemicelulose.

Comprimento de Onda ( $\mu\text{m}$ )	Ligação química	Componente químico
1,12	Estiramento C-H, 2° sobretom.	Lignina
1,20	Dobramento angular O-H, 1° sobretom	Água, celulose, amido e lignina
1,42	Estiramento C-H, deformação C-H	Lignina
1,45	Estiramento O-H, 1° sobretom, Estiramento C-H, deformação C-H.	Amido, açúcar, lignina e água.
1,49	Estiramento O-H, 1° sobretom	Celulose e açúcar
1,54	Estiramento O-H, 1° sobretom	Amido e celulose
1,69	Estiramento C-H, 1° sobretom	Lignina, amido, proteína e nitrogênio
1,78	Estiramento C-H, 1° sobretom / Estiramento O-H / deformação H-O-H	Celulose, açúcar e amido
1,82	Estiramento O-H, Estiramento C-O, 2° sobretom	Celulose
1,94	Estiramento O-H, deformação O-H	Água, lignina, proteína nitrogênio, amido e celulose
2,1	Dobramento angular O=H, Estiramento C-O, Estiramento C-O-C, 3° sobretom	Amido e celulose
2,27	Estiramento C-H, Estiramento O-H, Dobramento angular $\text{CH}_2$ , Estiramento $\text{CH}_2$	Celulose, açúcar e amido
2,28	Estiramento C-H, deformação $\text{CH}_2$	Amido e celulose
2,34	Estiramento C-H, deformação O-H, deformação C-H, Estiramento O-H	Celulose
2,35	Dobramento angular $\text{CH}_2$ , 2° sobretom, deformação C-H, 2° sobretom,	Celulose, proteína e nitrogênio

Fonte: adaptado de CURRAN (1989).

ELVIDGE (1988) desenvolveu uma equação para converter números digitais do sensor hiperespectral *AVIRIS* (*Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer*) para fator de refletância e observou feições de absorções de lignina e celulose em 2,09; 2,26 e 2,33  $\mu\text{m}$  na refletância espectral de gramíneas secas, matas de chaparral e folhas largas de florestas perenes. O índice de vegetação lignocelulose foi calculado pela diferença entre a refletância das bandas com comprimento de onda centrais em 2,20  $\mu\text{m}$  (2,18 a 2,22  $\mu\text{m}$ ) e 2,35  $\mu\text{m}$  (2,31 a 2,38  $\mu\text{m}$ ), ou seja, a refletância em 2,20  $\mu\text{m}$  menos a refletância em 2,35  $\mu\text{m}$ .

MURRAY e WILLIAMS (1988) associaram a feição de absorção em 2100nm com açúcares, amido e celulose. Eles ressaltam que na palha a absorção em 2100nm ocorre mais provavelmente devido a celulose, hemicelulose, lignina e outros componentes estruturais, desde açúcar, amido. Os outros componentes não estruturais foram facilmente degradados por microorganismos.

NAGLER et al. (2000) mediram com espectroradiômetro a refletância espectral na faixa entre 400 e 2500 nm de 6 tipos de solos (secos e úmidos) e palhas de 2 culturas (milho e soja), 14 florestas e 2 gramados de diferentes idades. Eles observaram absorção associada à

lignina e à celulose em 2,1  $\mu\text{m}$  no espectro da palha seca, e afirmam que são necessários trabalhos utilizando novos sensores com bandas estreitas no SWIR (shortwave infrared – infravermelho de ondas curtas). Eles concluíram que palhas de plantas podem ser distinguidas dos solos por meio de feições de absorção lignocelulose na região do SWIR. Eles definiram o CAI – Índice de Absorção da Celulose - como o melhor índice para discriminar a palha dos solos. O CAI de palha seca foi significativamente maior que o CAI dos solos. O CAI diminui com a idade das palhas. Absorção da água domina as propriedades espectrais do solo e da palha, e reduz significativamente o CAI das palhas. Ocorre uma significativa separação dos comportamentos espectrais secos se comparado aos comportamentos espectrais úmidos. O CAI da palha úmida foi significativamente maior que o CAI do solo úmido. Os autores concluíram que o volume de umidade, a idade dos resíduos e o grau de decomposição afetam a refletância espectral e consequentemente o CAI dos resíduos de cultura. Reforçam ainda que a utilização do CAI (índice de absorção da celulose) na região do SWIR para estimar cobertura de palha deveria ser avaliado em coberturas naturais ou terras agrícolas, para que o CAI substitua o método atual e manual da quantificação da cobertura da palha.

DAUGHTRY (2001) determinou a refletância espectral de resíduos de cultura do milho, soja, trigo e alguns solos em função de volumes de água por meio do espectroradiômetro GER 3700, em laboratório. Estes alvos foram mensurados na faixa espectral entre 400 e 2400 nm em condições de grande umidade. Assim como NAGLER et al. (2000), DAUGHTRY (2001) também identificou que o espectro de resíduos de cultura seca apresentou clara feição de absorção próxima a 2100  $\mu\text{m}$ , associados com a lignina e celulose, ausente nos espectros de solos. O autor constatou que a relativa característica da faixa de absorção da lignina-celulose, definido com o CAI, foi positiva para todos os resíduos das culturas, exceto aqueles saturados com água. A água altera significativamente a refletância espectral dos resíduos de cultura úmidos, mas não impede a discriminação dos resíduos e dos solos utilizando o CAI. O autor encontrou variações no CAI relacionados aos teores de umidade e separou os materiais úmidos dos secos.

STRECK et al. (2002) efetuaram experimentos laboratoriais com o objetivo de testar a aplicação do sensoriamento remoto óptico (espectroradiômetro FieldSpec FR) para medir a quantidade de matéria seca residual do trigo e elaborar a modelagem da relação entre a quantidade de resíduos de trigo com os índices de refletância. Seis experimentos (três tipos de



solos com superfícies secas e três úmidas) e quantidades crescentes de resíduos de matéria seca do trigo foram usados (0, 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 800 e 1500 g/m<sup>2</sup>). Equações não-lineares foram usadas para estimar os elementos essenciais da matéria seca, por quatro índices de vegetação, o Índice de Absorção da Celulose – CAI (DAUGHTRY, 2001; NAGLER et al., 2000), Índice da Cultura por Diferença Normalizada – NDTI e o Índice por Diferença Normalizada utilizando imagens do satélite Landsat TM5 e TM7 – NDI. Os índices que apresentaram melhores resultados foram o CAI e NDI. Quando o CAI foi aplicado, o modelo foi bem executado, com um erro médio de aproximadamente 50g/m<sup>2</sup>, os resíduos foram discriminados no solo para quantidade de matéria seca de até aproximadamente 600 g/m<sup>2</sup>. Quando o NDI foi utilizado, o modelo foi capaz de discriminar apenas resíduos a partir do solo quando a matéria seca estava com menos que 300 g/m<sup>2</sup>, com um erro médio de estimativa melhor que 100 g/m<sup>2</sup>. Os resultados deste estudo foram muito bons, apesar de ter ocorrido certa limitação pelo fato de que os resíduos úmidos não foram considerados.

DAUGHTRY et al. (2004), mediram a refletância espectral de resíduos de cultura do milho, soja e solos em função da umidade e avaliaram os limites da discriminação que podem ser esperados das misturas dos alvos nas cenas das imagens. Eles utilizaram espectroscopia de campo e afirmam que a resposta espectral de resíduos de cultura, a matéria seca, mostrou uma clara faixa de absorção associadas com a celulose e lignina, em 2100 nm e 2300 nm. O Índice Cobertura Residual de Culturas (CRC) foi linearmente relacionada ( $r^2 = 0,89$ ) com o CAI, o qual foi definido com a profundidade relativa de absorção, nesta faixa. Eles observaram que coberturas de dosséis nas cenas foram atenuadas pelo CAI, mas foram linearmente relacionadas pelo NDVI ( $R^2 = 0,93$ ).

GALVÃO et al. (2005) utilizaram o sensor orbital hiperespectral Hyperion a bordo do satélite Earth Observing-1 (EO-1) para estudar cinco tipos de variedades da cana-de-açúcar, dentre as quais, está a SP81-3250, que é a variedade estudada neste trabalho. Os autores identificaram feições de absorção das cinco variedades da cana em 2103 e 2304 nm associada à lignina e celulose.

DAUGHTRY et al. (2005) avaliaram diversos índices espectrais na medição da Cobertura Residual de Culturas (CRC) da alfafa, milho, trigo, usando dados medidos em campo com espectroradiômetro e dados hiperespectrais do sensor AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer), a bordo de uma aeronave, em alta altitude, para

categorizar intensidades de solos de culturas em campos agrícolas baseados em CRC. Os resultados alcançados foram praticamente os mesmos que aqueles encontrados por NAGLER et al. (2000), indicando que a refletância espectral de resíduos de culturas foi associada com celulose e lignina em largas faixas de absorção entre 2100 e 2300 nm. O melhor índice foi baseado em bandas estreitas (intervalos de 10 – 50 nm) nas regiões espectrais entre 2000 a 2400 nm, onde foram linearmente relacionados à CRC.

DAUGHTRY et al. (2005) constataram que a cobertura residual de cultura é linearmente relacionada ao CAI e LCA. Eles utilizaram o CAI e o NDVI calculados a partir de dados do sensor aerotransportado AVIRIS para distinguir seis níveis de intensidade agrícola (intensiva, reduzida, conservada, vegetação amarela, vegetação verde, sem vegetação). Eles ainda sugeriram que levantamentos de práticas de manejo dos solos que afetam sua conservação e a dinâmica do carbono poderiam ser possíveis usando avançados sistemas de imageamento multiespectral ou hiperespectral.

DAUGHTRY et al. (2006) avaliaram diferentes índices espectrais para estimar coberturas residuais de culturas, do milho e da soja, utilizando-se de dados do sensor multiespectral Landsat TM e dados hiperespectrais do espectrômetro Hyperion EO-1 sobre regiões agrícolas para classificar intensidades da lavoura em campos agrícolas baseado em medidas espectrais em cobertura residual de culturas. Os autores verificaram que índices utilizando bandas do Landsat foram fracamente relacionados com a CRC, e quanto aos dados do Hyperion, a CRC foi linearmente relacionada com o CAI, do qual mensurou a intensidade relativa da celulose e lignina próximas de 2100 nm. Foram identificadas três classes de intensidades das culturas, correspondente à classe *intensiva* (menos de 15% de cobertura residual), *reduzida* (entre 15% e 30% de cobertura) e *conservada* (acima de 30% de cobertura residual na lavoura), sendo que houve acurácia em 66% a 68% da área analisada. O sensor Hyperion provou possuir resolução espacial e espectral apropriadas para avaliar a CRC.

BANNARI et al. (2006) compararam o potencial dos dados hiperespectrais (Sonda-1) com os multiespectrais de alta resolução espacial (IKONOS) para estimar e mapear os resíduos de colheita de trigo, ervilha e canola em terras agrícolas utilizando a abordagem restrita da análise de mistura espectral linear. Assinaturas espectrais puras de resíduos, solo nu e coberturas vegetais foram extraídas manualmente a partir de dados das imagens sem misturas dos alvos e validados contra o material coletado em campo utilizando o

espectroradiômetro GER 3700. A estimativa a partir dos dados IKONOS foram inferiores para alguns tipos de coberturas de resíduos, culturas e solos. Eles verificaram que o Sonda-1 apresentou melhor desempenho comparado ao IKONOS, devido principalmente à melhora das características espectrais das bandas, especialmente no SWIR, que é sensível aos resíduos (apresentando características de absorção da lignina e celulose), do solo e cobertura das culturas.

DAUGHTRY e HUNT JR. (2008) determinaram os efeitos dos conteúdos de água na estimativa da cobertura residual de cultura do milho, soja e alguns solos na faixa espectral de 400-2400 nm e propuseram uma metodologia para mitigar estes efeitos da umidade, usando modelo de mistura linear. Utilizando-se o espectroradiômetro FieldSpec Pro, os autores verificaram intensa absorção em 2100nm e que a presença de água atenuou o CAI e alterou o declive da cobertura residual versus a relação com o CAI. E ainda constataram que sistemas de imageamento multiespectral não promovem estimativas confiáveis da cobertura residual de cultura quando as cenas possuem alvos com diferentes quantidades de água, ou seja, a qualidade das estimativas feitas pelo CAI diminuem conforme o aumento da água nestes alvos.

DAUGHTRY et al. (2009) calcularam as mudanças na composição da palha do trigo e a refletância espectral entre 350 a 2500nm durante a decomposição e avaliaram o impacto dessas mudanças na estimativa de cobertura residual por meio de técnicas de sensoriamento remoto. As refletâncias espectrais medidas com espectroradiômetro FieldSpec Pro verificaram que proporções relativas de celulose e hemicelulose da palha do trigo declinaram significativamente em função dos dias de decomposição enquanto a lignina aumentou significativamente. Eles afirmam que componentes estruturais (celulose, hemicelulose e lignina) da palha do trigo dominaram o espectro de todas as amostras nos comprimentos de ondas maiores que 1300 nm. Eles observaram que as intensidades das faixas de absorção da celulose e da lignina com a decomposição da palha do trigo. A refletância próxima a 1710, 2100 e 2350 nm foram fortemente correlacionadas com a concentração da hemicelulose, celulose e lignina. O Índice de Absorção de Celulose (CAI) foi um forte estimador da cobertura residual de culturas. Eles ainda reforçam que sensores avançados multiespectrais com múltiplas bandas no infravermelho de ondas curtas relativamente estreitas ou sensores

hiperespectrais são necessários para avaliar de maneira confiável a cobertura residual de culturas sobre diversas paisagens agrícolas.

Para SERBIN et al. (2009) os métodos fundamentados nas técnicas de sensoriamento remoto têm se mostrado muito promissores e eficientes na estimativa da cobertura de resíduos de cultura. O autor mediu a refletância espectral entre 350 a 2500 nm de mais de 4200 tipos de solos e 80 culturas de milho e de trigo em laboratório. Seis índices de vegetação foram usados para estimar a cobertura residual de cultura. Utilizando-se o espectroradiômetro Fieldspec Pro FR, ele observou que a mineralogia e o carbono orgânico do solo afetaram esses índices espectrais para cobertura residual de culturas apresentando pequeno efeito na refletância espectral. Ele verificou que o CAI mostrou a melhor separação entre solos e os resíduos, seguido do LCA (Índice de Absorção de lignina-celulose) e NDTI (Índice de Cultura por Diferença Normalizada). Contudo, os índices NDSVI (Índice de Vegetação Senescente por Diferença Normalizada), NDI5 (Índice por Diferença Normalizada da banda 5) e NDI7 (Índice por Diferença Normalizada da banda 7) tiveram significativa sobreposição entre os valores dos índices de solo e resíduos. Ele observou que com a degradação dos resíduos de cultura ocorreu a diminuição dos valores de refletância ao longo de todo o espectro e a profundidade relativa da absorção relacionada a celulose e lignina também diminuíram.

DAUGHTRY et al. (2010) mensuraram as mudanças do modelo na composição das fibras da palha do trigo e refletância espectral durante o processo de decomposição e avaliaram os impactos dessas mudanças na estimativa da CRC por meio do sensoriamento remoto. Utilizaram o espectroradiômetro Fieldspec Pro e constataram que, durante a decomposição da palha, proporções de celulose e hemicelulose diminuíram, enquanto a lignina aumentou. Eles perceberam que características espectrais foram associadas à diminuição da celulose durante a decomposição, mais especificadamente verificaram que as intensidades das feições de absorção da lignina e celulose próximas a 1710, 2100 e 2350 nm diminuíram com a decomposição da palha do trigo. Verificaram que ao decompor a palha do trigo, os componentes de celulose e hemicelulose declinaram mais rapidamente do que a lignina. Detectaram uma faixa de absorção associada à celulose e lignina próximas a 2100 e 2300 nm, a qual foi pouco afetada pelo processo de senescência, utilizando a remoção de contínuo. Eles afirmam que índices espectrais de resíduos a partir de bandas estreitas (10-40 nm) estimaram fortemente as variações das coberturas residuais, enquanto os índices das

bandas largas foram inconsistentes. Este resultado reforça mais uma vez a necessidade de estudos com sensores hiperespectrais, justificando a utilização do espectroradiômetro FieldSpec.

## Índices de Vegetação

Um índice de vegetação espectral é, basicamente, um valor resultante da razão ou diferença espectral de dados, que possui a função de explorar as propriedades espectrais de uma cobertura vegetal. Estes índices estão relacionados a parâmetros biofísicos da planta (biomassa e índice de área foliar) e reduzem os efeitos de iluminação da cena, declividade da superfície e da geometria de aquisição que influenciam nos valores de refletância (ROUSE et al., 1973; PONZONI e SHIMABUKURO, 2009).

Neste sentido, alguns índices de vegetação propostos pela literatura foram utilizados para auxiliar a identificação da lignina, celulose e hemicelulose. São eles o Índice de Absorção de Celulose - IAC ou CAI (DAUGHTRY, 2001), Índice de Absorção de lignina-celulose - IAL-C ou LCA (DAUGHTRY et al., 2005) e o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - NDVI (ROUSE et al., 1973).

PONZONI e SHIMABUKURO (2009) ressaltam que o NDVI – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - pode ser utilizado para monitorar perfis sazonais e temporais da vegetação, de modo que possam ser comparados diferentes estágios de crescimento, acompanhar mudanças fenológicas e fisiológicas das folhas em períodos de crescimento e senescência. O NDVI foi proposto por ROUSE et al. (1973) que tinham por objetivo normalizar a razão simples das bandas do vermelho e do infravermelho próximo para um intervalo que variasse de -1 e +1.

ELVIDGE (1988) verificou absorções de lignina e celulose nos dados AVIRIS, em que foram utilizados para calcular o índice de lignocelulose baseado na diferença entre a refletância das bandas (2180 a 2220 nm) e (2310 a 2380 nm).

Alguns pesquisadores (SERBIN et al., 2009, NAGLER et al., 2000) observaram que o CAI mostrou a melhor separação entre solos e resíduos, seguido do LCA.

Vale informar que o intervalo do comprimento de onda ou o comprimento de onda central utilizado para calcular o CAI varia de autor para autor. Deste modo que, segue a fórmula do CAI utilizada por NAGLER et al. (2000), onde eles utilizaram para R<sub>2.0</sub>, R<sub>2.1</sub>, and R<sub>2.2</sub>, os comprimentos de ondas centrais de 2020 nm, 2100 nm, and 2220 nm, respectivamente.

$$CAI= 0.5 (R_{2.0}+R_{2.2})-R_{2.1}$$

**CAI** ou **IAC**- Índice de Absorção da Celulose. (DAUGHTRY et al., 2001; NAGLER et al., 2000).

$$CAI = 100 * [0.5 * (R_{2.031} + R_{2.211}) - R_{2.101}] \text{-----Eq.1}$$

onde:  $R_{2031\text{nm}}$ ,  $R_{2.101\text{nm}}$  e  $R_{2211\text{nm}}$  são as refletâncias nos comprimentos de ondas centrais de 2101nm, 2031nm e 2211nm para larguras de banda de 11 nm.

**LCA** ou **IAL-C** - Índice de Absorção de lignina-celulose. O LCA é a soma da largura relativa das características de absorção da celulose e lignina entre 2100nm e 2300nm (DAUGHTRY et al., 2005).

$$LCA = 100 * [(B6 - B5) + (B6 - B8)] \text{-----Eq.2}$$

Onde: B5 (2145–2185 nm), B6 (2185–2225 nm), e B8 (2295–2365 nm), são refletâncias das bandas, respectivamente.

**NDVI** – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (ROUSE et al., 1973). Os valores altos indicam maior quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa.

$$NDVI = (IVP - V) / (IVP + V) \text{-----Eq.3}$$

Onde: V é a banda do vermelho (650 – 700 nm) e IVP é a banda do Infravermelho Próximo (700 - 1000 nm) (JENSEN, 2009).

## Remoção de Contínuo

Muitos autores têm estudado técnicas de extração e caracterização específica de feições espectrais a partir de refletâncias espectrais coletadas em campo ou laboratórios. A remoção de contínuo é uma técnica de normalização e uma função matemática usada para isolar uma característica de absorção de interesse para análise, a qual resulta numa curva com valores de 0 a 1, que acentuam a localização e a profundidade das feições de absorções individuais, indiferente de todo albedo. Sobre a vegetação, o albedo é significativamente determinado pela superfície do solo, volume de água e estrutura do dossel. Esta técnica melhora a separabilidade entre os alvos, se consegue determinar a variação do volume bioquímico de cada alvo (CLARK and ROUSH, 1984; KRUSE et al, 1988; GREEN e CRAIG, 1985), ou seja, a remoção de contínuo resulta numa curva na qual as absorções dos componentes são enfatizados, enquanto que as influências causadas pelo efeito do albedo são removidas. As bandas simétricas possuem valor de assimetria igual a um e as bandas assimétricas possuem valores menores que um.

O espectro é normalizado para uma referência comum usando um continuum formado pelos pontos altos do espectro (máximos locais) e ocorre a ligação entre estes pontos. O contínuo é removido dividindo o espectro original pelo continuum. Os pontos mínimos do espectro da remoção de contínuo são determinados e os dez maiores são extraídos (KRUSE et al., 1988). Os autores desenvolveram um método para extrair faixas importantes para classificação de 27 tipos de Vegetação de manguezais *saltmarsh* (terreno exposto a inundações marinhas, charco salino) usando histogramas de frequências de diferenças significativas estatisticamente entre as médias de classes espectrais. Eles utilizaram o espectroradiômetro GER3700 e fizeram análises nos espectros de refletâncias, nas curvas de remoção de contínuo e utilizaram classificadores como *Bhattacharyya* e *Jeffries-Matusita*. Eles afirmaram que a remoção de contínuo misturou e confundiu os resultados quando aplicados a espectros de tipos de vegetação, melhorou a separabilidade nas absorções de clorofila, enquanto que reduziu a separabilidade no infravermelho próximo e em parte do infravermelho médio, onde a estrutura do dossel e o volume de água influenciaram no espectro (KRUSE et al., 1988).

O contínuo é uma estimativa do espectro de refletância sem a absorção devida ao composto de interesse.



## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de Estudo

A área de estudo está localizada entre as coordenadas geográficas longitude O 47° 28' e O 47° 27' e latitude S 22° 51' e S 22° 52', no município de Capivari limite com Santa Bárbara D'Oeste/SP (Figura 6). A área para a coleta das amostras foi cedida pela Empresa Raizen, Usina Bom Retiro.

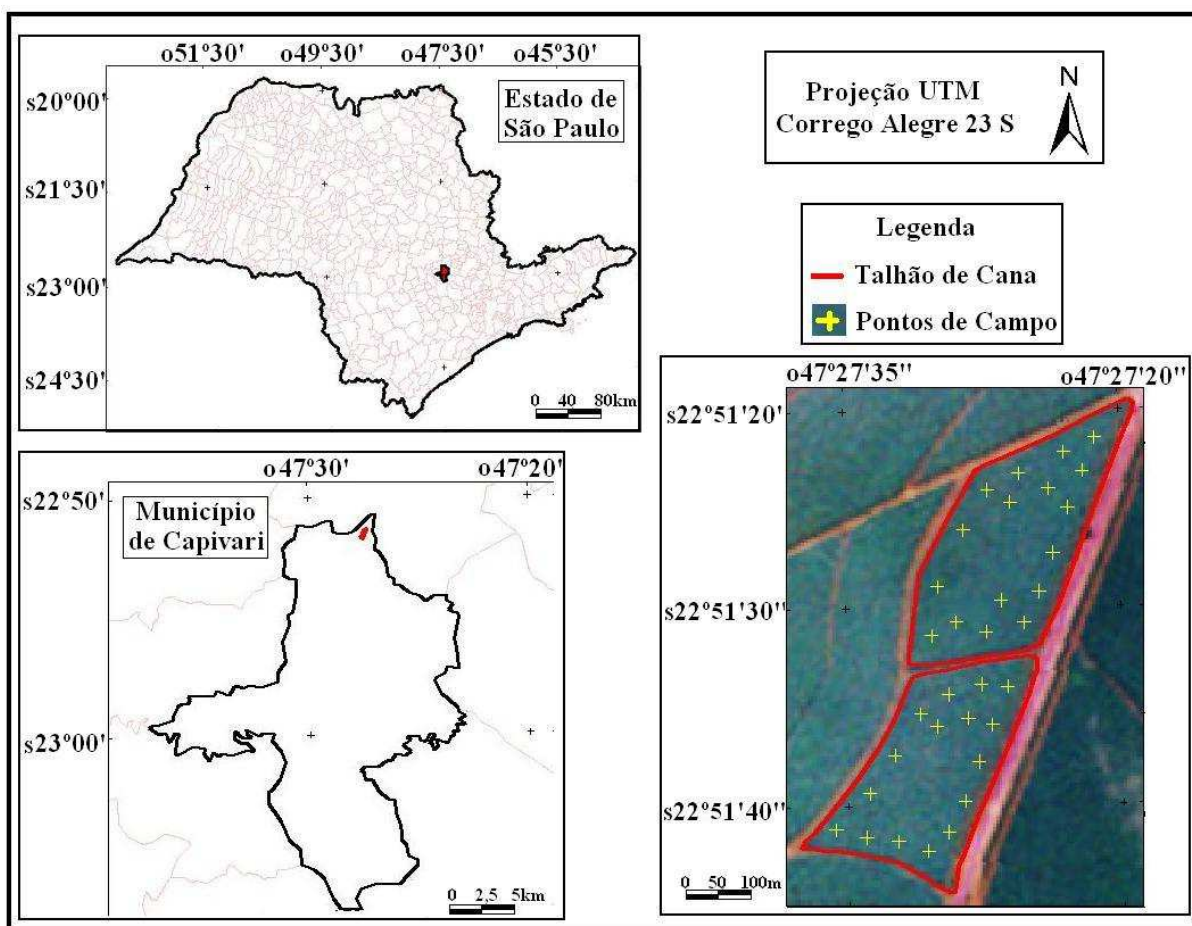


Figura 6. Área de Estudo – município de Capivari / Santa Bárbara D'Oeste - SP.  
Fonte: IBGE 2007.

Seguem na Tabela 4, algumas informações, cedidas pela empresa Raizen, acerca do talhão de cana onde foram coletadas as amostras.

**Tabela 4. Informações sobre o talhão de campo.**

Pólo industrial	1- Piracicaba
Município	Santa Barbara D'Oeste
Nome da Fazenda	Fazenda São Luis
Área do talhão	14,09 ha
Número de Cortes	4
Estágio	4º Corte
Tipo de Cana	Soca
Data do Plantio	28/11/2007
Data de colheita na safra passada	24/10/2010
Situação do Talhão	Dossel Fechado
Variedade	SP81-3250
Distância entre as linhas de Plantio da cana	1,4m
Estimativa de Produção do talhão no início da safra	85 ton/ha
Cana realmente produzida no talhão	52,41 ton/ha
Quantidade de fibra na cana	14,66%
Talhão queimado para a colheita	Não

#### **Aplicativo utilizado**

Para a realização deste trabalho foi necessária a utilização dos aplicativos ENVI versão 4.5 para geração da biblioteca espectral e processamento digital destas, o programa Excel para processamento e organização dos dados coletados. Todos os aplicativos foram utilizados no Laboratório de Geoprocessamento da Feagri (Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp).

Os dados coletados por meio do espectralradiômetro foram processados e analisados no ENVI 4.5 para geração e caracterização dos perfis espectrais, bem como análise por meio da remoção de contínuo.

Os índices de vegetação (CAI, LCA e NDVI) foram calculados no Excel para geração dos gráficos e correlações estatísticas.

#### **Dados Espectrais**

De modo geral, para a realização da pesquisa, foram utilizados: um espectralradiômetro, um computador portátil, um *Leaf-clip* e um GPS (Global Positioning System) TRIMBLE, descritos a seguir.

As informações técnicas do espectroradiômetro estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5. Informações técnicas do espectroradiômetro.

Sensor	FieldSpec* Pro 3 Portable Spectroradiometer
Fonte de iluminação	Halógena
Placa de referência	Spectralon
Ruído Equivalente a Radiância	Infravermelho próximo $2.2 \times 10^{-9}$ W/cm <sup>2</sup> /nm/sr (1400nm) Infravermelho próximo $4.0 \times 10^{-9}$ W/cm <sup>2</sup> /nm/sr (2100nm)
Número de bandas	220
Faixa Espectral	350 - 2500 nm
Campo de Visada	25°
Altura da captação	1.5 m
Resolução Espectral	10 nm
Peso	5,2 kg

As medidas espectrais foram realizadas utilizando-se um dos acessórios do espectroradiômetro chamado *Leaf-clip*. Este acessório permite medições de folhas tanto no modo destrutivo quanto no modo não-destrutivo e não requer fonte externa de iluminação.

O equipamento *Leaf-clip* foi acoplado ao espectroradiômetro com o intuito de eliminar as interferências atmosféricas no registro das assinaturas espectrais (Figura 7). Esse aparelho proporcionou medição comparável à medição realizada em uma esfera integradora e tem como principal característica a coleta de dados sem interferência da atmosfera, com iluminação ortogonal e sempre na mesma intensidade para todas as amostras (MAGALHÃES et al., 2011).

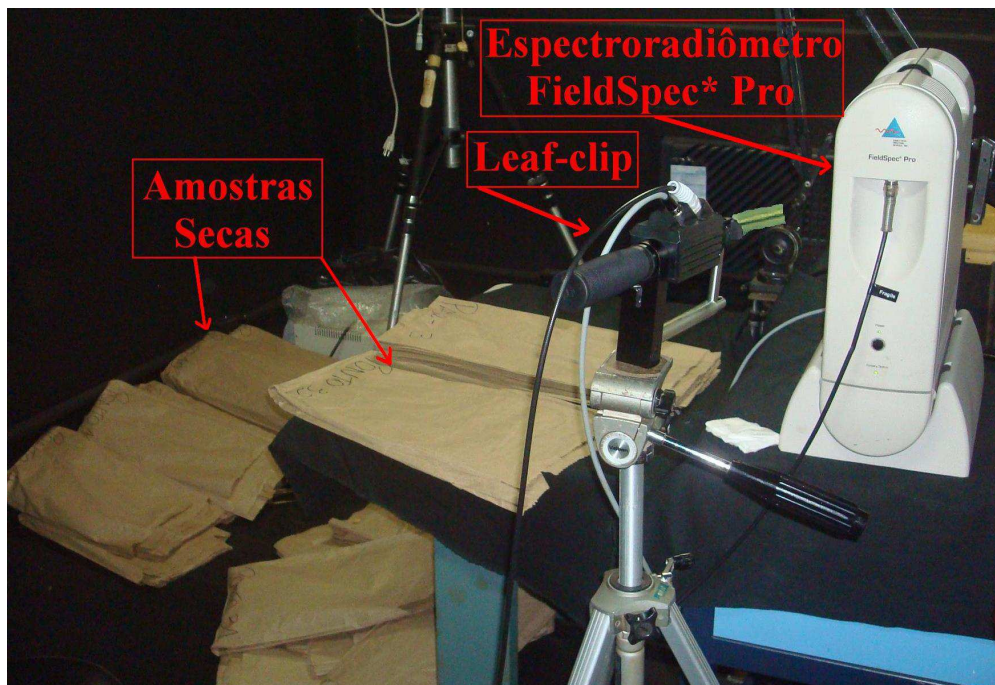


Figura 7. Espectroradiômetro FieldSpec\* Pro, *Leaf-clip* e amostras.

Foi utilizado o GPS TRIMBLE, para registrar os pontos de coleta em campo. Foi necessário baixar o arquivo RINEX do site <http://www.santiagoocintra.com.br> referente ao dia e hora de coleta do ponto, para que os dados do GPS fossem corrigidos.

## Procedimentos Metodológicos

### Coleta e Primeira Medição dos Dados em Campo

O trabalho de campo foi realizado nos dias 01 e 02 de agosto de 2011, na Empresa Raizen, Usina Bom Retiro.

A equipe de coleta foi composta por seis pessoas entre pesquisadores, alunos e funcionários. Uma parte da equipe ficou responsável para coletar as amostras no canavial e a outra equipe para registrar as assinaturas espectrais das amostras numa sala reservada para a instalação dos equipamentos (FieldSpec\* Pro, *Leaf-clip* e computador portátil), conforme mostra a Figura 8.



Figura 8. Primeira Medição das amostras (folhas úmidas).

Em campo, foram registradas 32 coordenadas geográficas utilizando o GPS TRIMBLE referente a cada ponto de coleta. As amostras foram distribuídas pelo talhão de tal maneira a permitir executá-lo de forma mais rápida e fácil. Por este motivo, algumas amostras foram coletadas próximas aos carregadores, todavia não menos que 30 metros da borda.

Foram colhidas para cada ponto, três amostras de cada folha: 3 ponteiros, 3 folhas verdes, 3 folhas senescentes e 3 palhas.

Para as coletas de dados em 32 pontos de campo foram registrados: dois registros de referências do *Leaf-clip* (uma superfície de sulfato de bário e uma superfície preta) e três amostras de cada folha (3 ponteiros, 3 folhas verdes, 3 folhas senescentes e 3 palhas). Nesse sentido, foram registradas 14 assinaturas espectrais para cada um dos 32 pontos de campo, o que resultou em 384 amostras de folhas de cana-de-açúcar e 62 assinaturas de referência.

As amostras foram codificadas na própria folha, no momento da coleta, de modo que não fossem perdidas ou confundidas, como mostra a Tabela 6.



Tabela 6. Codificação das amostras. Exemplos do ponto 32.

PO 32 - 1	Ponteira do Ponto 32, amostra 1.
PO 32 - 2	Ponteira do Ponto 32, amostra 2.
PO 32 - 3	Ponteira do Ponto 32, amostra 3.
VE 32 - 1	Folha Verde do Ponto 32, amostra 1.
VE 32 - 2	Folha Verde do Ponto 32, amostra 2.
VE 32 - 3	Folha Verde do Ponto 32, amostra 3.
SE 32 - 1	Folha Senescente do Ponto 32, amostra 1.
SE 32 - 2	Folha Senescente do Ponto 32, amostra 2.
SE 32 - 3	Folha Senescente do Ponto 32, amostra 3.
PA 32 - 1	Palha do Ponto 32, amostra 1.
PA 32 - 2	Palha do Ponto 32, amostra 2.
PA 32 - 3	Palha do Ponto 32, amostra 3.

As folhas (ponteira, folha verde, folha senescente e palha) seguem um padrão fisionômico/característico de crescimento e/ou decomposição, que são peculiares às suas fases vegetativas.

As Figuras 9, 10, 11, 12 e 13 tratam-se das folhas coletadas no ponto 32 e possuem o objetivo de mostrar os padrões das amostras coletadas em campo em todos os outros 31 pontos.



Figura 9. Doze amostras do ponto 32 (3 ponteiras, 3 verdes, 3 senescentes e 3 palhas).



Figura 10. Três amostras de Ponteira do ponto 32.

A ponteira é a folha mais nova de todas as quatro folhas, ela possui uma tendência a se enrolar após sua retirada do colmo.



Figura 11. Três amostras de Folha Verde do ponto 32.

A folha verde é a mais vigorosa, trata-se do estágio de crescimento após a ponteira. Poucas folhas verdes enrolaram após a sua coleta.



Figura 12. Três amostras de Folha Senescente do ponto 32.

A folha senescente é a fase posterior a fase da folha verde, pois já contém alguns indícios ou partes de palha, ou seja, parte da superfície da folha senescente é verde com significativas manchas secas.



Figura 13. Três amostras de Palha do ponto 32.



A palha possui fisionomia/características singular se comparada às demais folhas, pois se apresenta totalmente amarelada e seca. É também denominada matéria seca da cana. Nas análises de FR, de remoção de contínuo e dos índices de vegetação, a palha apresentou as maiores correlações associadas às presença dos componentes.

Com esta sistemática foi possível representar os estágios de decomposição das folhas ao longo do crescimento da cana e assim poder caracterizar as diversas fases em termos de acúmulo da lignina, celulose e hemicelulose nestas folhas.

### **Secagem em Estufa ventilada**

Após a coleta e primeiro registro das assinaturas espectrais das amostras, estas foram acondicionadas em sacos de papel e levadas a uma estufa ventilada no Laboratório de Solos da Feagri (Faculdade de Engenharia Agrícola - Unicamp) para serem secas a 60°C por aproximadamente 120h para que ocorresse a estabilização da umidade nas folhas.

### **Segunda Medição das Folhas**

O segundo registro das assinaturas espectrais das amostras, ocorreu após a secagem das folhas em estufa ventilada com as amostras secas. Esta medição ocorreu no município de São José dos Campos, nos dias 19 e 24 de agosto, utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec\* Pro pertencente ao Laboratório de Radiometria do Departamento de Sensoriamento Remoto do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Foi necessário medir as assinaturas espectrais das amostras duas vezes. A primeira logo após a coleta, e a segunda após a secagem, pois de acordo com a hipótese do trabalho baseada na literatura (NAGLER et al., 2000; DAUGHTRY, 2001; STRECK et al., 2002; DAUGHTRY et al., 2004; DAUGHTRY et al., 2005; DAUGHTRY e HUNT JR., 2008; DAUGHTRY et al., 2009; SERBIN et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2010), a umidade na amostra pode omitir ou dificultar a identificação dos componentes de interesse da pesquisa (lignina, celulose e hemicelulose).

O segundo registro das assinaturas espectrais das amostras gerou 384 curvas espectrais, que também foram processadas em laboratório (Figura 14).



Figura 14. Segunda Medição das amostras (folhas secas).

### **Processamento das Assinaturas Espectrais**

As assinaturas espectrais coletadas no primeiro campo foram adquiridas em valores de radiância. Por este motivo, a primeira providência foi calcular o fator de refletância (FR), obtido por meio da razão entre a radiância das folhas pela radiância da placa de referência do *Leaf-clip*.

Conforme as considerações de PONZONI e SHIMABUKURO (2009), o FR utilizado nesta pesquisa foi o Fator de Refletância Direcional-Hemisférica, pois os valores dos ângulos azimutais e zenitais da fonte de iluminação são conhecidos (iluminação direcional) e a coleta da radiação eletromagnética refletida foi realizada com o *Leaf-clip*, que permite medições comparáveis a de uma esfera integradora, ou seja, sem interferências atmosféricas.

A Figura 15 mostra, de modo geral, as etapas de coleta, medição, conversão dos dados de radiância para FR e geração das médias finais das folhas úmidas e secas, com o objetivo de reduzir a dimensão dos dados.

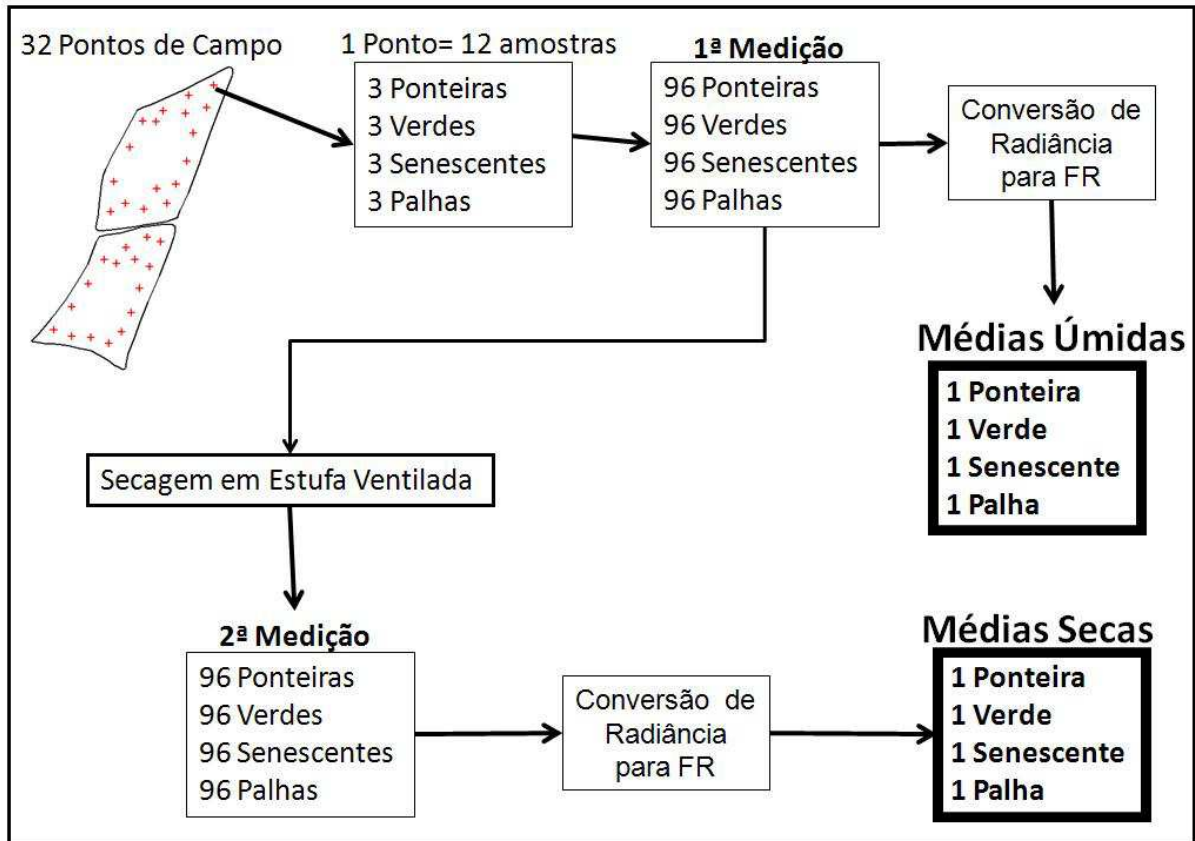


Figura 15. Fluxograma da coleta, medição, conversão e geração das médias finais.

Com os dados organizados, a partir das médias finais das folhas úmidas e secas foram feitas as análises do FR das folhas, as análises da remoção de contínuo, as análises dos índices de vegetação e as análises estatísticas.

### **Análise do Fator de Refletância das Folhas**

Com base na literatura (CURRAN, 1989; NAGLER et al., 2000; DAUGHTRY, 2001; DAUGHTRY et al., 2004; DAUGHTRY et al., 2009; DAUGHTRY et al. 2005; DAUGHTRY et al., 2006; MURRAY e WILLIAMS, 1988; DAUGHTRY e HUNT JR. 2008; SERBIN et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2010) foram definidos dois métodos de análise do FR: primeiro verificou-se quais eram as maiores absorções visíveis no espectro do FR, excluindo-se as absorções da água em 1450 e 1950 nm. Desta forma, foi visualizada uma clara absorção próxima a 1730, 1780, 2100, 2270 e 2330 nm, conforme mostra a Figura 16.

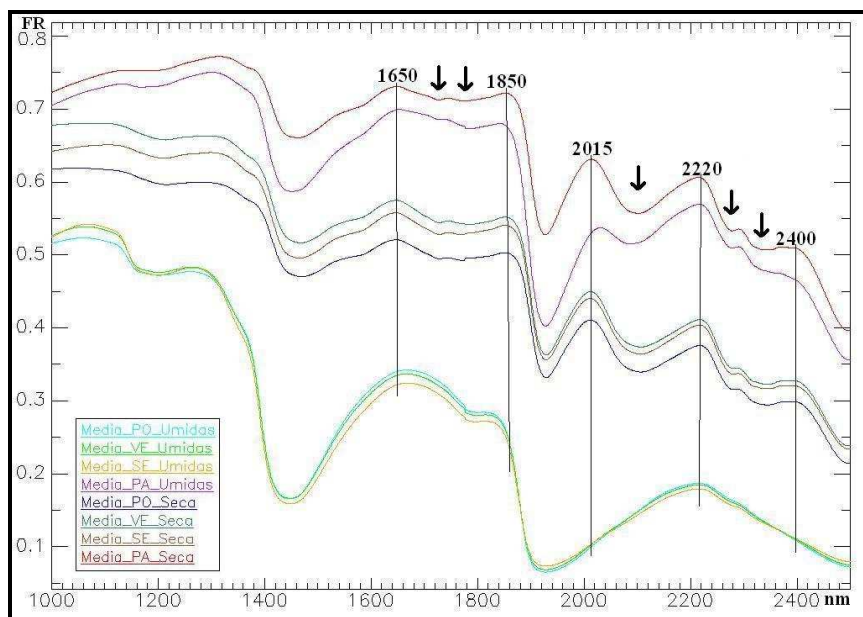


Figura 16. Absorções visíveis no espectro de Fator de Refletância.

Deste modo, definiram-se três intervalos de análise do FR das folhas, os quais foram:

O primeiro intervalo foi definido de 1650 a 1850 nm, que contém duas absorções, uma próxima a 1730 e a outra próxima a 1780nm. O segundo intervalo de análise foi de 2015 a 2220 nm, que possui uma clara absorção próxima a 2100 nm. E o terceiro intervalo foi definido de 2220 a 2400 nm, que apresentou duas significativas absorções, uma próxima a 2270 e a outra próxima a 2310nm.

Após a definição dos três intervalos de análises seguindo as absorções visíveis no FR, estes foram analisados conforme as absorções apresentadas na remoção de contínuo.

A segunda forma de análise dos fatores de refletâncias e remoção do contínuo, foi extrair da literatura (CURRAN, 1989; NAGLER et al.,2000; DAUGHTRY, 2001; DAUGHTRY et al., 2006; DAUGHTRY e HUNT JR., 2008; DAUGHTRY et al., 2004, 2005, 2009, 2010) alguns intervalos espectrais que apresentaram absorções associadas às concentrações de hemicelulose, celulose e lignina.

Foram definidos oito intervalos espectrais, os quais possuíam um intervalo de análise de aproximadamente 20 nm (10nm antes do comprimento de onda central sugerido pela revisão bibliográfica e 10nm após).

Os comprimentos de onda centrais foram definidos com base em três parâmetros: o primeiro e mais relevante foram as indicações dos autores estudados (revisão bibliográfica), o

segundo foi obtido com o auxílio da análise da remoção de contínuo e o terceiro pelo menor valor de fator de refletância no intervalo de análise.

Como exemplo da definição de um comprimento de onda central, pode-se citar o comprimento de onda 1822 nm, que foi sugerido, primeiramente, por CURRAN (1989) que afirmou ocorrer concentração de celulose em “1,82  $\mu\text{m}$ ”, ou seja, ele não define com precisão qual a terceira casa decimal desta absorção, que pode variar. Logo, para encontrar possível absorção próxima a 1820 nm, analisou-se o intervalo de variação entre 1810 a 1830 nm e a remoção de contínuo para este mesmo intervalo de análise. O menor fator de refletância em ambas as análises, foi definido como comprimento de onda central da absorção do componente de interesse, neste caso, absorção da celulose.

Portanto, para fazer os cálculos e quantificar possível absorção do componente foi elaborada, para cada intervalo de análise, a Tabela “Valor da absorção dos componentes no FR”, sendo que a penúltima linha da tabela indica a diferença entre o fator de refletância do comprimento de onda central em 1822 nm pelo comprimento de onda inicial no intervalo de análise, neste caso, 1810 nm. A última linha da tabela indica a subtração entre o fator de refletância do comprimento de onda final do intervalo de análise em 1830 nm pelo comprimento de onda inicial em 1810 nm. Estes cálculos foram feitos para analisar se ocorreu uma absorção ou apenas uma contínua diminuição do fator de refletância do início ao fim do intervalo de análise.

Os valores negativos da Tabela significaram que houve diminuição do fator de refletância ao longo do intervalo de análise. Os valores positivos indicaram um aumento no fator de refletância em relação ao comprimento de onda inicial do intervalo de análise.

Diminuições gradativas no fator de refletância ao longo do intervalo podem indicar uma absorção no comprimento de onda central ou apenas uma diminuição contínua do fator de refletância da folha. Deste modo, foram elaborados os gráficos “Valor da absorção ao longo do intervalo” para verificar se houve aumento ou diminuição contínua do fator de refletância, ou se houve absorção no comprimento de onda central.

## Análise da Remoção de Contínuo

A remoção de contínuo é uma função matemática usada para isolar uma característica de absorção de interesse para análise, em que seus parâmetros que variam de 0 a 1 (CLARK e ROUSH, 1984; KRUSE et al., 1988; GREEN e CRAIG, 1985).

Deste modo, para encontrar o valor da absorção na remoção do contínuo foi necessário subtrair 1 (indicando zero absorção) menos o valor do Pico da absorção que gerou o gráfico da “Absorção da Remoção de Contínuo para todas as folhas” (Figura 17). Exemplo: Remoção de Contínuo da Ponteira próxima a 2100 nm, em que a absorção real da ponteira úmida foi 0,00320 e da seca foi de 0,14184 , ou seja, não houve absorção da ponteira úmida e ocorreu significativa absorção da ponteira seca.

Ponteira	Pico da Absorção	Valor da Absorção
Úmida	0,99680	0,00320
Seca	0,85816	0,14184

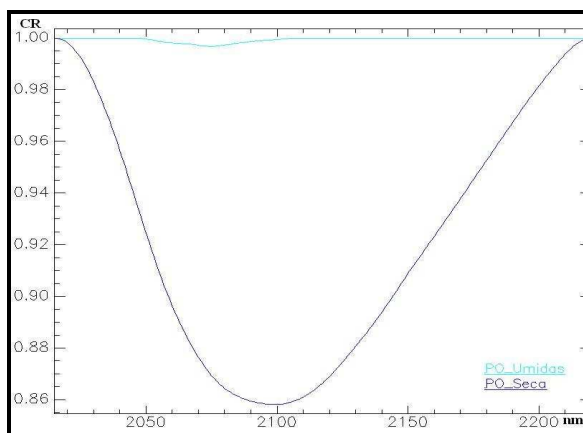


Figura 17. Valor e Absorção da Remoção de Contínuo da Ponteira próxima a 2100 nm.

Valores de absorção na remoção de contínuo abaixo de 0,01 foram considerados prováveis ruídos ou o indicativo de que a relação sinal/ruído, que diminui com o comprimento de onda, degradou-se (JENSEN, 2009).

## Análise dos Índices de Vegetação

Análises de correlações entre os índices de vegetação propostos pela literatura foram realizadas a fim de identificar a melhor resposta espectral associada à lignina, celulose e hemicelulose.

É importante ressaltar que o intervalo do comprimento de onda ou o comprimento de onda central utilizado para calcular os índices variam de autor para autor. Tomando isso em consideração, seguem as fórmulas dos índices propostos pela literatura e seus respectivos intervalos espectrais.

**CAI** - *Cellulose Absorption Index* ou IAC - Índice de Absorção da Celulose (DAUGHTRY, 2001; SERBIN et al., 2009; NAGLER et al., 2000).

$$CAI = 100 * [0.5 * (R_{2.031} + R_{2.211}) - R_{2.101}] \text{ Eq.1}$$

onde:  $R_{2031\text{nm}}$ ,  $R_{2101\text{nm}}$  e  $R_{2211\text{nm}}$  são os fatores de refletância nos comprimentos de ondas centrais de 2101nm, 2031nm e 2211nm.

**LCA**- *Lignin–Cellulose Absorption Index* ou IAL-C - Índice de Absorção de lignina-celulose é a soma da largura relativa das características de absorção da celulose e lignina entre 2100nm e 2300nm (Daughtry et al., 2005).

$$LCA = 100 * [(B6 - B5) + (B6 - B8)] \text{ Eq.2}$$

Onde: B5 (2145–2185 nm), B6 (2185–2225 nm), e B8 (2295–2365 nm), são os fatores de refletância das bandas. Neste caso, foram calculadas as médias dos fatores de refletância de cada intervalo espectral.

**NDVI** - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (ROUSE et al., 1973).

$$NDVI = (IVP - V) / (IVP + V) \text{ Eq.3}$$

Onde: IVP é o infravermelho próximo (650-700nm) e V é o vermelho (700-1000nm) (JENSEN, 2009).

## **Análises Estatísticas**

### **Média e Desvio padrão amostral**

Em campo, foram coletadas 3 amostras de cada folha em cada um dos 32 pontos de campo, ou seja, obteve-se na primeira medição 384 amostras (96 amostras de ponteiras, 96 amostras de folhas verdes, 96 amostras de folhas senescentes e 96 amostras de palhas). Como foram duas medições, no total, foram obtidas 768 amostras (384 úmidas e 384 secas).

Deste modo, a Média foi utilizada para sintetizar o número de amostras de todas as folhas coletadas em campo, com o intuito de representar as amostras das folhas. Neste sentido, gerou-se uma média a partir de 96 amostras de cada folha, resultando em oito assinaturas espectrais finais (4 úmidas e 4 secas). A partir destas médias finais calculou-se o desvio padrão.

### **Coefficiente de variação**

O coeficiente de variação é uma medida de dispersão de uma amostra em relação à sua média. Ele é útil por estender a análise do desvio padrão, fornecendo uma medida relativa e independente da grandeza com a qual se mede os dados da amostra.

Esta função foi utilizada para comparar as dispersões relativas de duas ou mais séries de dados, aplicando a fórmula, Coeficiente de Variação =  $100 \times [(\text{Desvio Padrão da série} / \text{Média da série})]$ . O Coeficiente de variação foi aplicado nas médias finais da folhas.

Segundo GOMES (2000), coeficientes de variação menores que 10% representam baixa dispersão, dados homogêneos. Valores entre 10% e 20% indicam média dispersão e boa precisão das amostras. E coeficientes de variação maiores que 30% representam heterogeneidade dos dados.

### **Coefficiente de Correlação**

O Coeficiente de Correlação foi utilizado para saber o grau de associação entre duas séries de dados. O resultado é compreendido entre **-1** e **1**. O valor próximo de **1** indica alto grau de dependência entre as séries. Um valor próximo a **0** indica pouca dependência entre as variáveis. Um valor próximo a **-1** indica dependência contrária, ou seja, o crescimento de uma variável implica na diminuição da outra. Foi aplicado o coeficiente de correlação entre os índices de vegetação CAI, LCA e NDVI.



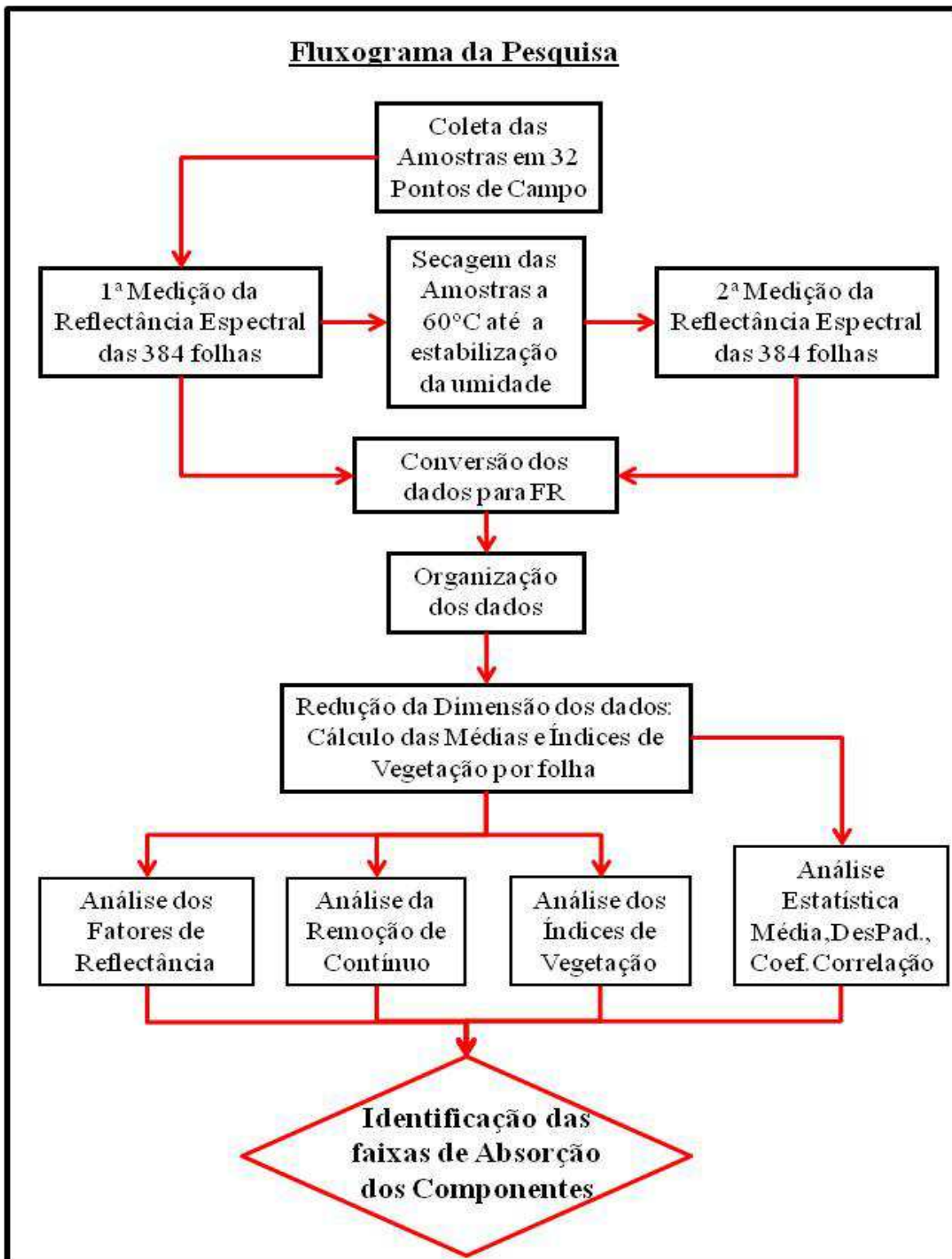


Figura 18. Fluxograma da Pesquisa.

## Resultados e discussão

---

Os resultados foram divididos em duas etapas. Na primeira, estão dispostas as análises estatísticas básicas dos dados e na segunda, as análises dos dados espectrais.

Durante a pesquisa utilizaram-se diferentes métodos investigativos para identificar a resposta espectral dos componentes: lignina, celulose e hemicelulose das folhas. De modo que, neste capítulo, serão discutidos os resultados encontrados nos três tipos de análises aplicadas aos dados coletados, sendo elas:

- ✓ Análise do Fator de Refletância (FR)
- ✓ Análise da Remoção de Contínuo – *Continuum Removal* (CR)
- ✓ Análise dos Índices de Vegetação

A partir disso, geraram-se os seguintes resultados e produtos:

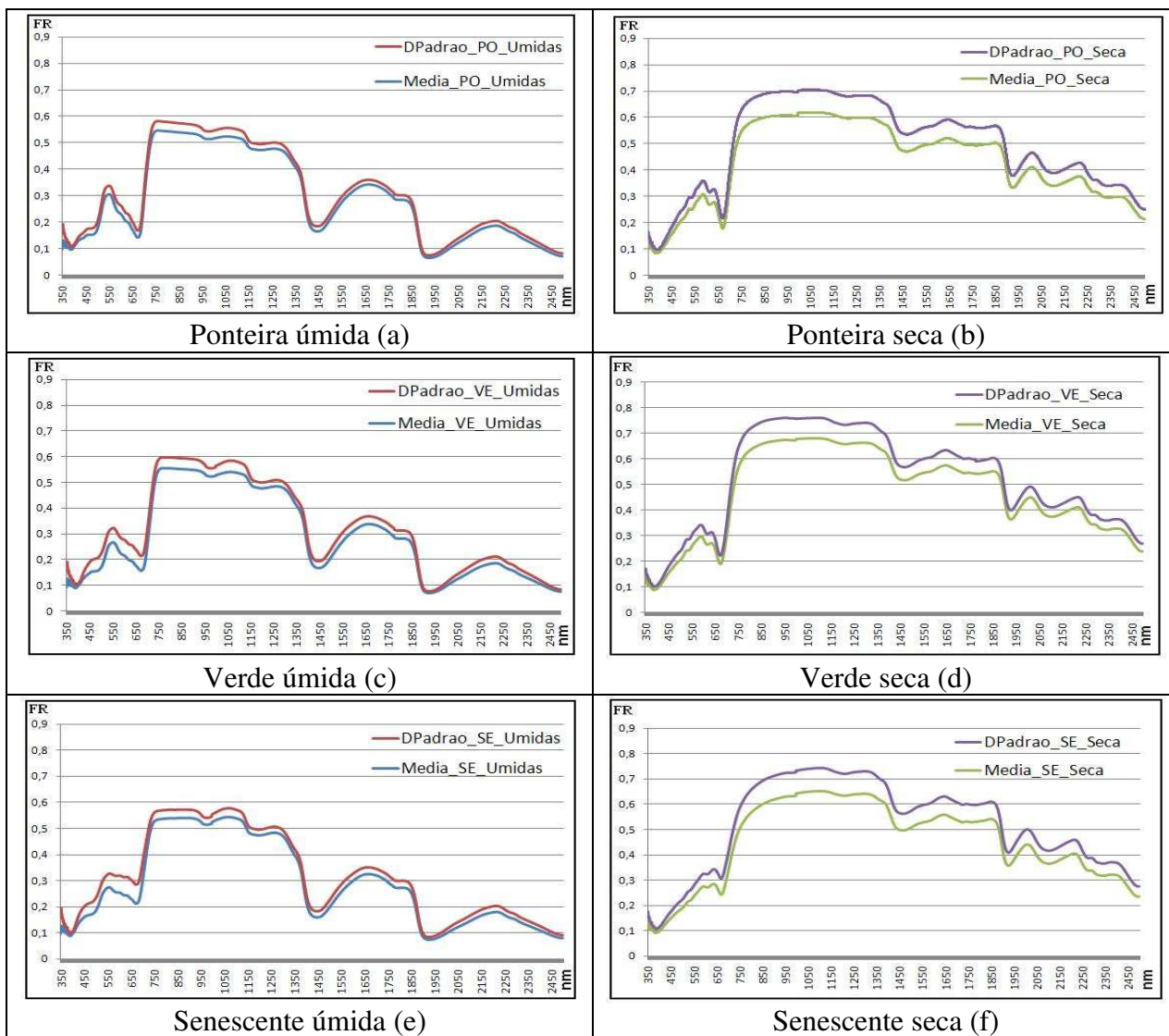
- ❖ Uma biblioteca espectral das folhas e matéria seca.
- ❖ Identificação das faixas ou intervalos espectrais da palha, associadas às absorções dos componentes: lignina, celulose e hemicelulose da cultura;
- ❖ Considerações finais acerca das correlações entre os índices de vegetação CAI, LCA e NDVI.

## ANÁLISES ESTATÍSTICAS BÁSICAS

Foram realizadas análises estatísticas básicas para verificação da variação e qualidade dos dados coletados.

### Média e Desvio Padrão

Calculou-se o desvio padrão das médias finais das folhas secas e úmidas, gerando a Figura 19 (a, b, c, d, e, f, g, h).



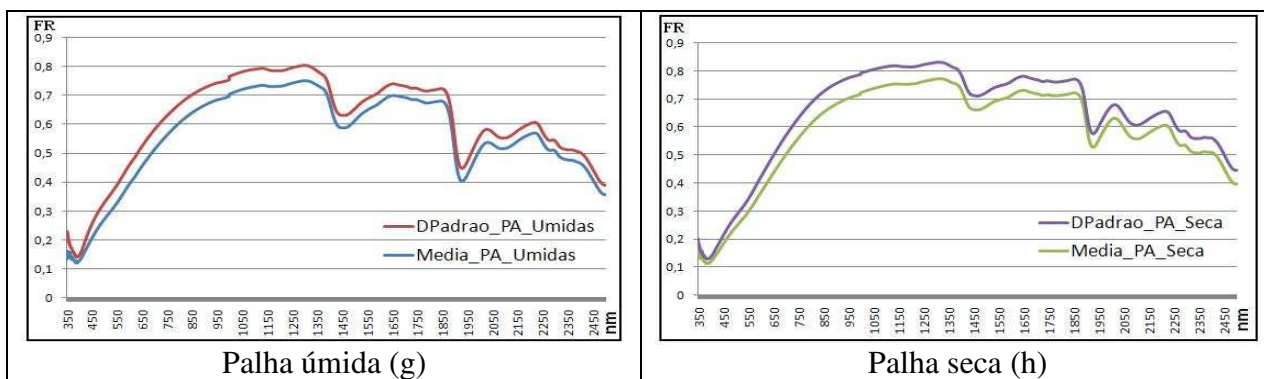


Figura 19. Desvio Padrão das médias finais das folhas.

De acordo com a Figura 19 (a, b, c, d, e, f, g, h) e a Tabela 7, os valores de desvio padrão das médias das folhas não ultrapassaram 0,095.

Tabela 7. Maiores e menores valores de Desvio Padrão das folhas.

Folhas	Desvio Padrão	
	Maiores	Menores
(a) PO Úmidas	0,08858975	0,014699252
(b) PO Seca	0,091101116	0,011385371
(c) VE Úmidas	0,085706824	0,007909311
(d) VE Seca	0,086663671	0,011135731
(e) SE Úmidas	0,083375791	0,008590384
(f) SE Seca	0,095734089	0,014699252
(g) PA Úmidas	0,089195866	0,016975838
(h) PA Seca	0,072795325	0,014297583

### Coefficiente de Variação

Os coeficientes de variação das médias finais das folhas foram calculados em cada comprimento de onda, mas foram analisados, somente, os intervalos espectrais de interesse deste estudo, ou seja, aqueles que apresentaram possíveis absorções associadas aos componentes, contidos na região espectral do infravermelho médio.

Verificou-se que, de modo geral, as folhas apresentaram coeficientes de variação entre 10 e 20%, indicando boa precisão do experimento e homogeneidade entre as amostras.

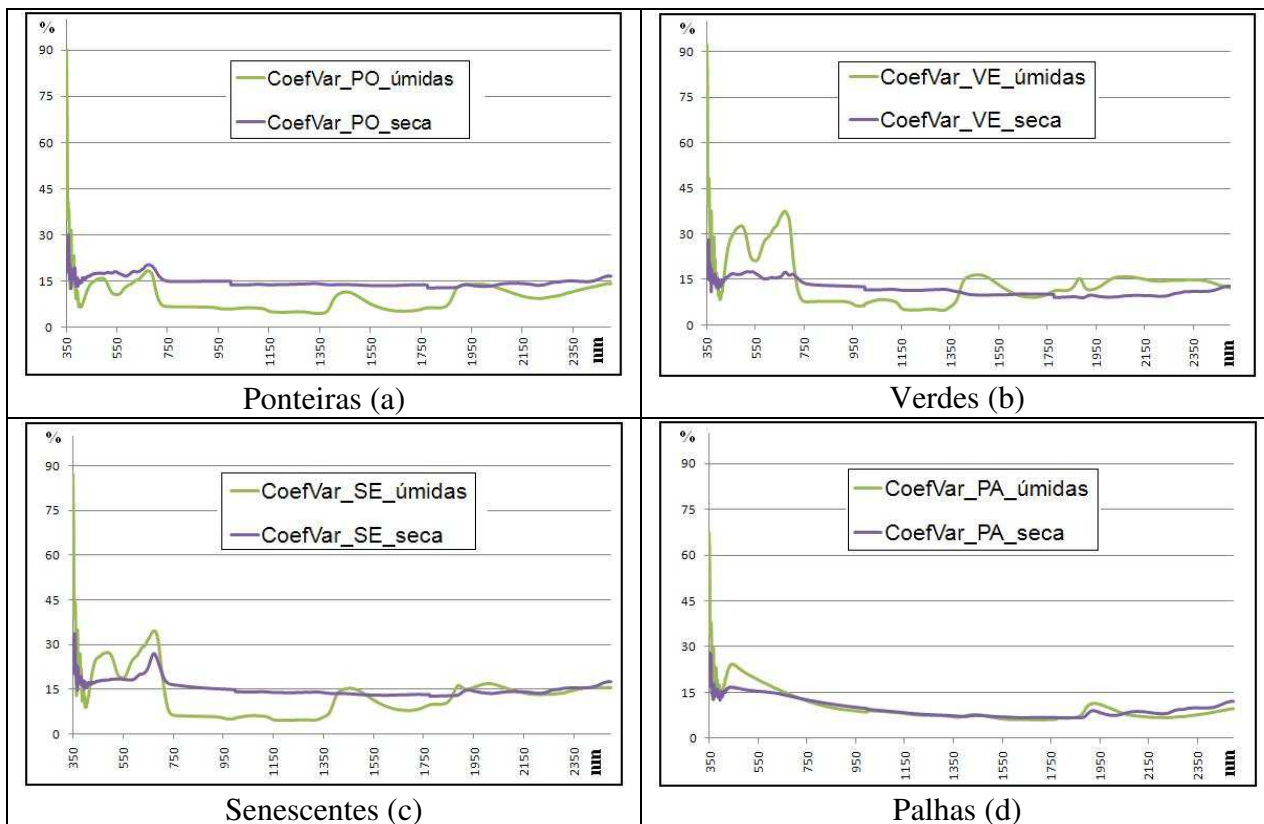


Figura 20. Coeficiente de Variação das médias finais das folhas.

A Figura 20 mostra que, todas as folhas apresentaram coeficientes de variação entre 10 e 20% em todos os intervalos das possíveis absorções dos componentes, indicando média dispersão e boa precisão entre as amostras, de acordo com GOMES (2000).

### Coeficiente de Correlação

A discussão sobre os resultados dos Coeficientes de Correlação está descrito nos respectivos capítulos de correlação dos índices de vegetação.

Tabela 8. Coeficiente de Correlação dos Índices de Vegetação.

	Úmidas			Secas		
	CAI x LCA	CAI x NDV	NDVI x LCA	CAI x LCA	CAI x NDV	NDVI x LCA
PO	-0,63437	-0,58415	0,36001	0,95881	0,05025	0,11711
VE	-0,69862	-0,91337	0,80115	0,93274	-0,12668	-0,13779
SE	-0,45142	-0,71873	0,52504	0,95578	-0,04002	0,05194
PA	0,77537	-0,54441	-0,57740	0,93330	-0,51524	-0,42421

## ANÁLISE DO FATOR DE REFLETÂNCIA E REMOÇÃO DE CONTÍNUO

A princípio, é importante ressaltar que foram feitas análises dos fatores de refletância das folhas (Folha Ponteira – PO, Folha Verde – VE, Folha Senescente – SE, Folha Palha - PA) nas condições úmidas e secas.

Os gráficos apresentados, neste capítulo, são os resultados finais das médias das 384 assinaturas espectrais, das folhas coletadas em campo. Na Figura 21, estão as médias finais dos Fatores de Refletância (FR) na região espectral entre 350 e 2500 nm de todas as folhas nas duas condições (úmida e seca). Por meio desta figura, tem-se uma noção geral do comportamento ao longo do espectro nos diferentes estágios de crescimento e com distintos volumes de água em suas folhas.

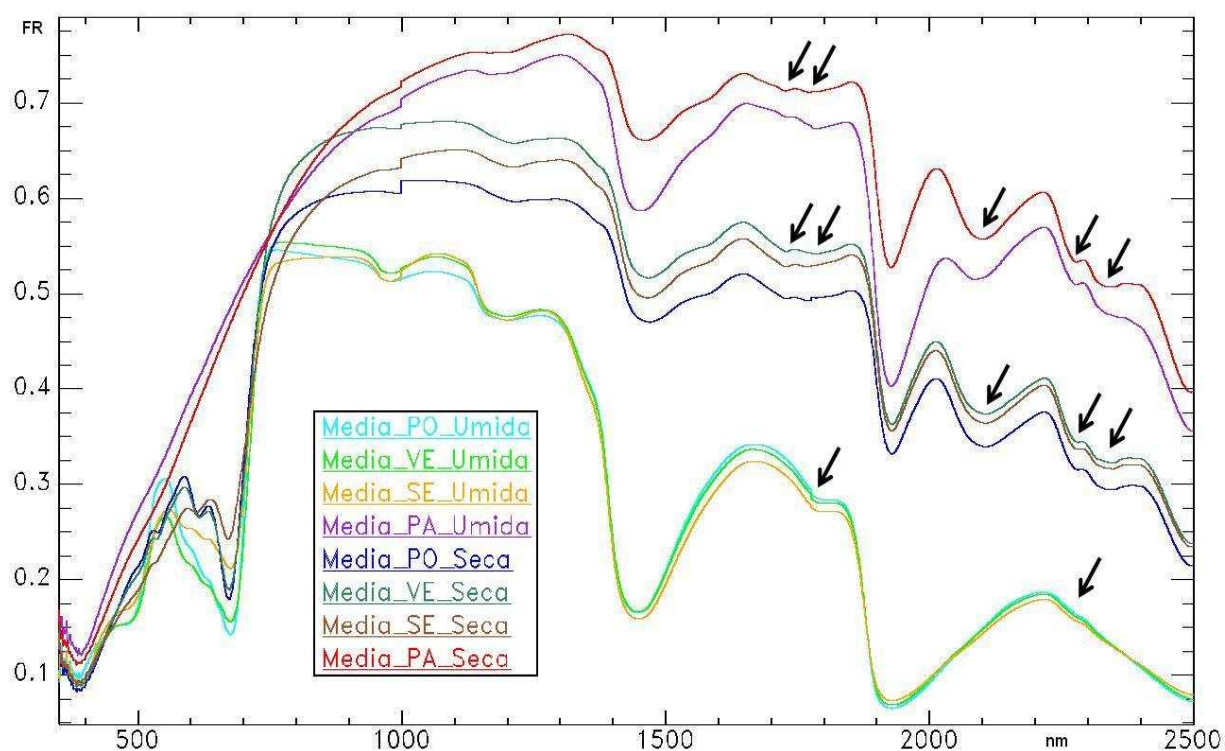


Figura 21. FR das folhas (Ponteira, Verde, Senescente e Palha), úmidas e secas.

As curvas de Fatores de Refletância das folhas demonstram comportamento padrão de uma folha verde, pois, nota-se na região do visível, que os pigmentos, clorofila, xantofila e carotenos dominam a refletância das folhas (ponteira, verde e senescente), algo que não ocorre com as palhas, comportamento este compatível com aquele descrito por GATES et al., (1965).

Na região do infravermelho próximo, pouca radiação foi absorvida, ocorrendo significativo espalhamento da radiação eletromagnética dentro da folha. Nesta faixa espectral, a estrutura celular dominou na refletância espectral da folha. Quanto mais seca a folha, maior é o vácuo dentro da folha e, conseqüentemente, maior será o espalhamento da radiação, resultando em altos valores de FR, como é o caso, das palhas, que possuem os maiores valores no FR. As folhas úmidas (estrutura celular preenchida com água) no inferior do gráfico possuem os menores valores de FR e as folhas secas intermediando entre as palhas e as folhas úmidas (GATES et al., 1965).

No infravermelho médio, observa-se que a influência da água na resposta espectral, sendo que, quanto maior a umidade na folha, menor será o valor do fator de refletância. Nesta região, a água domina a refletância do alvo, pois a água absorve significativamente a radiação incidente entre 1300 a 2000 nm (GATES et al., 1965; PONZONI e SHIMABUKURO, 2009). Neste intervalo, notam-se três claros agrupamentos no FR, o primeiro é o das folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) com os menores valores de FR, o segundo é o das folhas secas (ponteira, verde e senescente), e o terceiro é o das palhas com os maiores valores de FR. Ressaltando que nos dois últimos é possível visualizar as absorções dos componentes lignina, celulose e hemicelulose.

Percebe-se que, com exceção da palha úmida, ocorre aglomeração das folhas úmidas, que possuem valores de FR menores que os das folhas secas. O FR da palha úmida é apenas superado pelo da palha seca.

É notória a proximidade entre as folhas úmidas da ponteira (cyan), folha verde (verde) e folha senescente (amarela) na parte inferior do gráfico. Isto é explicado por Daughtry et al. (2001) quando afirmam que o teor de umidade, a idade do resíduo e o grau de decomposição afetam a refletância espectral dos resíduos, pois, a água altera significativamente a refletância espectral dos resíduos de cultura, domina as propriedades espectrais da palha e reduz significativamente o CAI das palhas. Nota-se a significativa separação do FR das folhas secas e úmidas, conforme as afirmações dos autores (NAGLER et al., 2000; DAUGHTRY et al., 2001; DAUGHTRY e HUNT JR., 2008).

Os espectros apresentados nas figuras a seguir possuem intervalo entre 1000 a 2500 nm, pois os componentes de interesse (lignina, celulose e hemicelulose) apresentaram melhores respostas a partir de 1000 nm, conforme alguns autores que identificaram absorções



associadas às concentrações de hemicelulose, celulose e lignina próximas a 1120, 1420, 1700, 1820, 2100 e 2300 nm (CURRAN, 1989; NAGLER et al.,2000; DAUGHTRY, 2001; DAUGHTRY et al., 2006; DAUGHTRY e HUNT JR., 2008; DAUGHTRY et al., 2004, 2005, 2009, 2010).

Com o intuito de comparar os valores de FR entre as umidades das folhas, tem-se a Figura 22, que mostra a média dos fatores de refletância das folhas úmidas e secas lado a lado.

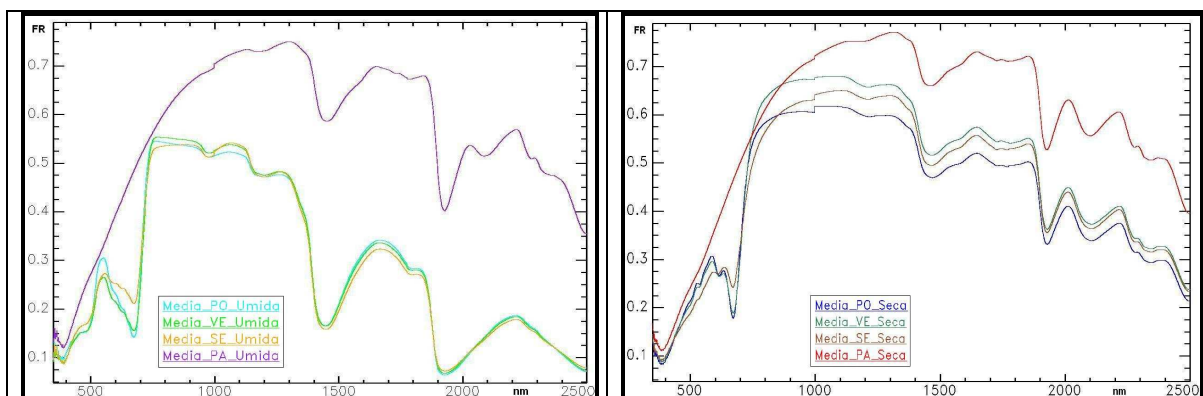


Figura 22. Comparação visual do Fator de refletância entre as folhas úmidas e secas.

Na Figura 22, nota-se que as afirmações de DAUGHTRY (2001) são corroboradas, uma vez que todas as folhas secas e a palha úmida possuem, visivelmente, fatores de refletâncias maiores que o restante das folhas úmidas (ponteira, verde e senescente).

Ao analisar apenas as folhas úmidas (Figura 23), é evidente, que a palha possui refletância maior que o restante das folhas (ponteira, verde e senescente), ocorrendo significativa separação entre a palha e as outras folhas.



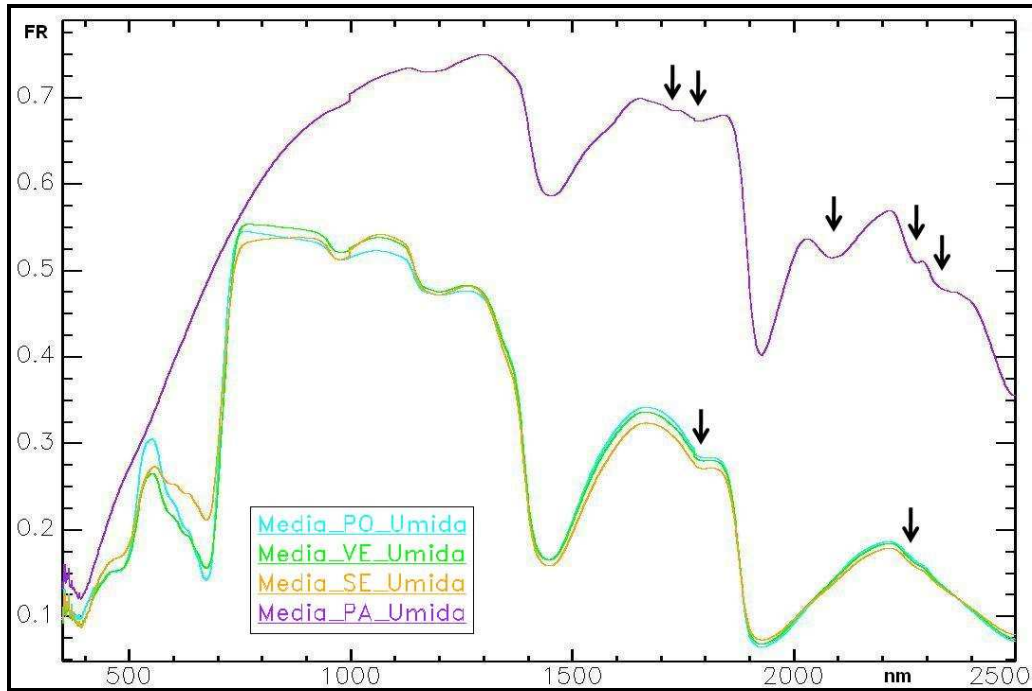


Figura 23. Fator de refletância das folhas (Ponteira, Verde, Senescente e Palha) úmidas.

A Figura 24 mostra o comportamento espectral das folhas secas.

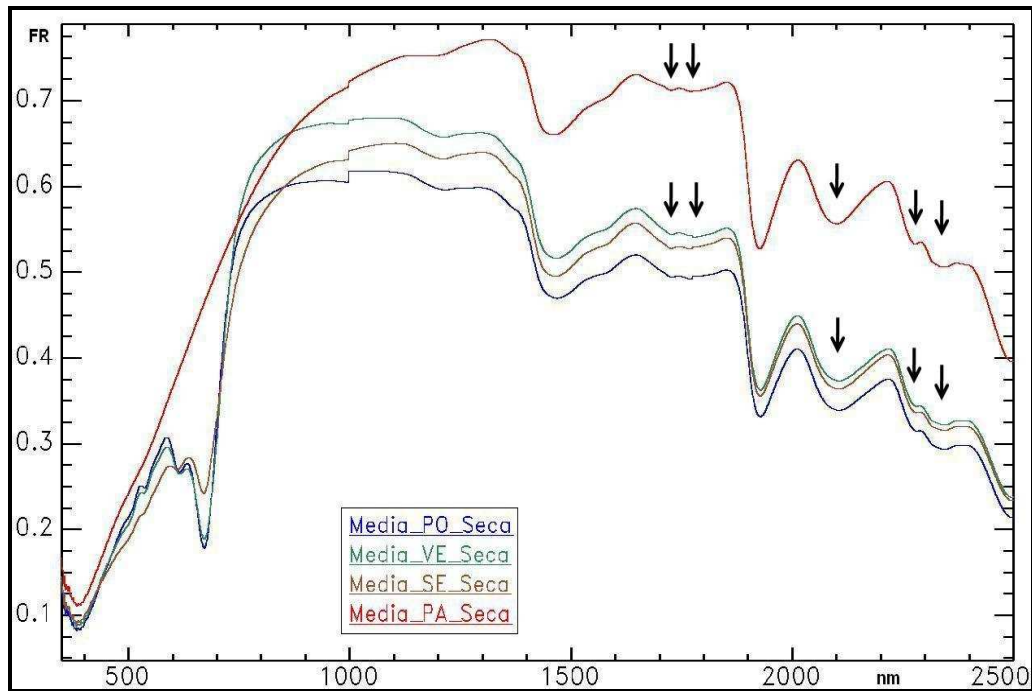


Figura 24. Fator de refletância das folhas (Ponteira, Verde, Senescente e Palha) secas.

É notória a discrepância das absorções que ocorrem nos intervalos de interesse (próximos a 1780, 2100, 2330 nm) entre as folhas úmidas e secas, como se constata nas Figuras 25, 26, 27 e 28, em que as folhas estão separadas nas duas condições.

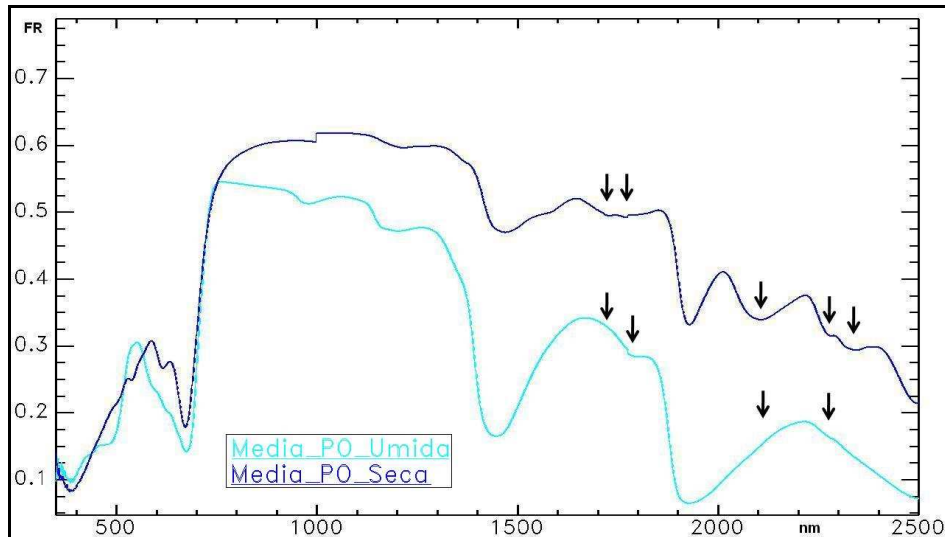


Figura 25. Fator de refletância da Ponta úmida e seca.

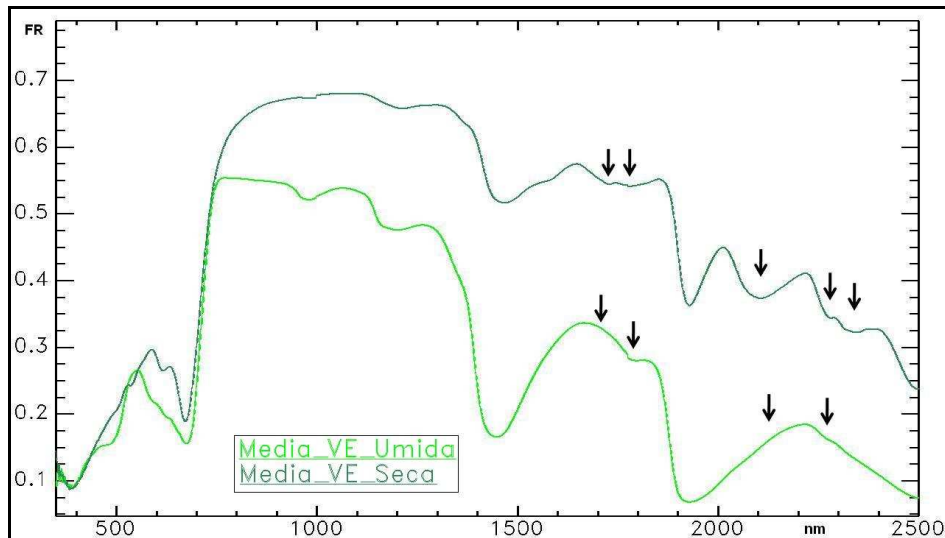


Figura 26. Fator de refletância da Folha Verde úmida e seca.

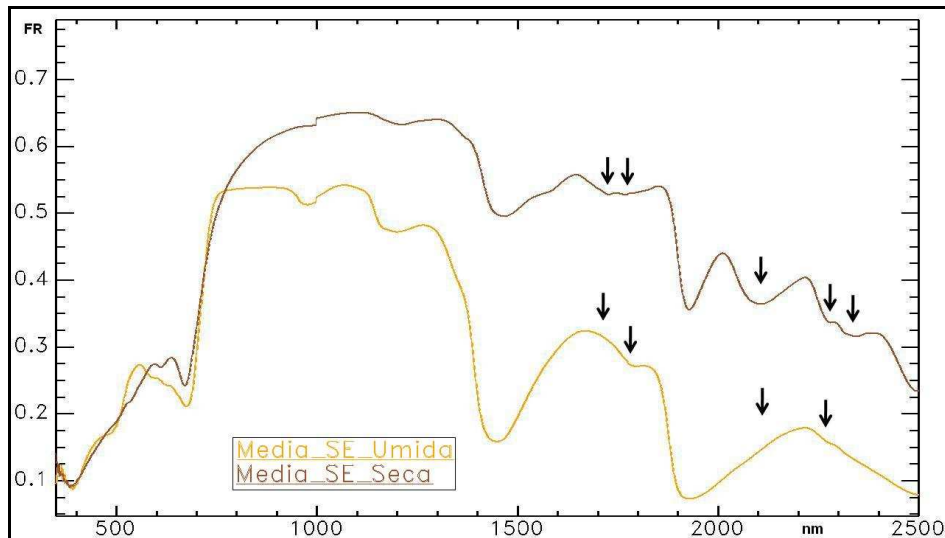


Figura 27. Fator de refletância da Folha Senescente úmida e seca.

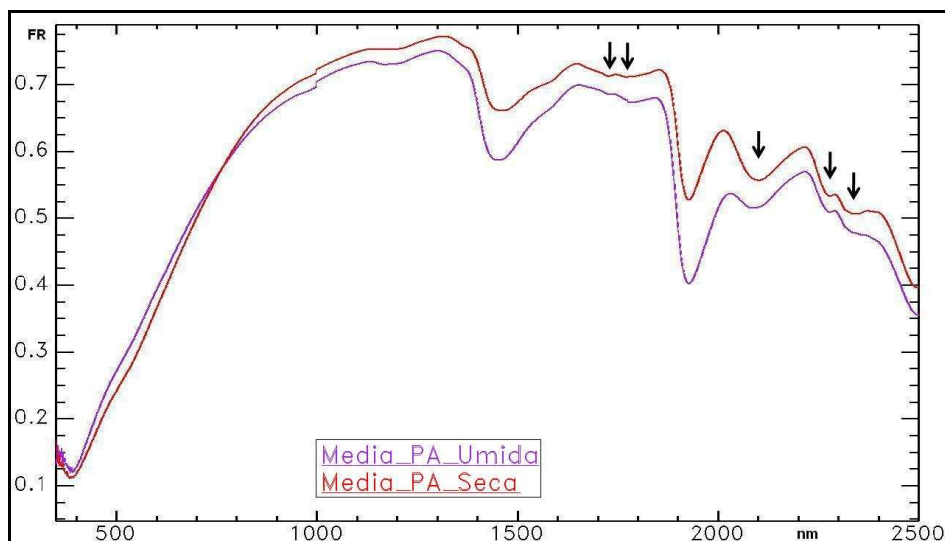


Figura 28. Fator de refletância da Palha úmida e seca.

Após revisar a literatura (CURRAN, 1989; NAGLER et al., 2000; DAUGHTRY, 2001; DAUGHTRY et al., 2004; DAUGHTRY et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2005; DAUGHTRY et al., 2006; MURRAY e WILLIAMS, 1988; DAUGHTRY e HUNT JR. 2008; SERBIN et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2010) foram definidos dois métodos para analisar as curvas dos fatores de refletância das folhas: o primeiro com intervalos de análise de aproximadamente 100 nm, e o segundo, com intervalos de 20 nm.

Diante das perceptíveis absorções ocorridas no FR, a primeira análise foi feita a partir das maiores absorções visíveis no espectro do FR, excluindo as absorções da água em 1100, 1450 e 1950 nm (PONZONI e SHIMABUKURO, 2009). Identificaram-se possíveis absorções

associadas aos componentes próximos aos comprimentos de ondas 1730, 1780, 2100, 2270 e 2310 nm, conforme mostra a Figura 29, a qual identifica as absorções (menores valores de FR) e os picos máximos, antes e após as absorções, levados em consideração para definir o intervalo.

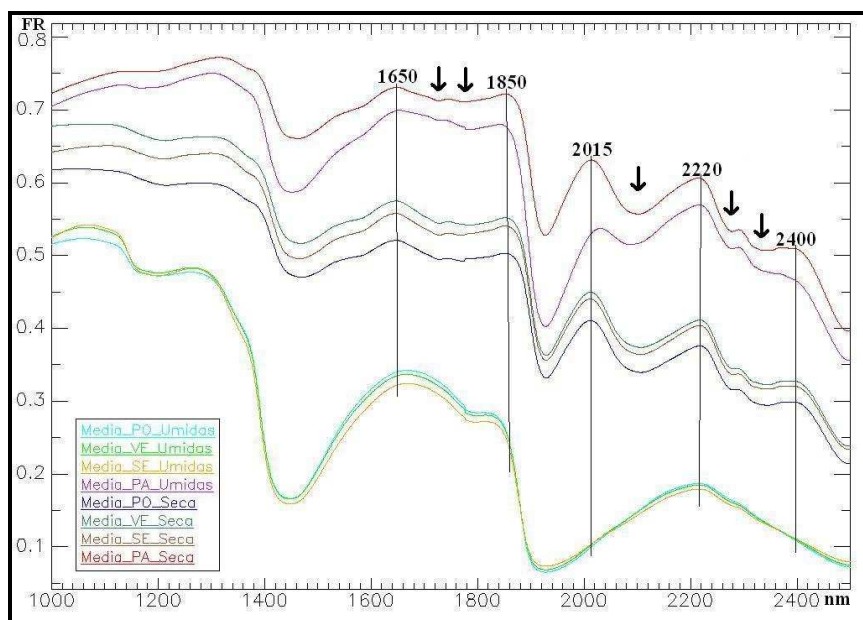


Figura 29. Absorções visíveis no espectro de Fator de Refletância das folhas.

Deste modo, definiram-se três intervalos de análise do FR das folhas, nos seguintes termos:

O primeiro intervalo foi definido de 1650 a 1850 nm, que apresenta duas absorções, uma próxima a 1730 e a outra próxima a 1780nm (Figura 29). E de acordo com DAUGHTRY et al. (2004, 2009, 2010) existe feição de absorção próxima a 1710 nm fortemente correlacionada com a concentração da hemicelulose, celulose e lignina. E consoante CURRAN (1989) existe uma feição de absorção próxima a 1780 nm relacionada às concentrações de Celulose, açúcar e amido.

O segundo intervalo de análise foi de 2015 a 2220 nm, que possui uma clara absorção próxima a 2100 nm (Figura 29), que é coerente com os estudos de vários autores que identificaram uma feição de absorção próxima a 2100 nm fortemente correlacionada com a concentração da hemicelulose, celulose e lignina (CURRAN, 1989; NAGLER et al., 2000; DAUGHTRY, 2001; DAUGHTRY et al., 2004; DAUGHTRY et al., 2009; DAUGHTRY et

al., 2005; DAUGHTRY et al., 2006; MURRAY e WILLIAMS, 1988; DAUGHTRY e HUNT JR. 2008; SERBIN et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2010).

E o terceiro e último intervalo de análise foi definido de 2220 a 2400 nm, que apresentou duas significativas absorções, uma próxima a 2270 e a outra próxima a 2310nm (Figura 29). Sendo que CURRAN (1989) identificou uma feição próxima a 2270 nm associada à celulose, açúcar e amido. E outros estudiosos observaram feições de lignina e celulose próximas a 2300 nm na refletância espectral de plantas secas (DAUGHTRY et al. 2004, 2005, 2009 e 2010; CURRAN, 1989).

Após a definição dos três intervalos de análises, conforme as absorções visíveis no FR, estes intervalos foram analisados com o auxílio da remoção de contínuo.

A segunda forma de análise dos fatores de refletância e remoção do contínuo foi baseada em intervalos espectrais identificados e sugeridos por diversos autores (CURRAN, 1989; NAGLER et al., 2000; DAUGHTRY et al., 2001; DAUGHTRY et al., 2004; DAUGHTRY et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2005; DAUGHTRY et al., 2006; MURRAY e WILLIAMS, 1988; DAUGHTRY e HUNT JR. 2008; SERBIN et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2010) e que foram utilizados como base para investigar quais comprimentos de onda poderiam estar associados às concentrações da lignina, celulose e hemicelulose da cana-de-açúcar.

Definiram-se oito intervalos espectrais, dos quais possuíam um intervalo de análise de aproximadamente 20 nm (10nm antes do comprimento de onda central sugerido pela revisão bibliográfica e 10nm após).

## Primeiro método de análise do Fator de Refletância

### Primeiro Intervalo de Análise: Absorções entre 1650 e 1850 nm

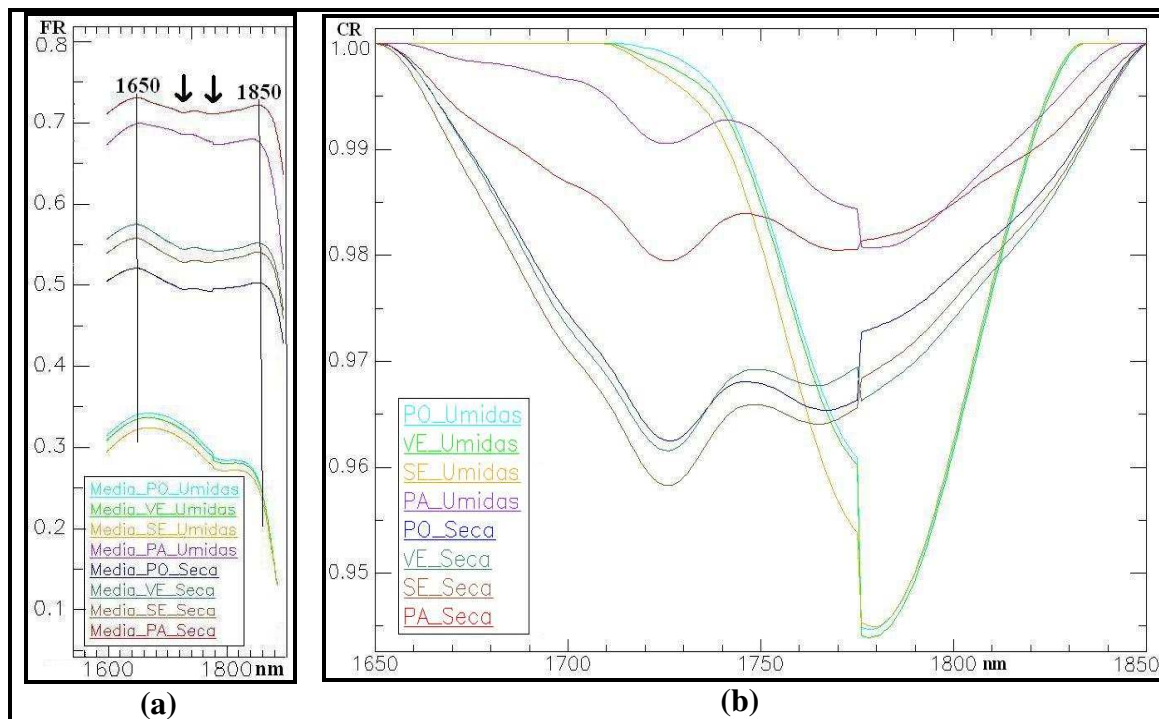


Figura 30. FR (a) e CR (b) das folhas entre 1650 e 1850 nm.

Inicialmente, ressalta-se que segundo GATES et al., 1965; PONZONI e SHIMABUKURO, 2009, na região do infravermelho médio, prevalece a influência da água contida no alvo, quanto maior a umidade na folha, menor é o valor do fator de refletância. A par disto e ao analisar o espectro do FR (Figura 30a), notam-se três agrupamentos bem separados: o primeiro grupo possui os menores valores de FR que são os das folhas úmidas (ponteira, verde e senescente). O segundo agrupamento são os das folhas secas (ponteira, verde e senescente); e o terceiro grupo, com os maiores valores de FR, são os das palhas. Por tais razões, infere-se, que é possível visualizar as absorções dos componentes nos dois últimos grupos.

No espectro do FR, percebem-se suaves absorções das palhas e das folhas secas (ponteira, verde e senescente) próximo a 1730 e 1780 nm (Figura 30a). As folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) não apresentaram absorções visíveis próximas a 1730nm, contudo, é perceptível uma absorção nestas folhas próximas a 1780nm.

No espectro do CR (Figura 30b), próximo a 1780 nm, nota-se que todas as folhas apresentaram absorções, ressaltando que as folhas úmidas apresentaram absorções maiores que as folhas secas neste intervalo.

Na Figura 31, podem ser vistas as curvas da remoção de contínuo, separadas por tipo de folha, com o intuito de compará-las nas duas condições (úmidas e secas).

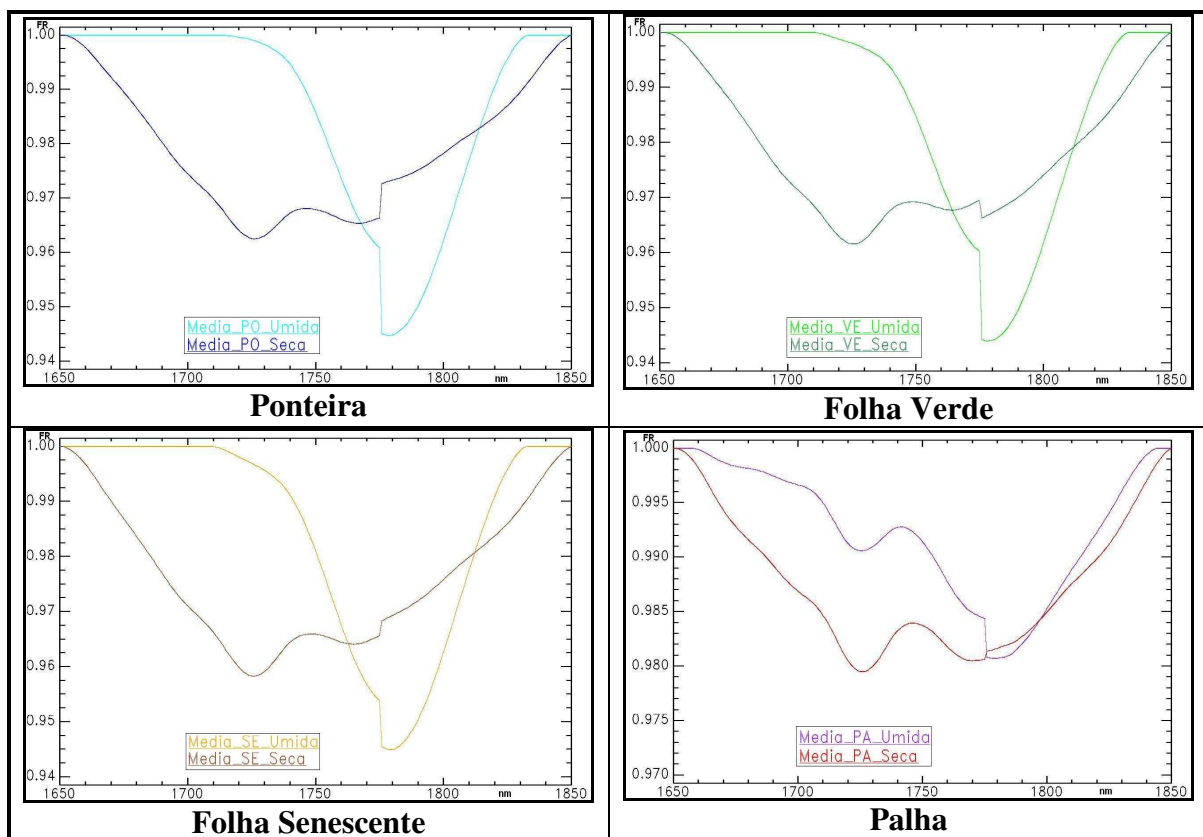


Figura 31. Remoção de Contínuo das folhas entre 1650 e 1850 nm.

O espectro da remoção de contínuo (Figura 31) mostra que, próximo a 1730nm, todas as folhas secas apresentaram absorções maiores que as úmidas. No entanto, próximo a 1780nm, ocorreu o inverso, pois as folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) apresentaram absorções maiores que as folhas secas, e os valores das absorções das palhas são similares.

Tabela 9. Valores de Absorção da Remoção de Contínuo entre 1650 e 1850 nm.

Comprimento da Absorção	Pico	Profundidade da Absorção	Comprimento da Absorção	Pico	Profundidade da Absorção
PO úmida 1726	0,99899	0,00101*	PO úmida 1779	0,94470	<b>0,05530</b>
PO seca 1726	0,96248	<b>0,03752</b>	PO seca 1767	0,96535	<b>0,03465</b>
VE úmida 1726	0,99787	0,00213*	VE úmida 1778	0,94395	<b>0,05605</b>
VE seca 1726	0,96156	<b>0,03844</b>	VE seca 1776	0,96623	<b>0,03377</b>
SE úmida 1726	0,99670	0,00330*	SE úmida 1780	0,94494	<b>0,05506</b>
SE seca 1726	0,95827	<b>0,04173</b>	SE seca 1765	0,96406	<b>0,03594</b>
PA úmida 1726	0,99058	0,00942*	PA úmida 1778	0,98071	<b>0,01929</b>
PA seca 1726	0,97947	<b>0,02053</b>	PA seca 1770	0,98048	<b>0,01952</b>

**\*Ruídos**

Analisando o espectro da remoção de contínuo, próximo a 1730 nm, percebe-se que, somente as folhas secas apresentaram absorções significativas, conforme a Tabela 9. As folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) não apresentaram absorções e a palha úmida apresentou absorção de 0,00942 (Tabela 9), que neste trabalho, está sendo considerado como um provável ruído, pois apresentou valor de absorção menor que 0,01.

Entretanto, pode-se verificar na Tabela 9 que, todas as folhas apresentaram valores de absorções significativas próximo a 1780nm.

Depreende-se que, todas as absorções maiores que 0,01, na análise da remoção de contínuo, estão associadas aos seus respectivos componentes que, de acordo com DAUGHTRY et al. (2004, 2009, 2010) há um pico de absorção próxima a 1710 nm fortemente correlacionada com a concentração da hemicelulose, celulose e lignina. E levando-se em consideração os estudos de CURRAN (1989), há que se falar que existe uma feição de absorção próxima a 1780 nm relacionada às concentrações de celulose, açúcar e amido.



## Segundo Intervalo de Análise: Absorções entre 2015 e 2220 nm

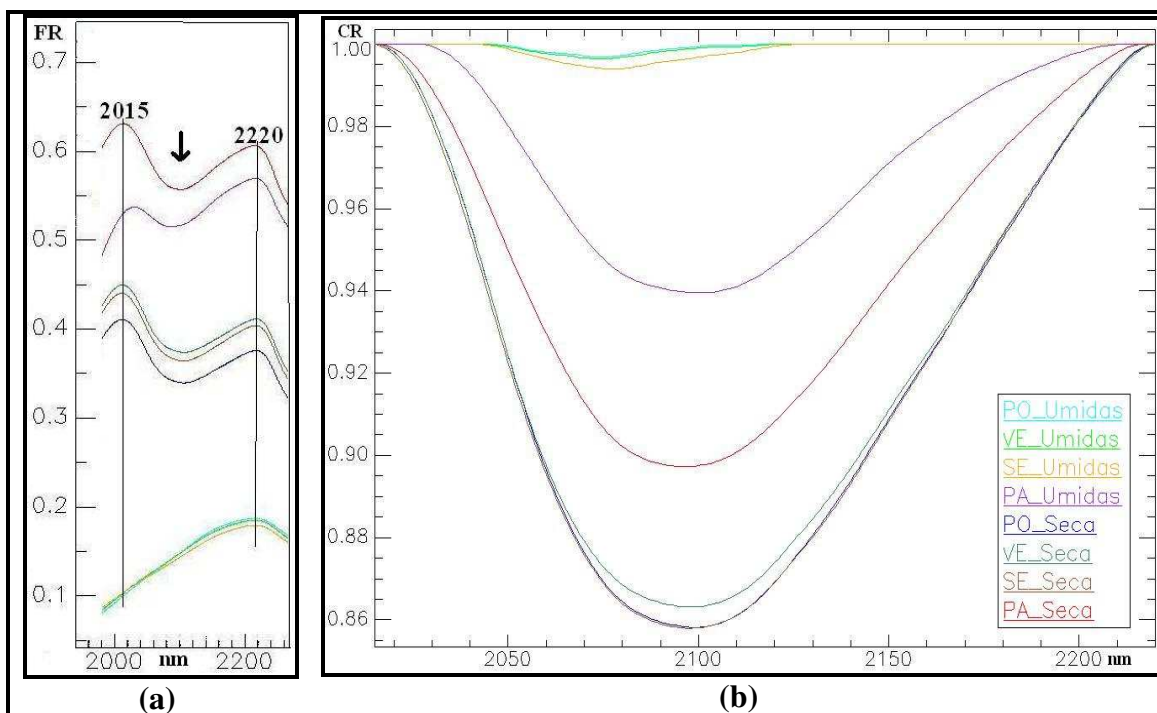


Figura 32. FR (a) e CR (b) das folhas entre 2015 e 2220 nm.

Ao analisar o espectro do FR (Figura 32a), percebe-se que, similarmente aos resultados encontrados no intervalo 1650 a 1850 nm, os resultados encontrados neste estudo (2015 - 2220nm) também ocorreram três agrupamentos bem definidos, o primeiro grupo é o das folhas úmidas (ponteira, verde e senescente), o segundo é o das folhas secas (ponteira, verde e senescente), e o terceiro grupo, com os maiores valores de FR, é o das palhas.

Nota-se, também, que a palha apresentou os maiores valores no FR (Figura 32a), entretanto, na remoção de contínuo elas foram intermediárias entre as folhas secas (ponteira, verde e senescente) e as folhas úmidas (ponteira, verde e senescente), como mostra a Figura 32b. É provável que esta organização/ordem entre as folhas se justifique em função das afirmações de DAUGHTRY et al. (2009, 2010) que verificaram que proporções consideráveis de celulose e hemicelulose da palha do trigo declinaram significativamente em função dos dias de decomposição (0 a 80 dias) enquanto a lignina aumentou significativamente.

No espectro do FR (Figura 32a), observam-se absorções bem definidas das palhas e das folhas secas (ponteira, verde e senescente) próximo a 2100 nm. As folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) não apresentaram absorções visíveis.

Na Figura 33, mostram-se as curvas com remoção de contínuo, separadas por tipo de folha, com o intuito de compará-las nas duas condições úmidas e secas.

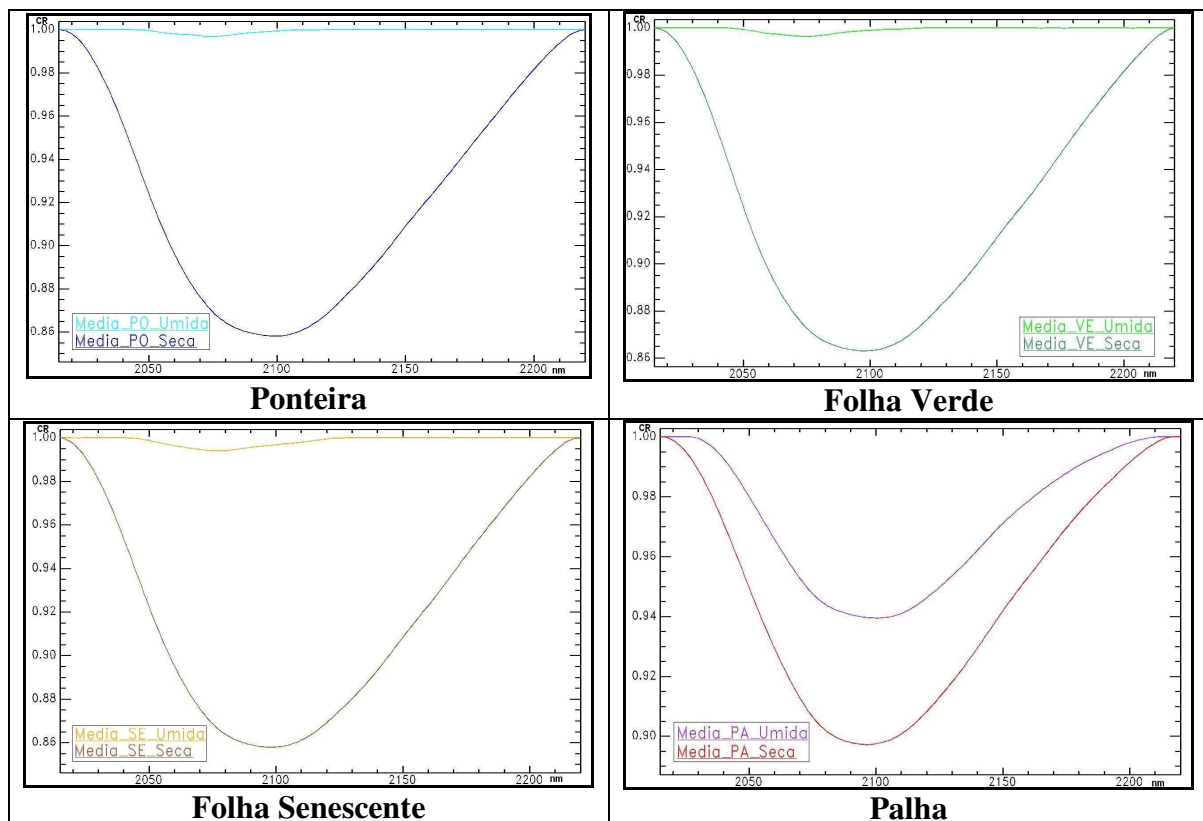


Figura 33. Remoção de Contínuo das folhas entre 2015 e 2220 nm.

No espectro do CR (Figura 33), observa-se que todas as folhas secas apresentaram absorções maiores que as folhas úmidas. Na Tabela 10, seguem os valores das absorções no espectro da remoção de contínuo para o intervalo de análise entre 2015 e 2220nm.

Tabela 10. Valores de Absorção da Remoção de Contínuo entre 2015 e 2220 nm. \*Ruídos

Comprimento da Absorção	Pico	Profundidade da Absorção
PO úmida 2075	0,99680	0,00320*
PO seca 2099	0,85816	<b>0,14184</b>
VE úmida 2101	0,99638	0,00362*
VE seca 2097	0,86316	<b>0,13684</b>
SE úmida 2076	0,99402	0,00598*
SE seca 2098	0,85797	<b>0,14203</b>
PA úmida 2101	0,93955	<b>0,06045</b>
PA seca 2097	0,89727	<b>0,10273</b>

Analisando os valores das absorções da remoção do contínuo (Tabela 10), verifica-se que, com exceção das folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) que não apresentaram absorções, todas as demais folhas secas e a palha úmida apresentaram valores de absorções significativos e maiores que 0,01 no CR, indicando que estas absorções não são ruídos, e muito provavelmente, estão associadas aos componentes de interesse, conforme as afirmações de vários autores que identificaram uma feição de absorção próxima a 2100 nm fortemente correlacionada com a concentração da hemicelulose, celulose e lignina (CURRAN, 1989; NAGLER et al., 2000; DAUGHTRY, 2001; DAUGHTRY et al., 2004; DAUGHTRY et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2005; DAUGHTRY et al., 2006; MURRAY e WILLIAMS, 1988; DAUGHTRY e HUNT JR. 2008; SERBIN et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2010).

Vale ressaltar que GALVÃO et al. (2005) identificaram feição de absorção em cinco variedades de cana em 2103 nm associada à lignina e celulose. E neste trabalho, observou-se absorção associada aos componentes (lignina, celulose e hemicelulose) em 2101 nm. De modo que, é importante ressaltar que no estudo desenvolvido pelos autores foi utilizado o sensor hiperespectral Hyperion a bordo do satélite Earth Observing-1 (EO-1), fato que caracteriza a diferença no modo de aquisição dos dados, pois as informações da cultura da cana-de-açúcar, elaborada por GALVÃO et al. (2005), foram extraídas de uma imagem capturada em nível orbital. E as informações deste estudo foram adquiridas por espectroradiometria de campo, medição espectral folha a folha, utilizando o espectroradiômetro FieldSpec\* Pro com o auxílio do *Leaf-clip*, que permite medições comparáveis a de uma esfera integradora sem interferências atmosféricas. Os diferentes níveis de capturas de informações mostram que os comprimentos de onda centrais associados aos componentes da lignina e da celulose apresentaram valores aproximados.

É importante ressaltar que a absorção próxima a 2100 nm foi acentuada tanto no FR quanto na remoção de contínuo (CR).

### Terceiro Intervalo de Análise: Absorções entre 2220 e 2400 nm

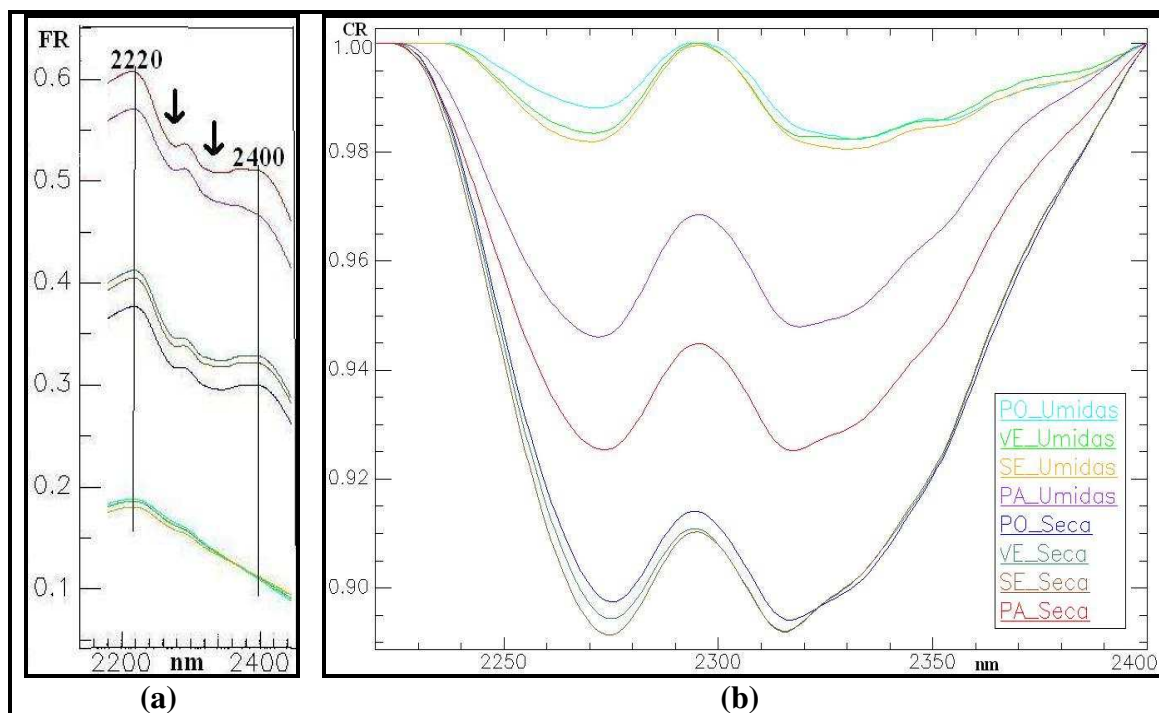


Figura 34. FR e CR das folhas entre 2220 e 2400 nm.

Analisando-se o espectro do FR (Figura 34a), observa-se que, o agrupamento e a organização entre as folhas próximas a 2300 nm foram similares às absorções próximas a 1730, 1780 e 2100 nm, pois ocorreram os três agrupamentos na mesma sequência, em que as palhas possuem os maiores valores de FR, estando abaixo, as folhas secas (ponteira, verde e senescente), seguida das folhas úmidas (ponteira, verde e senescente).

No espectro do FR (Figura 34a), percebem-se absorções bem definidas das palhas e das folhas secas (ponteira, verde e senescente) próximos a 2270 e 2310 nm. As folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) apresentaram absorções muito suaves, quase imperceptíveis, próximo a 2270 nm; e não apresentaram absorções próximas a 2310nm.

Entretanto, analisando-se a remoção de contínuo (Figura 34b), verifica-se que o agrupamento e a organização deste intervalo (2220 a 2400nm), assemelha-se ao intervalo da absorção em 2100nm, pois as folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) possuem os menores valores de absorção, as palhas são intermediárias e as folhas secas (ponteira, verde e senescente) possuem as maiores absorções.

Na Figura 35, podem ser observadas as curvas da remoção de contínuo, separadas por tipo de folha, com o intuito de compará-las nas duas condições (úmidas e secas).

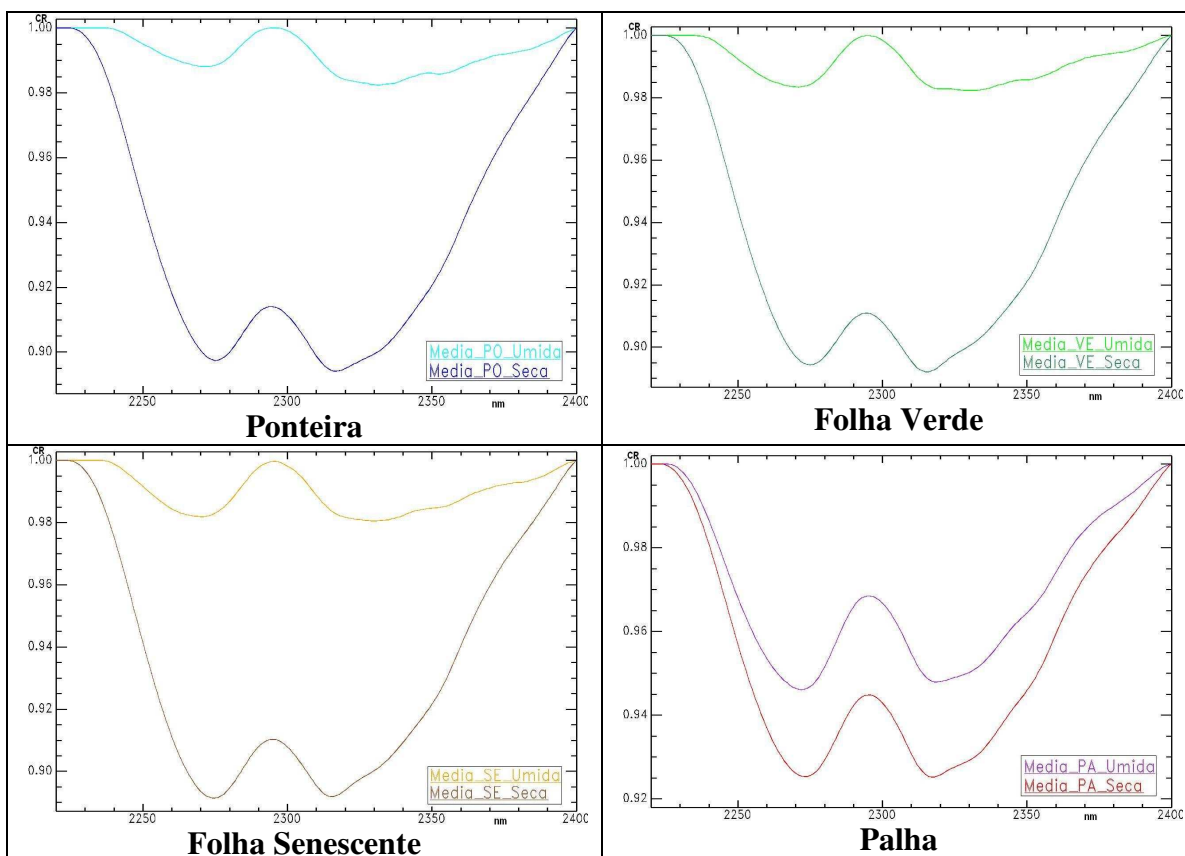


Figura 35. Remoção de Contínuo das folhas entre 2220 e 2400 nm.

Todas as folhas secas apresentaram absorções maiores que as folhas úmidas, em ambos os comprimentos de ondas centrais, conforme a Figura 35.

Todas as folhas apresentaram absorções significativas próximas a 2270 e 2310 nm, nenhuma folha obteve absorção menor que 0,01 na remoção de contínuo, como pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11. Valores de Absorção da Remoção de Contínuo entre 2220 e 2400 nm.

Comprimento da Absorção	Pico	Profundidade da Absorção	Comprimento da Absorção	Pico	Profundidade da Absorção
PO úmida 2272	0,98813	<b>0,01187</b>	PO úmida 2331	0,98247	<b>0,01753</b>
PO seca 2275	0,89742	<b>0,10258</b>	PO seca 2317	0,89410	<b>0,10590</b>
VE úmida 2271	0,98349	<b>0,01651</b>	VE úmida 2331	0,98235	<b>0,01765</b>
VE seca 2275	0,89436	<b>0,10564</b>	VE seca 2315	0,89213	<b>0,10787</b>
SE úmida 2271	0,98195	<b>0,01805</b>	SE úmida 2330	0,98058	<b>0,01942</b>
SE seca 2275	0,89140	<b>0,10860</b>	SE seca 2315	0,89192	<b>0,10808</b>
PA úmida 2272	0,94611	<b>0,05389</b>	PA úmida 2319	0,94797	<b>0,05203</b>
PA seca 2073	0,92535	<b>0,07465</b>	PA seca 2317	0,92524	<b>0,07476</b>

A Tabela 11 demonstra que todos os valores de absorções foram maiores que 0,01 e por este motivo, foram consideradas respostas de absorções espectrais associadas aos componentes, conforme os estudos de CURRAN (1989) que identificou feição próxima a 2270 nm associada à celulose, açúcar e amido. E outros estudos observaram, de modo geral, feições de lignina e celulose próximas a 2300 nm na refletância espectral de plantas secas (DAUGHTRY et al. 2004, 2005, 2009 e 2010; CURRAN, 1989).

As absorções próximas a 2300 nm foram expressivas tanto no FR quanto na remoção de contínuo.

## Conclusão da primeira análise

Dentre as 40 possibilidades de ocorrência de absorções realizadas nesta 1ª análise, verificou-se, visivelmente, a ocorrência de 77,5% de absorções associadas aos componentes estruturais (lignina, celulose e hemicelulose) no espectro de Fator de Refletância, consoante demonstra a Tabela 12.

Tabela 12. Síntese das absorções dos componentes no Fator de Refletância - 1ª análise.

	Ponteiras		Verdes		Senescentes		Palhas	
	Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca
1727	R	•	R	•	R	•	•	•
1776	•	•	•	•	•	•	•	•
2100	R	•	R	•	R	•	•	•
2270	•	•	•	•	•	•	•	•
2310	R	•	R	•	R	•	•	•

• → Ocorrência visível da absorção associada aos componentes.

R → Não-ocorrência da absorção associada aos componentes.

A análise realizada no espectro da remoção de contínuo identificou a ocorrência de 82,5% de absorções associadas aos componentes estruturais (lignina, celulose e hemicelulose), de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13. Síntese das absorções dos componentes na Remoção de Contínuo - 1ª análise.

	Ponteiras		Verdes		Senescentes		Palhas	
	Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca
1727	R	•	R	•	R	•	R	•
1776	•	•	•	•	•	•	•	•
2100	R	•	R	•	R	•	•	•
2270	•	•	•	•	•	•	•	•
2310	•	•	•	•	•	•	•	•

• → Ocorrência da absorção associada aos componentes.

R → Considerado Ruído, absorção no CR menor que 0,01.

Dentre os 7 ruídos identificados na análise da remoção do contínuo, 6 ocorreram em folhas úmidas (ponteira, verde e senescente). Talvez explicado pela presença de água na folha,

que domina as propriedades espectrais das folhas e omite/mascara as respostas dos componentes estruturais.

De modo geral, a partir desta primeira análise pode-se confirmar a ocorrência de absorções associadas aos componentes lignina, celulose e hemicelulose, nas folhas da cana-de-açúcar, próximas a 1730, 1780, 2100, 2270 e 2310nm, considerando-se aqueles citados em CURRAN (1989), NAGLER et al. (2000), DAUGHTRY (2001), DAUGHTRY et al. (2004), DAUGHTRY et al. (2005); DAUGHTRY et al. (2006); DAUGHTRY e HUNT JR. (2008), DAUGHTRY et al. (2009), SERBIN et al. (2009), DAUGHTRY et al. (2010).



## Segundo método de análise do Fator de Refletância

### Análise próxima a 1120 nm

CURRAN (1989) identificou feição de absorção próxima ao comprimento de onda 1120 nm associada somente à lignina. Ao analisar o FR das folhas simultaneamente (Figura 36), percebe-se que, visualmente, não ocorre absorção próxima a 1120 nm de nenhuma das folhas, nem úmidas nem secas.

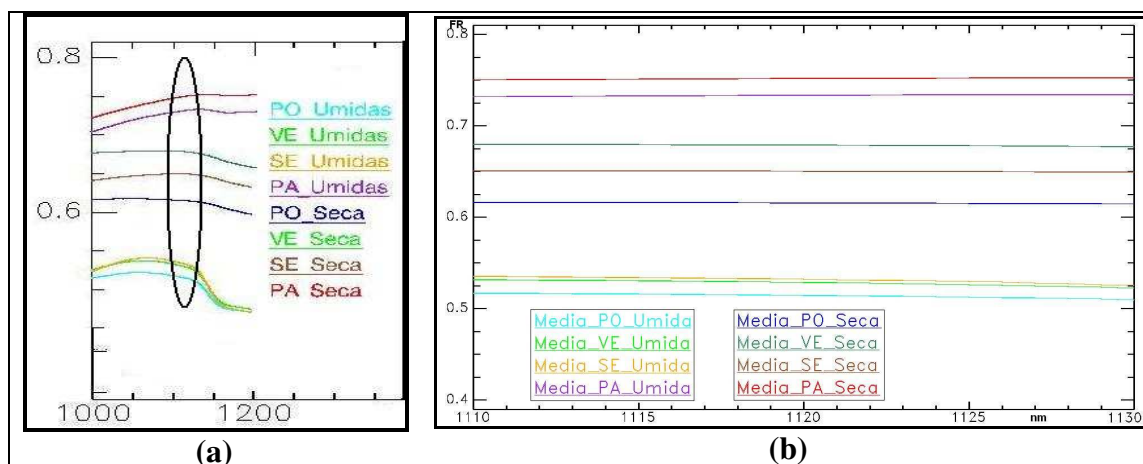
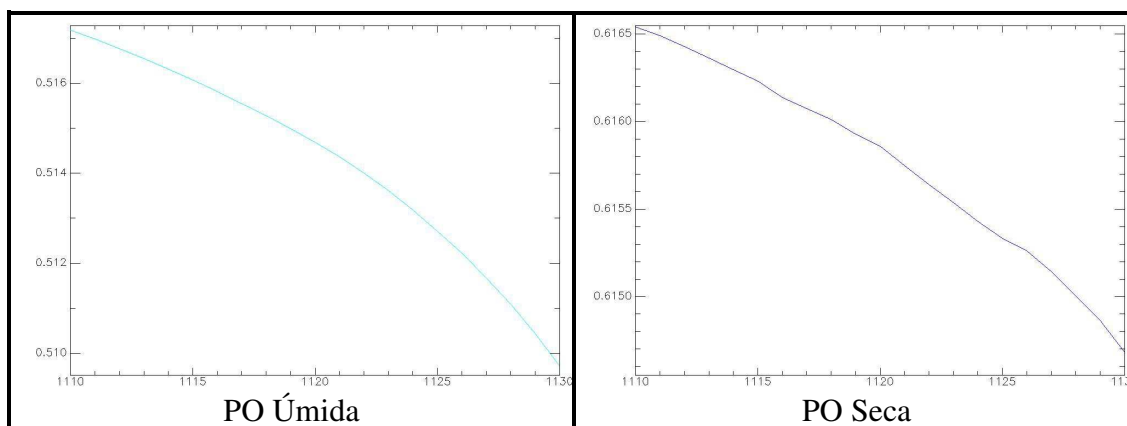


Figura 36. FR das Folhas próximo a 1120nm.

A Figura 36a trata-se do espectro, entre 1000 e 2500nm, recortado entre 1000 e 1200nm. A Figura 36b trata-se do intervalo de análise entre 1110 e 1130nm.



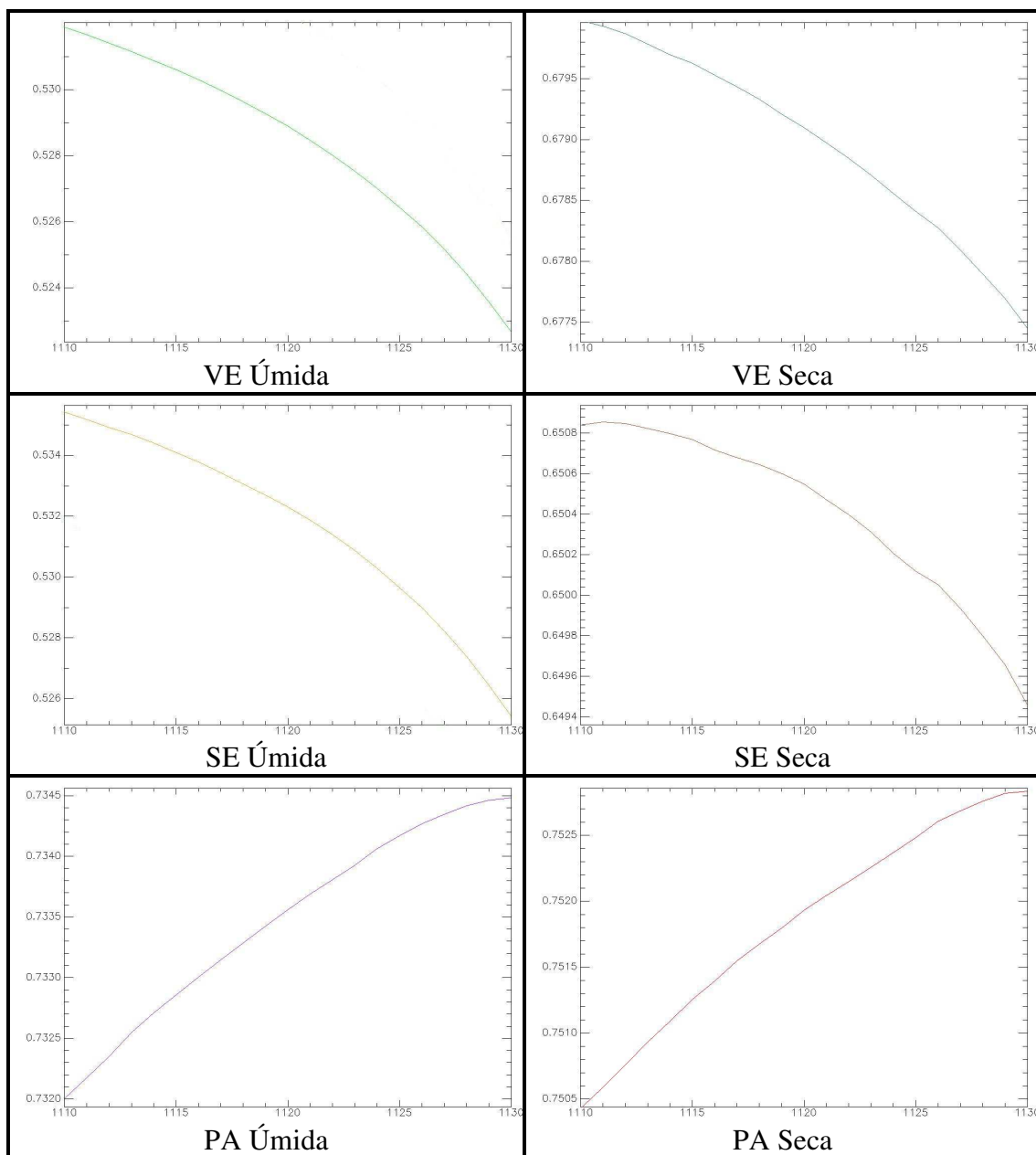


Figura 37. FR das Folhas próximo a 1120nm, separadamente.

Na Figura 37, visualiza-se a curva espectral de cada folha, entre 1110 e 1130nm, isoladamente, nota-se que nenhuma folha apresentou absorção significativa.

De acordo com a Tabela 14, onde foram realizados os cálculos para identificar o menor valor de FR, constatou-se que houve uma diminuição constante do fator de refletância do início ao fim do intervalo de análise para todas as folhas, com exceção das palhas.

Tabela 14. Valor da absorção da lignina no FR próximo a 1120nm.

$\lambda$ /FR	PO Úmida	PO Seca	VE Úmida	VE Seca	SE Úmida	SE Seca	PA Úmida	PA Seca
1110	0,517180	0,616541	0,531883	0,679979	0,535425	0,650839	0,732000	0,750424
1124	0,51318	0,615431	0,527006	0,678557	0,530299	0,650208	0,734061	0,752368
1130	0,509715	0,614684	0,522662	0,677446	0,525420	0,649460	0,734488	0,752836
Central	-0,003996	-0,001109	-0,004876	-0,001420	-0,005125	-0,000630	0,0020609	0,001944
Final	-0,007464	-0,001856	-0,009221	-0,002533	-0,010004	-0,001379	0,002488	0,002412

Os valores negativos apresentados na Tabela 14 significam que houve diminuição do FR ao longo do intervalo de análise. Os valores positivos indicam um aumento no FR em relação ao comprimento de onda inicial do intervalo de análise, como é o caso da palha, que apresentou aumento gradativo do FR ao longo do intervalo de análise, conforme mostra a Figura 38.

Com exceção das palhas, todas as folhas apresentaram diminuições gradativas no FR ao longo do intervalo, fato que pode indicar uma absorção no comprimento de onda central ou apenas uma diminuição contínua do FR da folha. Os valores de absorções são relativamente pequenos, uma vez que seu valor de absorção máximo é de 0,005125 da folha senescente úmida, caracterizando-se como ruído.

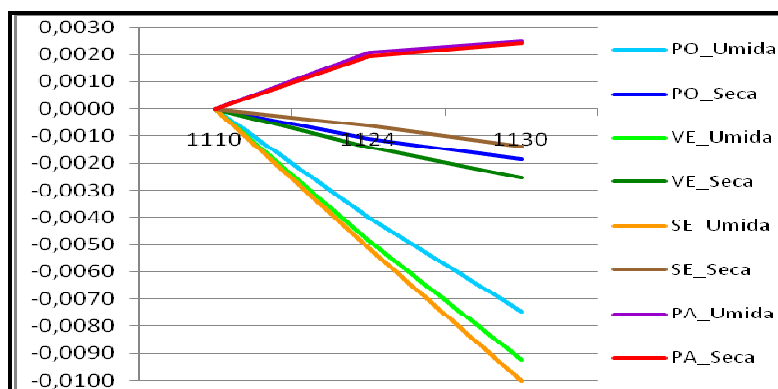


Figura 38. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 1110 e 1130 nm.

O comprimento de onda central foi definido com o auxílio da remoção de contínuo, que identificou várias absorções no intervalo entre 1110 e 1130 nm (Figura 39).

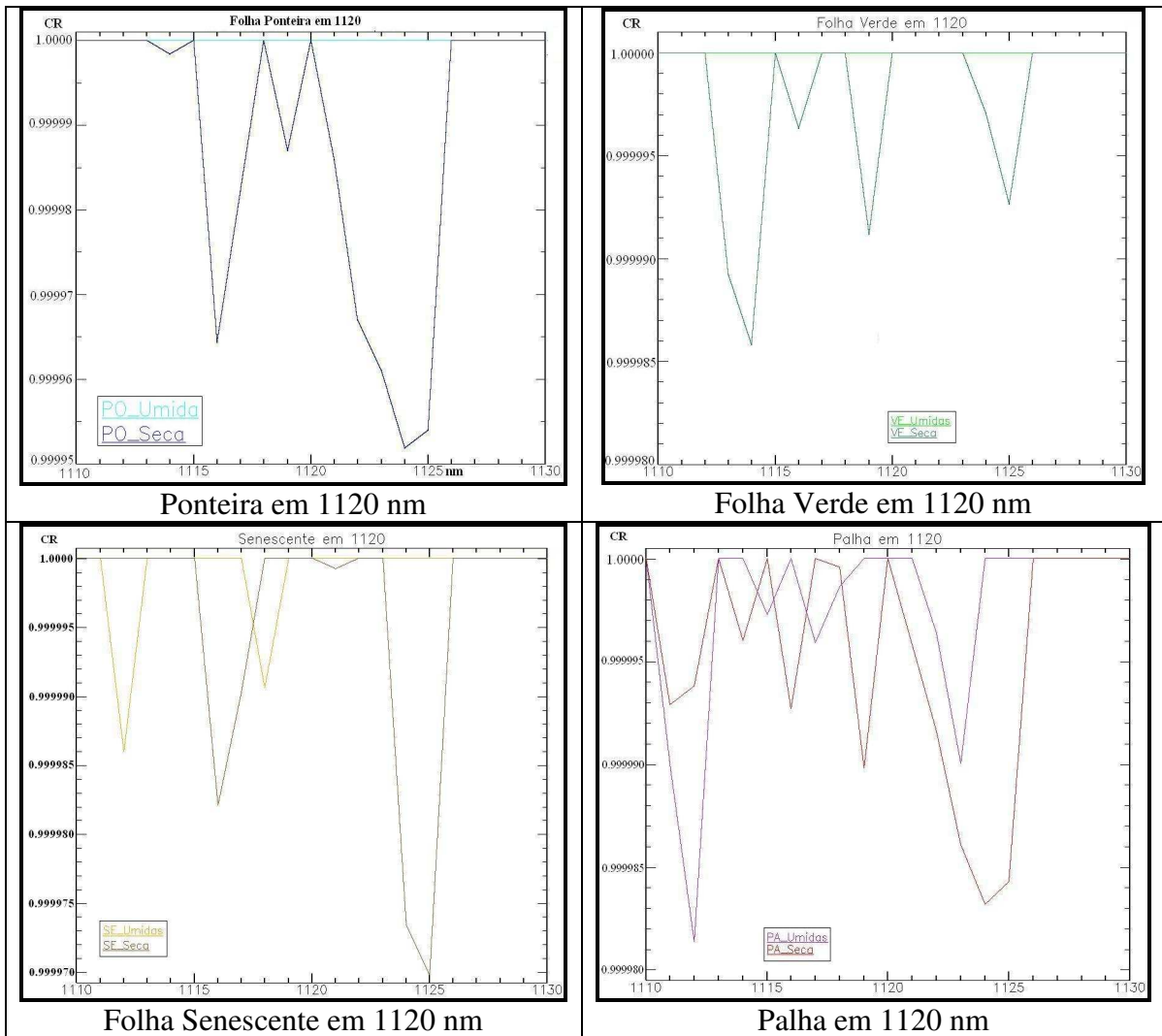


Figura 39. Remoção de Contínuo das folhas próximo a 1120nm.

A análise da remoção de contínuo apresentou mais de uma absorção no intervalo entre 1110 e 1130nm para uma mesma folha, podendo ser considerados como ruídos (Figura 39).

Tabela 15. Valores das Absorções da Remoção de contínuo próximos a 1120nm.

Ponteira			Verde			Senescente			Palha		
λ	Valor	Prof.	λ	Valor	Prof.	λ	Valor	Prof.	λ	Valor	Prof.
úmida	1	0	úmida	1	0	úmida	1	0	úmida	0,99999	<b>0,00001</b>
seca			seca			seca			Seca		
1116	0,99996	<b>0,00004</b>	1114	0,99998	<b>0,00002</b>	1116	0,99998	<b>0,00002</b>	1124	0,99998	<b>0,00002</b>
seca			seca			seca					
1119	0,99999	<b>0,00001</b>	1119	0,99999	<b>0,00001</b>	1125	0,99997	<b>0,00003</b>			
seca			seca								
1124	0,99995	<b>0,00005</b>	1125	0,99999	<b>0,00001</b>						

Na remoção de contínuo, as folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) não apresentaram absorções. As folhas secas (ponteira e palha) apresentaram absorções em 1124 nm. Já as folhas secas (verde e senescente) apresentaram absorções em 1125 nm. A palha úmida apresentou absorção em 1123 nm. No entanto, estas absorções apresentaram valores muito pequenos, o que pode representar apenas sinais de ruídos.

Conclui-se que não é possível fazer afirmações se realmente ocorreram absorções das folhas neste intervalo espectral associadas à lignina conforme afirma CURRAN (1989), pois este intervalo espectral não apresenta absorções no FR e apresenta baixos valores de absorções na remoção de contínuo, que podem representar apenas ruídos.

### **Análise próxima a 1420 nm**

CURRAN (1989) identificou feição de absorção em 1420 nm associada apenas ao componente lignina. Na Figura 40, percebe-se visualmente que não ocorre absorção em 1420 nm em nenhuma folha, nem úmida nem seca.

É importante lembrar que esta região sofre forte influência da absorção da água em 1450 nm, o que pode influenciar na absorção do componente lignina em 1420 nm.

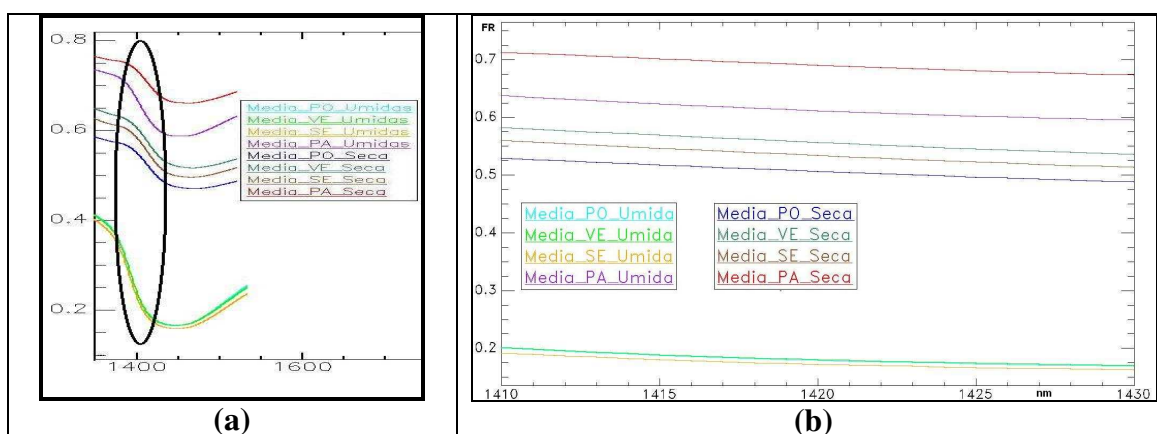


Figura 40. FR das Folhas próximo a 1420nm.

A Figura 40a trata-se do espectro, entre 1000 e 2500nm, recortado entre 1400 e 1500nm. A Figura 40b trata-se do intervalo de análise entre 1410 e 1430nm. Percebe-se que não é visível a ocorrência da absorção das folhas, provavelmente, em função da forte absorção da água que ocorre em 1450nm.

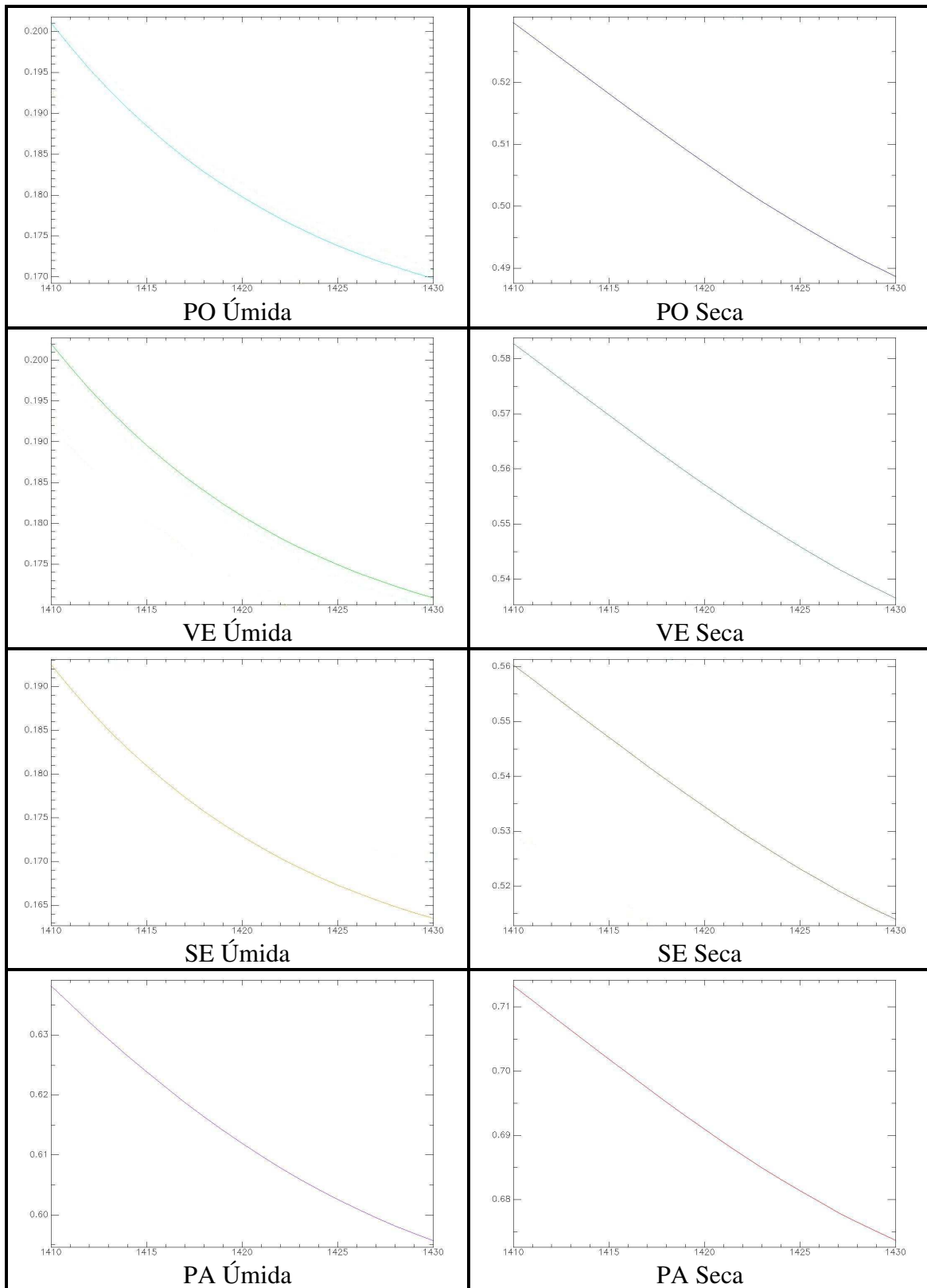


Figura 41. FR das Folhas próximo a 1420 nm separadamente.

Na Figura 41, pode-se visualizar a curva espectral de cada folha, entre 1410 e 1430nm, isoladamente. Visualmente, nenhuma folha apresentou absorção próxima a 1420 nm, provavelmente, devido à forte influência da absorção da água em 1450 nm. Todas as folhas apresentaram, do início ao fim do intervalo, uma diminuição constante do FR, sem absorções visíveis (Tabela 16).

Tabela 16. Valor da absorção da lignina no FR próximo a 1420 nm.

$\lambda$ /FR	PO Úmida	PO Seca	VE Úmida	VE Seca	SE Úmida	SE Seca	PA Úmida	PA Seca
1410	0,201025	0,529630	0,202004	0,582740	0,192462	0,560284	0,638178	0,713223
1420	0,179761	0,507034	0,180899	0,557170	0,172869	0,534467	0,611932	0,690966
1430	0,169841	0,488680	0,170879	0,536586	0,163494	0,514000	0,595749	0,673690
Central	-0,021265	-0,022595	-0,021105	-0,025570	-0,019594	-0,025816	-0,026246	-0,022257
Final	-0,031185	-0,040950	-0,031125	-0,046155	-0,028969	-0,046284	-0,042429	-0,039533

De acordo com a Tabela 16, verifica-se que todas as folhas apresentaram diminuição do FR ao longo do intervalo de análise. As absorções no FR são relativamente pequenas, sendo que a maior absorção é de 0,02624 da palha úmida.

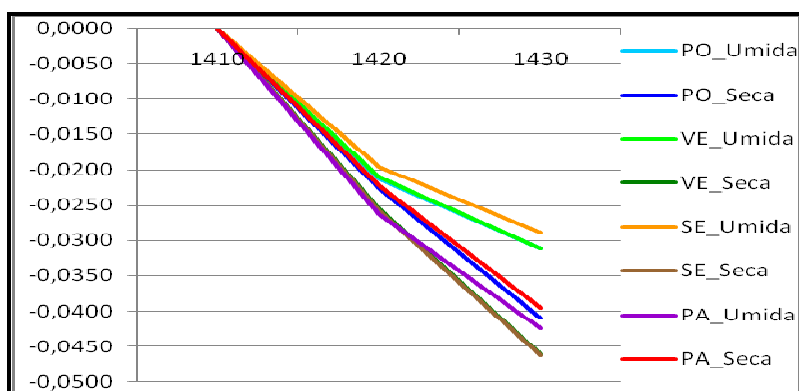


Figura 42. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 1410 e 1430 nm.

A Figura 42, elaborada a partir da Tabela 16, mostra que, visualmente, pode ter ocorrido uma suave absorção das folhas próxima a 1420 nm, entretanto, não é possível afirmar que realmente houve apenas analisando os valores de FR.

Portanto, foi analisada a remoção de contínuo entre 1410 e 1430 nm, conforme mostra a Figura 43.

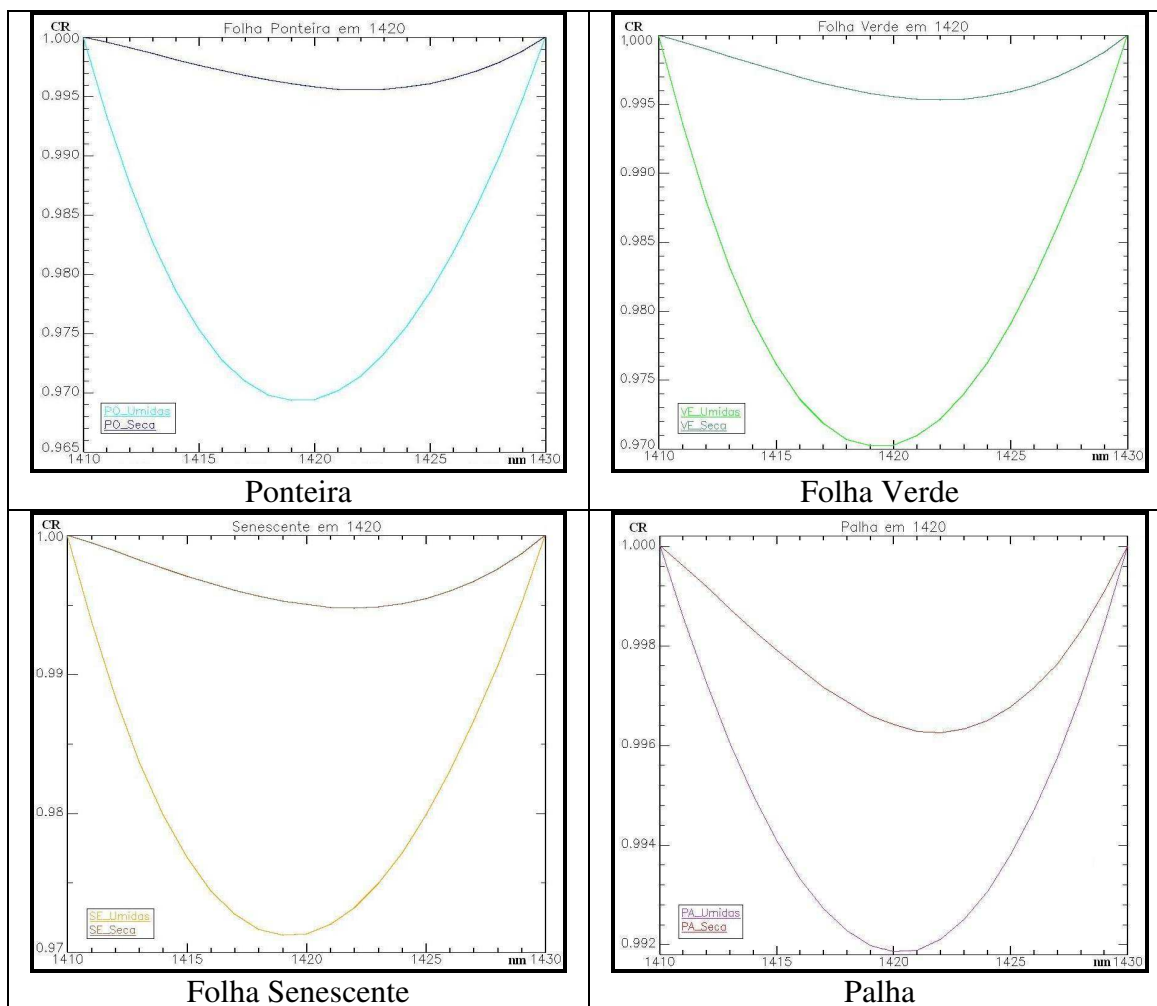


Figura 43. Remoção de Contínuo das folhas em 1420nm.

Tabela 17. Valores das Absorções da Remoção de contínuo próximos a 1420nm.

Folhas		$\lambda$ da Absorção (nm)	Valor da Absorção	Profundidade da Absorção
<b>Ponteira</b>	Úmida	1419	0,9693	0,0306
	Seca	1422	0,9955	0,0044
<b>Verde</b>	Úmida	1419	0,9702	0,0297
	Seca	1422	0,9953	0,0046
<b>Senescente</b>	Úmida	1419	0,9712	0,0287
	Seca	1422	0,9947	0,0052
<b>Palha</b>	Úmida	1420	0,9918	0,0081
	Seca	1422	0,9962	0,0037

A Figura 43 e a Tabela 17 da remoção de contínuo mostram que ocorreram significativas absorções para as folhas úmidas (ponteira, verde e senescente). Desta maneira, pode-se afirmar que há possibilidade destas absorções estarem associadas à lignina de acordo



com os estudos de CURRAN (1989), uma vez que as absorções são maiores que 0,01 na remoção de contínuo.

No entanto, todas as folhas secas e a palha úmida apresentaram absorções menores que 0,01 no CR, de modo que, não é possível afirmar se realmente essas folhas possuem absorções associadas à lignina conforme afirma CURRAN (1989), pois, apresentaram absorções quase imperceptíveis no FR e demonstraram baixos valores de absorções na remoção de contínuo, que podem representar apenas ruídos.

### **|Análise próxima a 1700 nm**

DAUGHTRY et al. (2004, 2009, 2010) identificaram uma refletância próxima a 1710 nm fortemente correlacionada com a concentração da hemicelulose, celulose e lignina. E de acordo com CURRAN (1989) há uma feição de absorção próxima a 1780 nm relacionada às concentrações de Celulose, açúcar e amido.

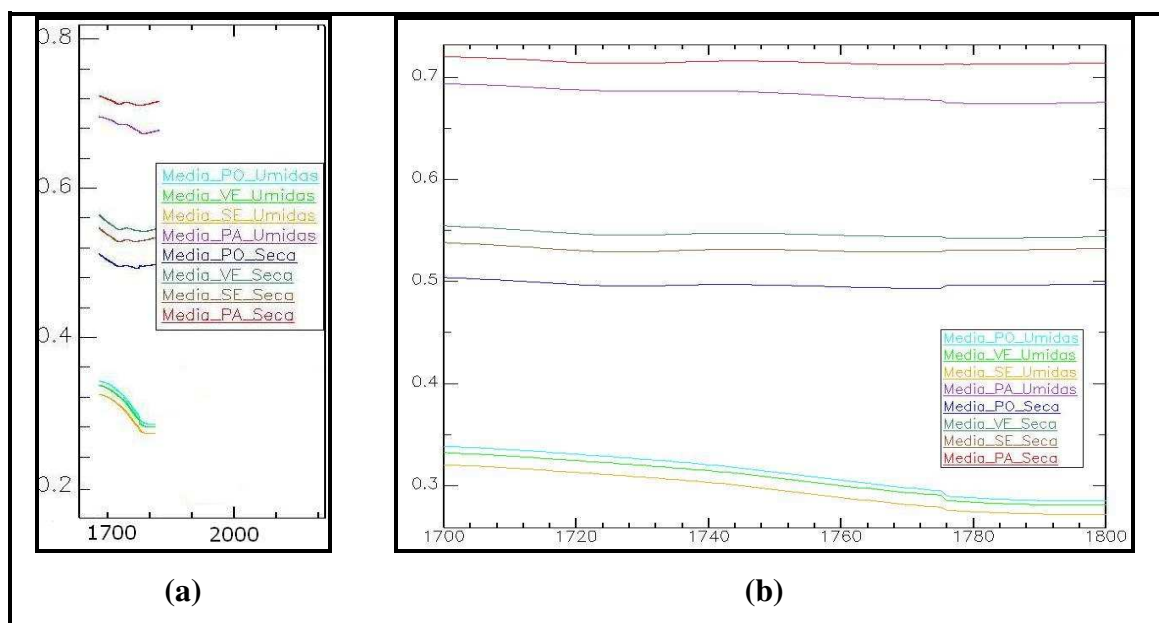


Figura 44. FR das Folhas próximo a 1700nm.

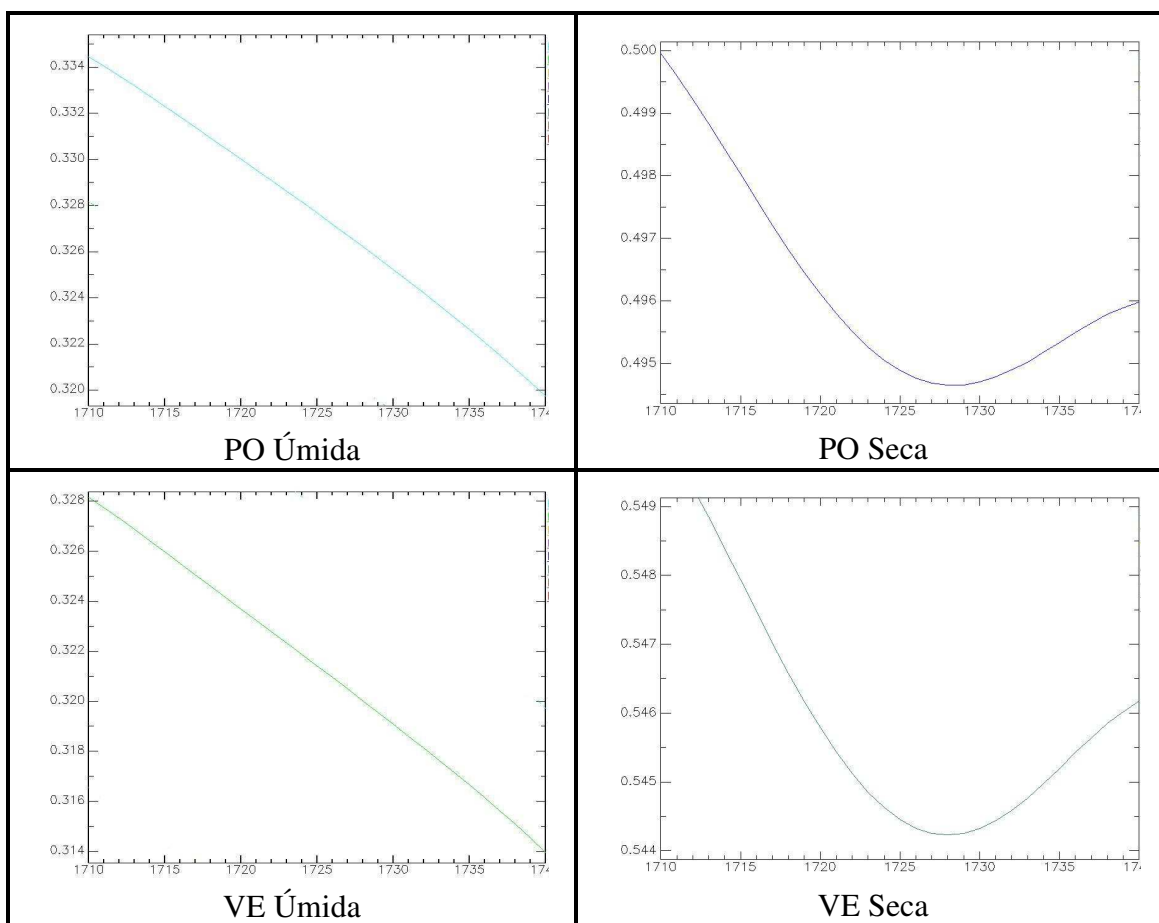
A Figura 44a trata-se do espectro, entre 1000 e 2500nm, recortado entre 1700 e 1800nm. A Figura 44b trata-se do intervalo de análise entre 1700 e 1800nm. De acordo com a Figura 44, não houve absorção de nenhuma folha em 1710nm. Entretanto, no intervalo de

análise entre 1700 a 1800 nm ocorreram, visualmente, claras absorções em dois comprimentos de ondas, a primeira próxima a 1730 nm e a outra próxima a 1780 nm.

Nota-se que, as palhas e as folhas secas (ponteira, verde e senescente) apresentaram absorções próximas a 1727 e 1776 nm. No entanto, as folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) apresentaram absorções somente próximo a 1776 nm.

### Análise próxima a 1730 nm

Ao analisar, visualmente, o FR próximo 1730 nm (intervalo analisado entre 1710 e 1740 nm), observou-se que, ocorreram suaves absorções na palha úmida e em todas as folhas secas, pois, as folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) não apresentaram absorções, mas sim uma diminuição contínua do FR, como pode ser visto na Figura 45.



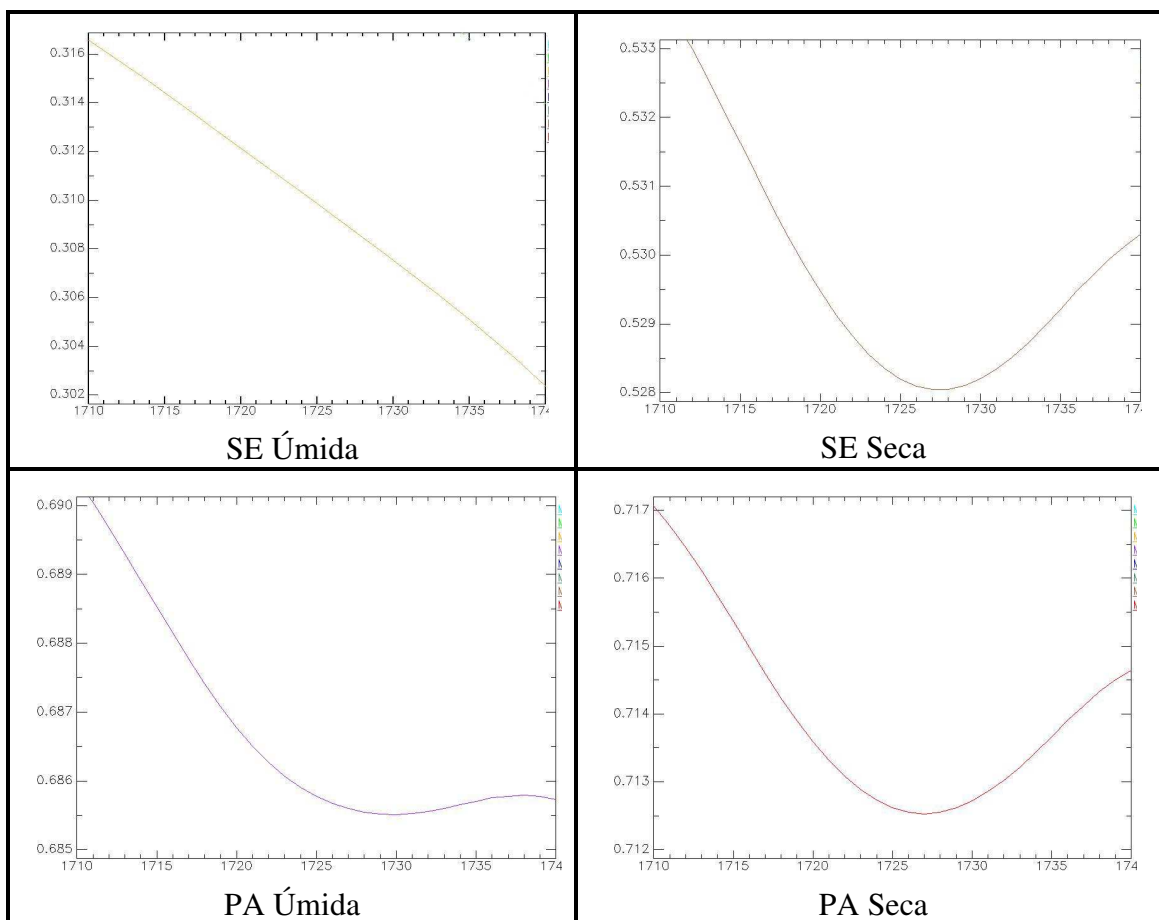


Figura 45. FR das Folhas próximo a 1730nm separadamente.

Na Figura 45, visualizou-se a curva espectral de cada folha, entre 1710 e 1740nm, isoladamente. Após análise visual, percebeu-se claramente que a palha úmida e todas as folhas secas apresentaram significativas absorções próximas a 1730 nm. E as folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) não apresentaram absorções perceptíveis.

Tabela 18. Valor da absorção dos componentes no FR próximo a 1730 nm.

$\lambda$ /FR	PO Úmida	PO Seca	VE Úmida	VE Seca	SE Úmida	SE Seca	PA Úmida	PA Seca
1710	0,334413	0,499955	0,328123	0,550114	0,316535	0,533834	0,690382	0,717068
1727	0,326682	0,494685	0,320465	0,544251	0,308909	0,528044	0,685597	0,712526
1740	0,319697	0,495982	0,313932	0,546170	0,302324	0,530298	0,685727	0,714645
Central	-0,007731	-0,005270	-0,007658	-0,005863	-0,007626	-0,005790	-0,004785	-0,004542
Final	-0,014716	-0,003973	-0,014191	-0,003944	-0,014211	-0,003536	-0,004655	-0,002423

Todas as folhas apresentaram diminuição nos valores de FR. Os valores de absorções são relativamente pequenos, pois o valor de absorção máxima foi de 0,007731 da ponteira úmida, conforme a Tabela 18 e a Figura 46.

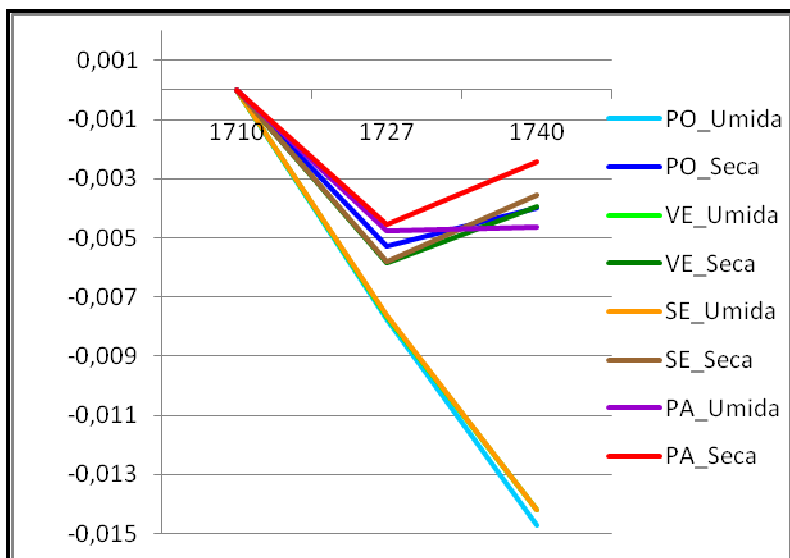
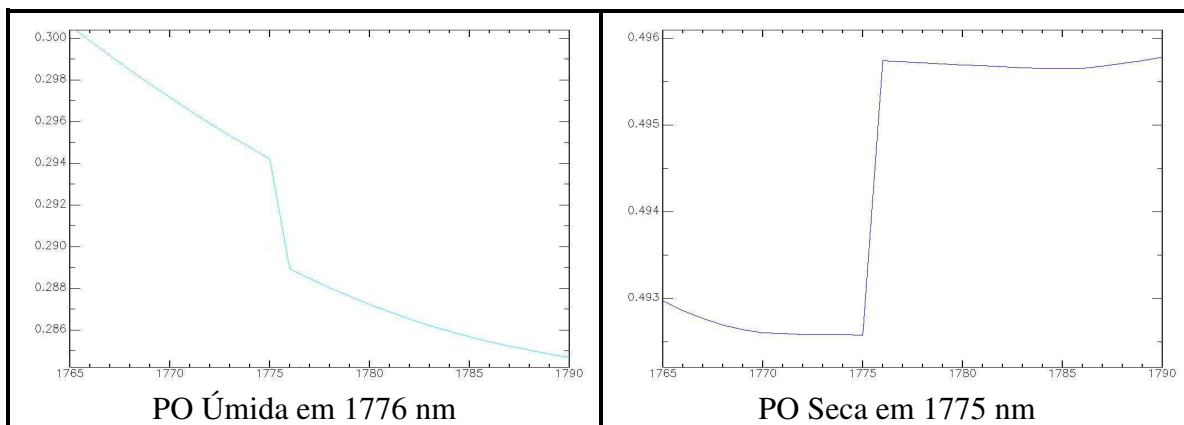


Figura 46. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 1710 e 1740 nm.

### Análise próxima a 1780 nm

CURRAN (1989) identificou uma feição de absorção próxima a 1780 nm relacionada às concentrações de celulose, açúcar e amido.

No FR espectral das folhas, observou-se uma forte absorção próxima a 1776 nm para todas as folhas, como pode ser visto na Figura 47.



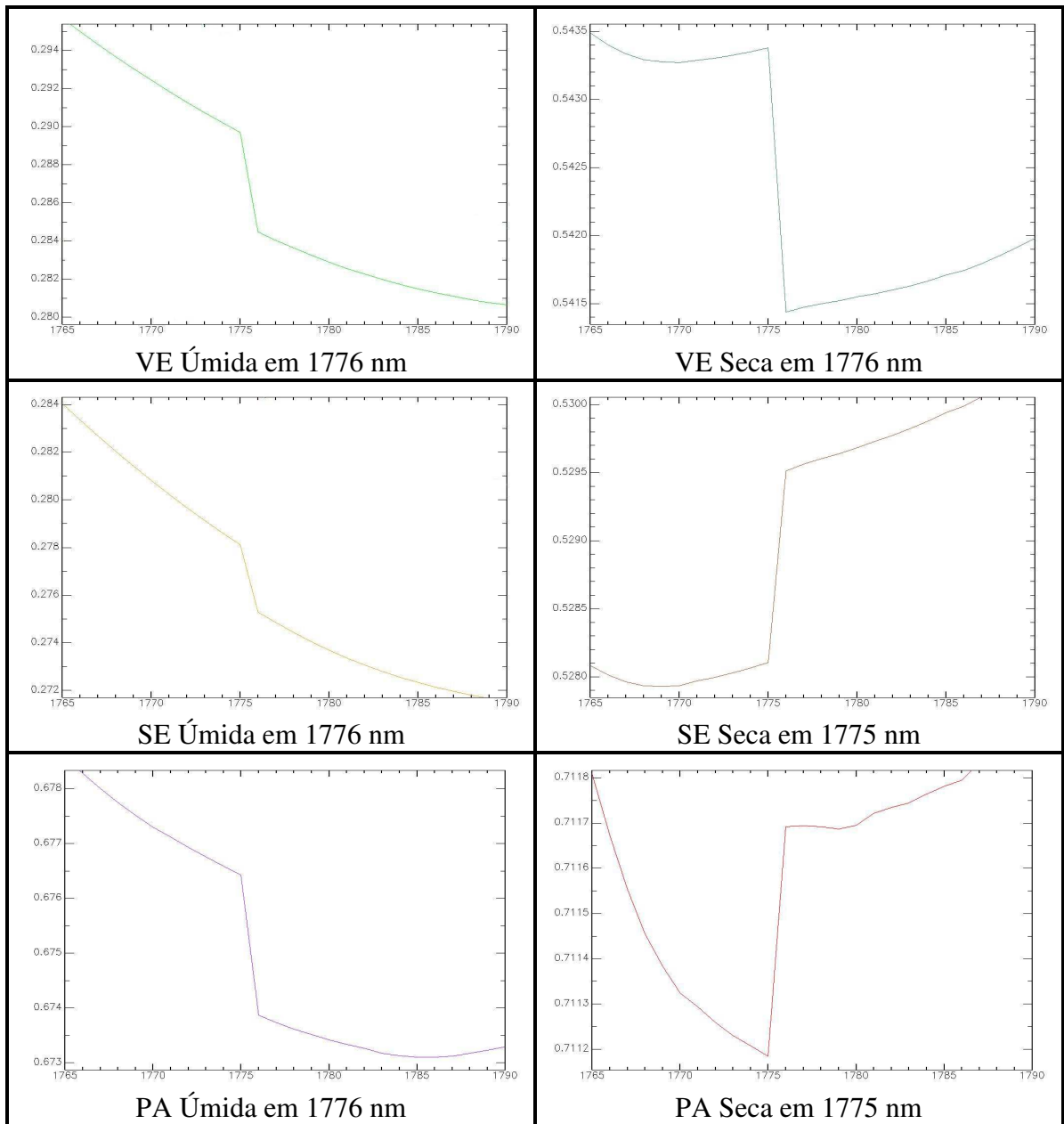


Figura 47. FR das Folhas próximo a 1780 nm, separadamente.

Todas as folhas úmidas e a folha verde seca apresentaram absorção no comprimento de onda em 1776 nm. Já as folhas secas da ponteira, senescente e palha apresentaram absorção em 1775 nm.

Tabela 19. Valor da absorção dos componentes no FR próximo a 1780 nm.

$\lambda$ /FR	PO Úmida	PO Seca	VE Úmida	VE Seca	SE Úmida	SE Seca	PA Úmida	PA Seca
1765	0,300595	0,492968	0,295669	0,543484	0,284025	0,528082	0,678562	0,711807
1775	0,294195	<b>0,492569</b>	0,289682	0,543377	0,278095	<b>0,528102</b>	0,676418	<b>0,711183</b>
1776	<b>0,288906</b>	0,495735	<b>0,284445</b>	<b>0,541433</b>	<b>0,275265</b>	0,529507	<b>0,673855</b>	0,711691
1790	0,284657	0,495782	0,280623	0,541981	0,271539	0,530306	0,673293	0,712043
Central	-0,011690	-0,000399	-0,011224	-0,002051	-0,008760	0,000021	-0,004707	-0,000624
Final	-0,015939	0,002814	-0,015046	-0,001504	-0,012486	0,002225	-0,005269	0,000236

Na Tabela 19, percebe-se que, com exceção da folha senescente seca que tendeu a zero, todas as demais folhas apresentaram relevantes diminuições nos valores do FR. Os valores de absorção são relativamente pequenos, pois o valor de absorção máxima é de 0,01169 da ponteira úmida.

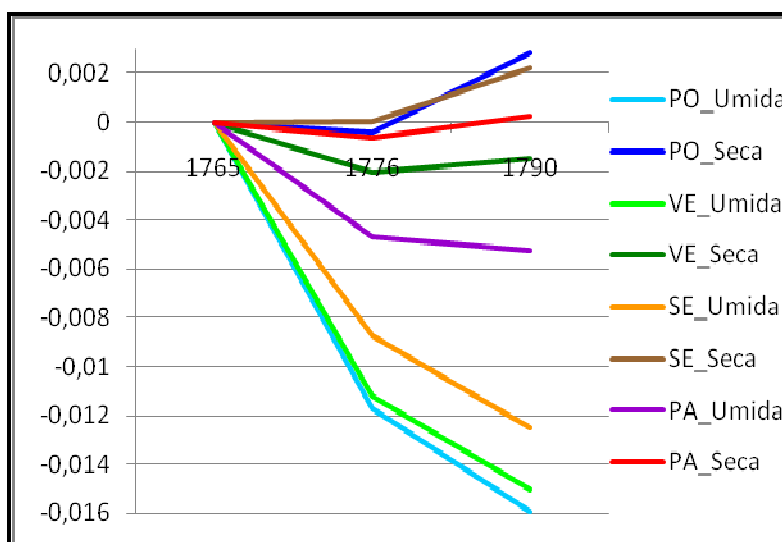


Figura 48. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 1765 e 1790 nm.

De acordo com a Figura 48, todas as folhas apresentaram absorções. Para confirmar a ocorrência das absorções, foi feita a análise da remoção de contínuo entre 1700 e 1800 nm, conforme mostra a Figura 49.

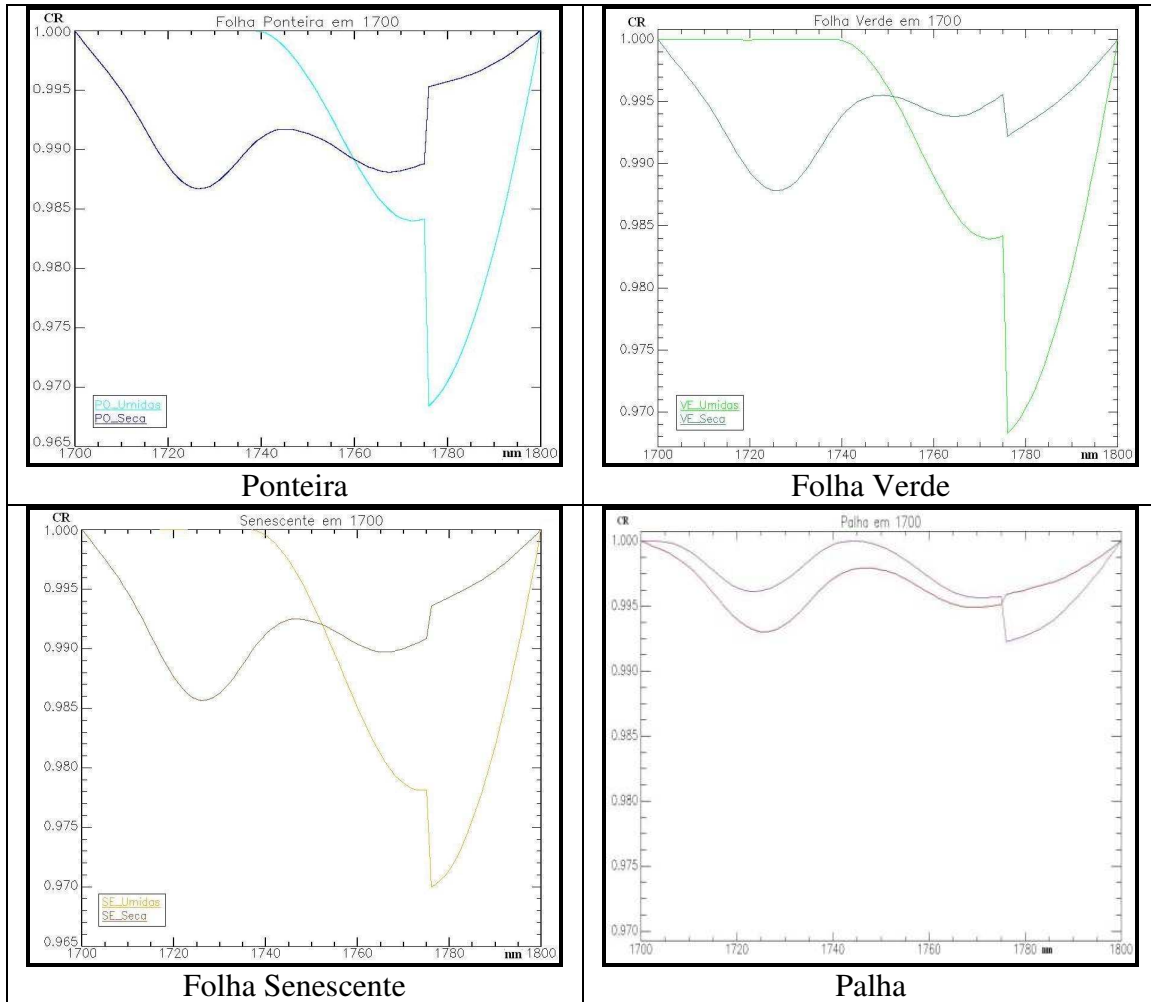


Figura 49. Remoção de Contínuo das folhas entre 1700 e 1800nm.

Tabela 20. Valores das Absorções da Remoção de contínuo próximos a 1730 e 1780 nm.

Folhas		$\lambda$ da Absorção (nm)	Valor da Absorção	Profundidade da Absorção
Ponteira	Úmida	-	1	0
	Seca	1727	0,98668	<b>0,01332</b>
Verde	Úmida	-	1	0
	Seca	1726	0,9878	<b>0,01220</b>
Senescente	Úmida	-	1	0
	Seca	1726	0,9856	<b>0,01440</b>
Palha	Úmida	1724	0,99612	0,00388
	Seca	1726	0,99302	0,00698
Ponteira	Úmida	1776	0,9684	<b>0,03160</b>
	Seca	1775	0,98879	<b>0,01121</b>
Verde	Úmida	1776	0,96826	<b>0,03174</b>
	Seca	1776	0,9922	0,00780
Senescente	Úmida	1776	0,96991	<b>0,03009</b>
	Seca	1775	0,99079	0,00921
Palha	Úmida	1776	0,99227	0,00773
	Seca	1775	0,99511	0,00489

### Síntese da análise próximo a 1730 e 1780 nm

Próximo a 1730 nm, a palha úmida e todas as folhas secas apresentaram absorções no FR. Todavia, na remoção de contínuo, ocorreram fortes absorções apenas das folhas secas (ponteira, verde e senescente), visto que, as palhas podem ser consideradas ruídos, pois apresentaram absorções menores que 0,01 no CR, e nenhuma folha úmida apresentou absorção na remoção de contínuo. Desta forma, há que se concluir que, apenas as folhas secas (ponteira, verde e senescente) poderiam estar associadas aos componentes (hemicelulose, celulose e lignina) próximos a 1730nm, conforme as afirmações de DAUGHTRY et al. (2004, 2009, 2010).

Quanto à análise próximo a 1780 nm, todas as folhas apresentaram absorções no FR, entretanto, infere-se que apenas a ponteira seca e as folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) apresentaram absorções significativas na remoção de contínuo e podem estar associadas aos componentes, consoante os estudos de CURRAN (1989) de que ocorre uma feição de absorção próxima a 1780 nm relacionada às concentrações de celulose, açúcar e amido. As demais folhas apresentaram valores de absorção menores que 0,01 no CR, o que poderiam representar ruídos.



## Análise próxima a 1820 nm

CURRAN (1989) identificou uma feição de absorção em 1820 nm associada somente à celulose. Na Figura 50, observa-se que aparentemente não ocorreu nenhuma feição de absorção em 1820 nm, pois as absorções apresentadas nas folhas secas e na palha úmida foram muito suaves, quase imperceptíveis.

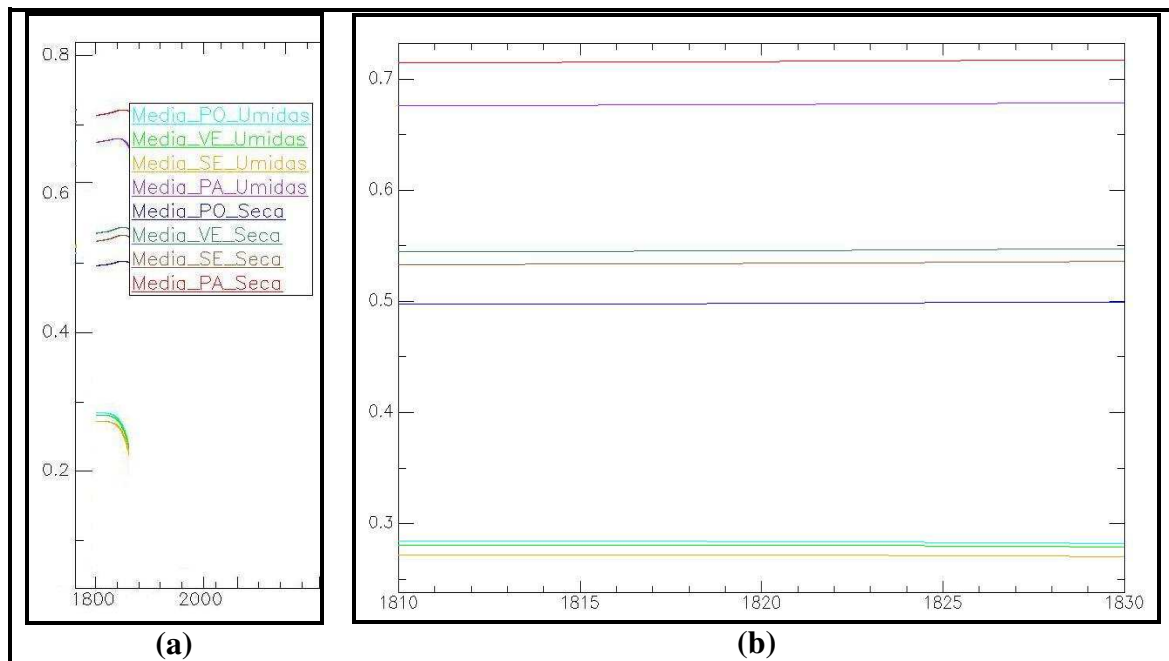
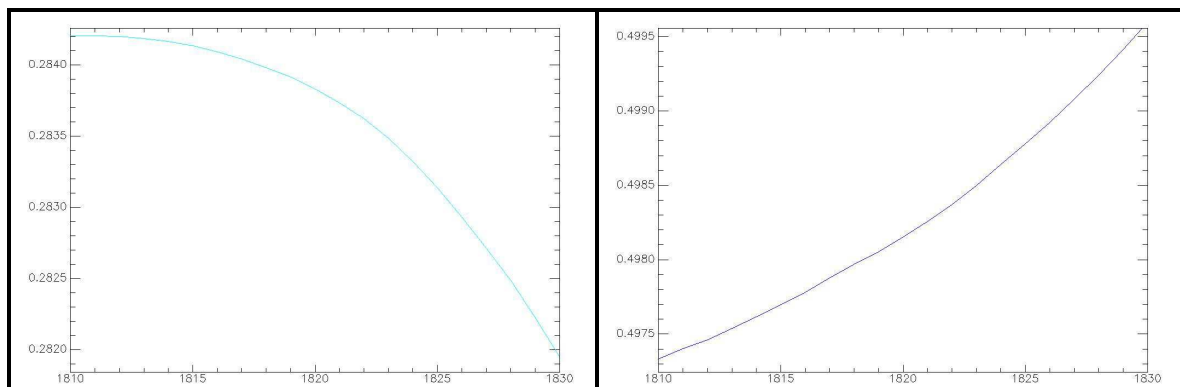


Figura 50. FR das Folhas próximo a 1820nm.

A Figura 50a trata-se do espectro, entre 1000 e 2500nm, recortado entre 1800 e 1900nm. A Figura 50b trata-se do intervalo de análise entre 1810 e 1830nm.



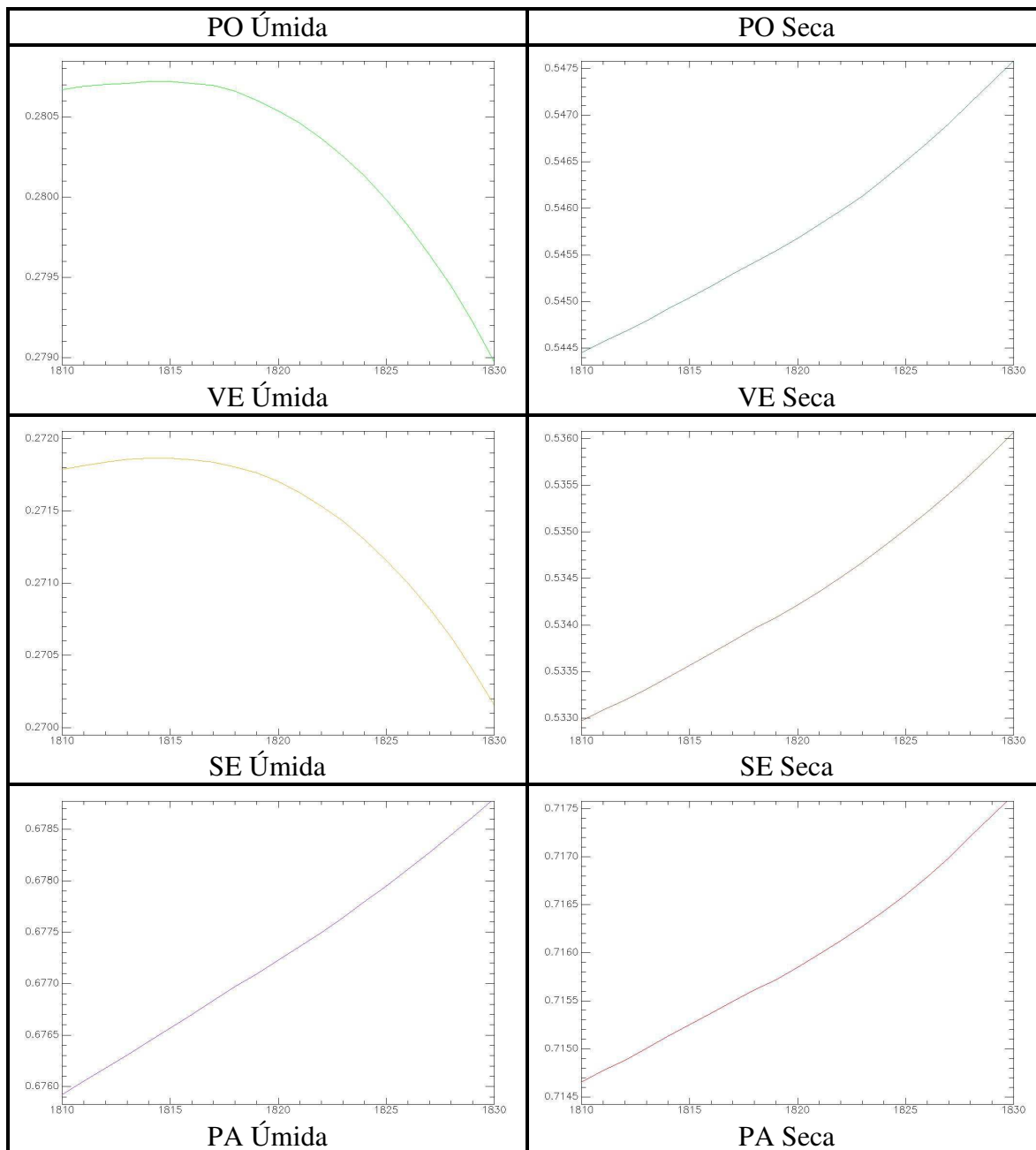


Figura 51. FR das Folhas próximo a 1820 nm separadamente.

Na Figura 51, observa-se a curva espectral de cada folha, entre 1810 e 1830nm. Visualmente, nenhuma folha apresentou absorção próxima a 1820 nm.

Tabela 21. Valor da absorção da celulose no FR próximo a 1820 nm.

$\lambda$ /FR	PO Úmida	PO Seca	VE Úmida	VE Seca	SE Úmida	SE Seca	PA Úmida	PA Seca
1810	0,284207	0,497332	0,280669	0,544452	0,271786	0,532972	0,675921	0,714653
1822	0,283625	0,498371	0,280365	0,545976	0,271532	0,534511	0,677498	0,716128
1830	0,281947	0,499592	0,278976	0,547577	0,270157	0,536069	0,678794	0,717642
Central	-0,000582	0,001039	-0,000304	0,001524	-0,000254	0,001539	0,001577	0,001475
Final	-0,002260	0,002261	-0,001693	0,003125	-0,001629	0,003097	0,002873	0,002989

Nota-se, na Tabela 21, que todas as folhas secas e a palha úmida apresentaram aumento no FR. A Figura 52 mostra o valor da absorção das folhas no FR, demonstrando que os valores das absorções das folhas são muito pequenos.

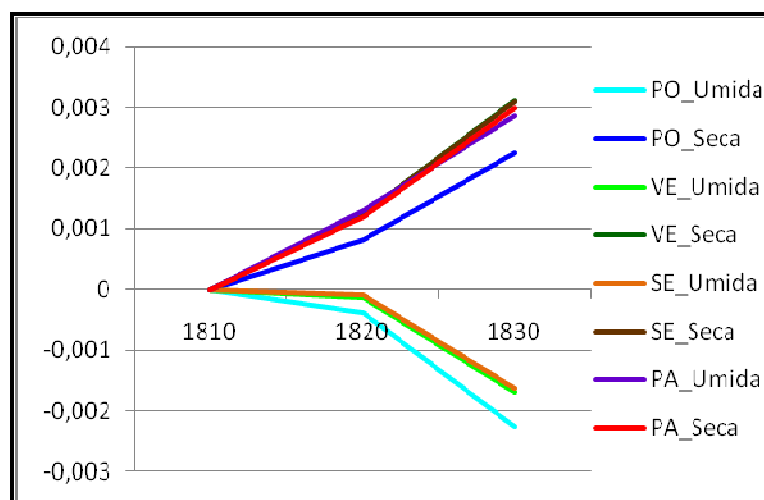


Figura 52. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 1810 e 1830 nm.

Realizou-se a análise da remoção de contínuo entre 1810 e 1830 nm, conforme mostra a Figura 53.

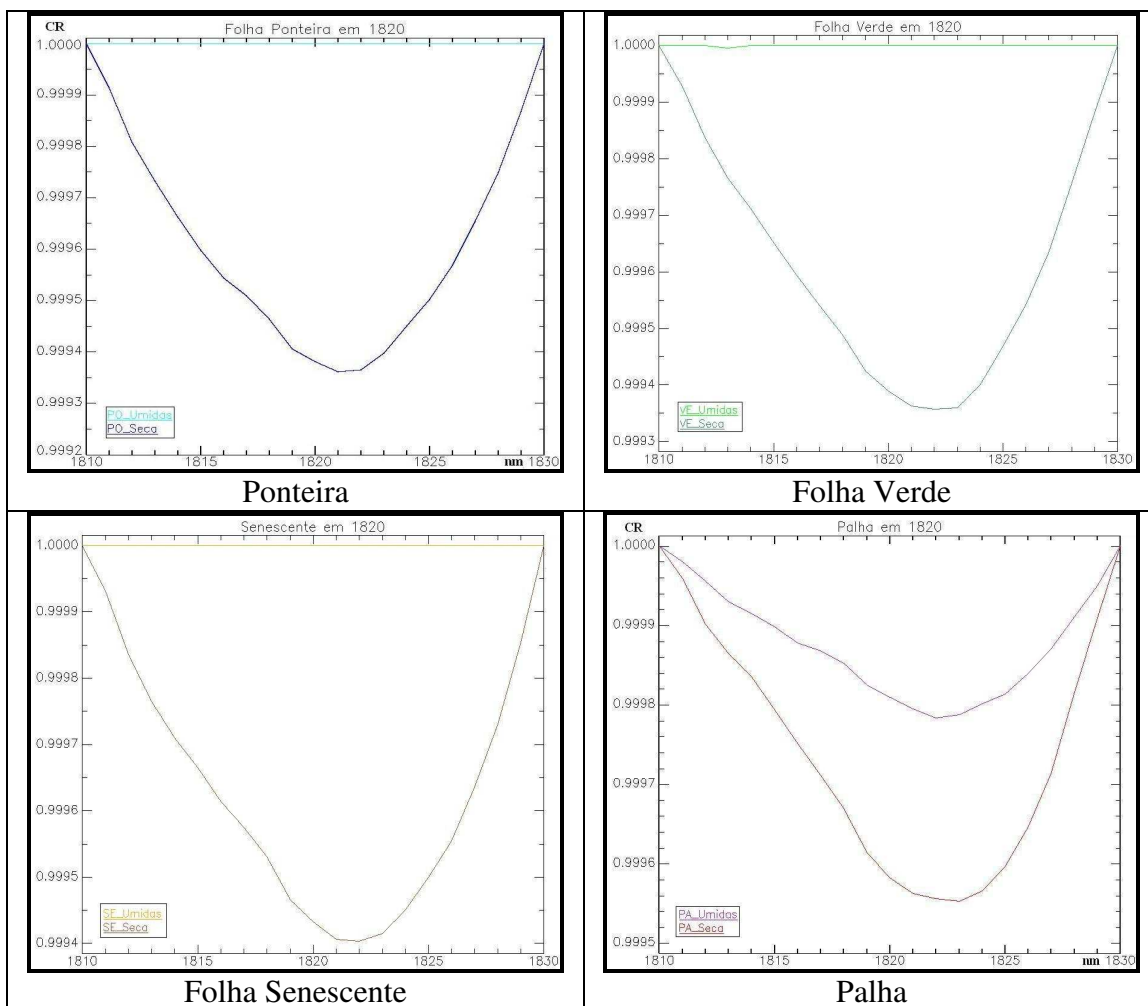


Figura 53. Remoção de Contínuo das folhas próximo a 1820nm.

A Figura 53 mostra que a palha úmida e todas as folhas secas apresentam absorções na remoção de contínuo. Porém, a Tabela 22 define se estas absorções podem ser associadas às respostas espectrais dos componentes.

Tabela 22. Valores das Absorções da Remoção de contínuo próximos a 1820nm.

Folhas		$\lambda$ da Absorção (nm)	Valor da Absorção	Profundidade da Absorção
<b>Ponteira</b>	Úmida	-	1	0
	Seca	1821	0,99936	0,00064
<b>Verde</b>	Úmida	-	1	0
	Seca	1822	0,99936	0,00064
<b>Senescente</b>	Úmida	-	1	0
	Seca	1822	0,9994	0,00060
<b>Palha</b>	Úmida	1822	0,99978	0,00022
	Seca	1823	0,99955	0,00045

No Fator de refletância, não ocorreram absorções próximas a 1820 nm. Na remoção de contínuo houve absorção da palha úmida e de todas as folhas secas com valores de absorção menores que 0,01 no CR. Estas pequenas absorções até podem estar associadas à celulose conforme afirmou CURRAN (1989), no entanto, neste trabalho, elas estão sendo consideradas apenas ruídos por apresentarem baixos valores de absorção na remoção de contínuo.

## Análise próxima a 2100 nm

Vários estudos identificaram uma feição de absorção próxima a 2100 nm fortemente correlacionada com a concentração da hemicelulose, celulose e lignina (NAGLER et al., 2000; DAUGHTRY, 2001; DAUGHTRY et al., 2004; DAUGHTRY et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2005; DAUGHTRY et al., 2006; MURRAY e WILLIAMS, 1988; DAUGHTRY e HUNT JR. 2008; SERBIN et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2010). Por outro lado, CURRAN (1989) identificou uma feição de absorção em 2100 relacionadas a concentrações de amido e celulose.

Observa-se, na Figura 54, que ocorre acentuada feição de absorção próxima a 2100 nm para todas as folhas secas e para a palha úmida, só não houve absorção nas folhas úmidas (ponteira, verde e senescente).

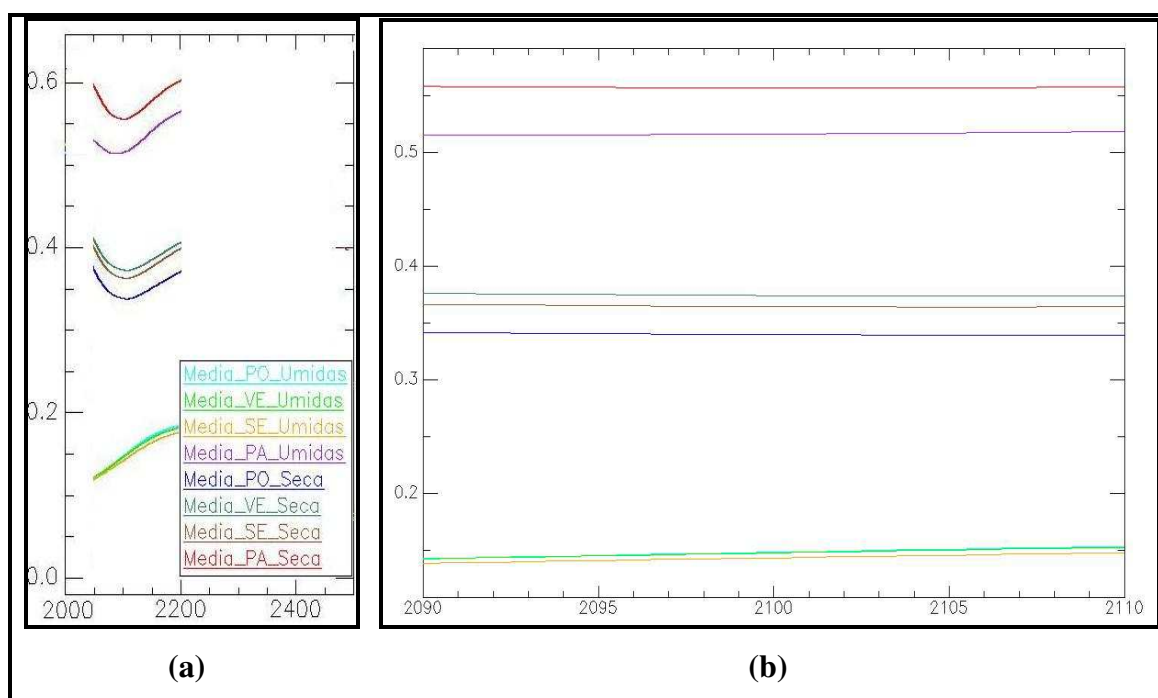


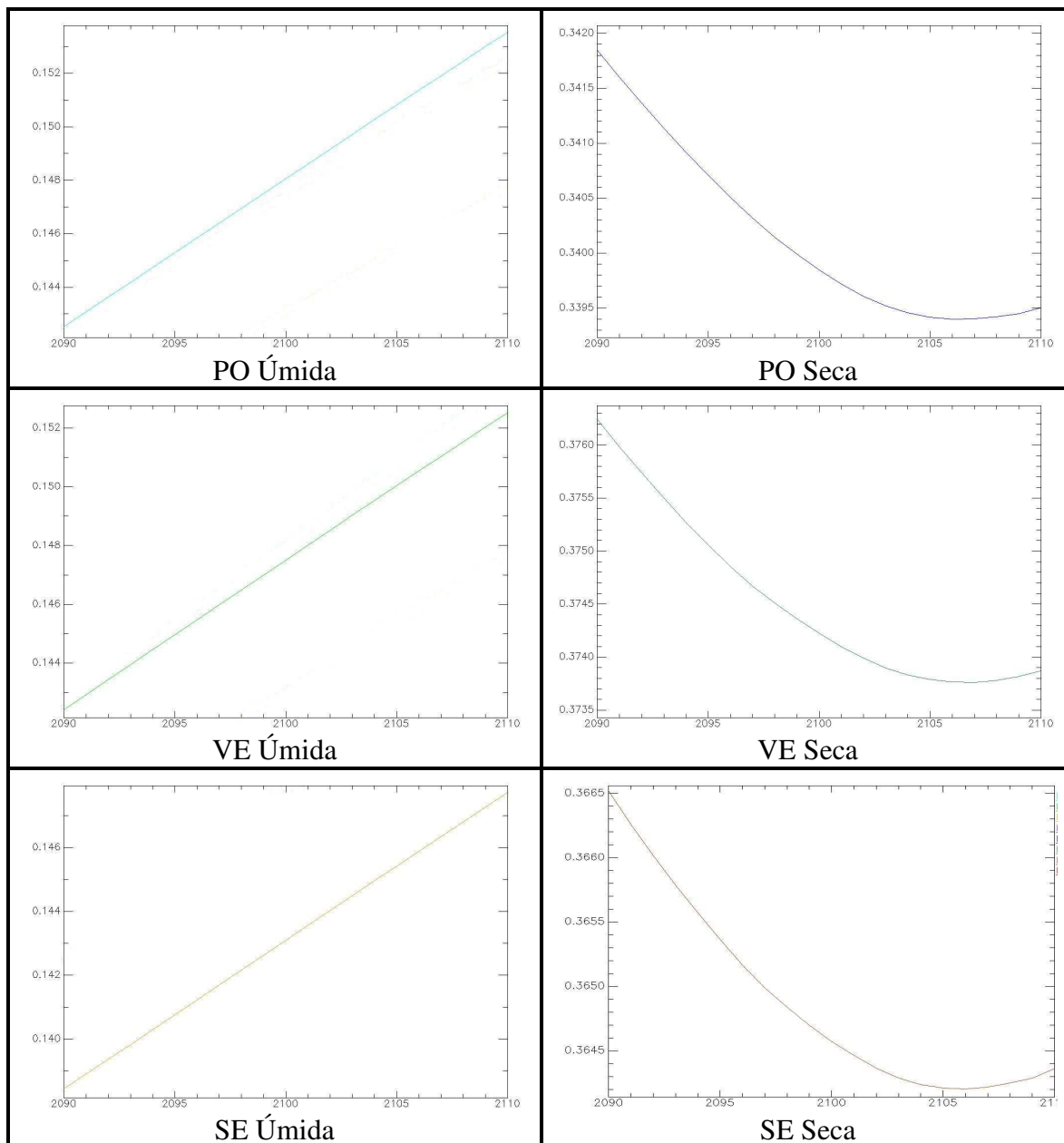
Figura 54. FR das Folhas próximo a 2100 nm.

A Figura 54a trata-se do espectro, entre 1000 e 2500nm, recortado entre 2000 e 2200nm. A Figura 54b trata-se do intervalo de análise entre 2090 e 2110nm.

Ao fazer uma análise visual no espectro de FR, verifica-se que no intervalo 1000-2500 nm ocorre uma significativa absorção próxima a 2100 nm na palha úmida e em todas as folhas secas, entretanto no intervalo 2090-2110 nm nota-se que não é visual a absorção do

componente neste comprimento de onda. As folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) não apresentam absorções, em ambos os intervalos de análises.

A Figura 55 mostra o FR de todas as folhas separadamente no intervalo de análise entre 2090 e 2110 nm.



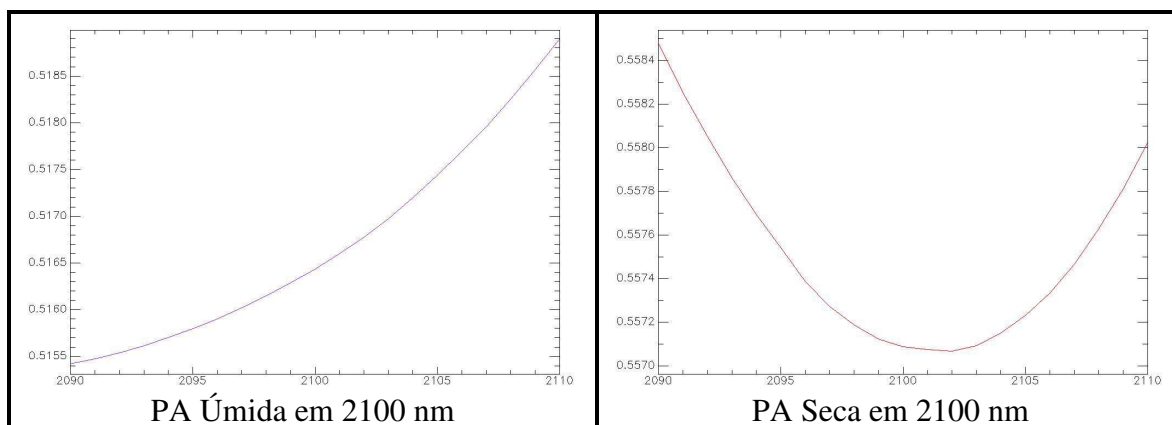


Figura 55. FR das Folhas próximo a 2100 nm separadamente.

Na Figura 55, constatou-se a curva espectral de cada folha, no FR entre 2090 e 2110nm. Há que se observar as fortes absorções na palha úmida e em todas as folhas secas, entretanto as absorções apresentaram-se em diferentes comprimentos de ondas, conforme mostra a Tabela 23.

Tabela 23. Valor da absorção dos componentes no FR próximo a 2100 nm.

$\lambda$ /FR	PO Úmida	PO Seca	VE Úmida	VE Seca	SE Úmida	SE Seca	PA Úmida	PA Seca
2090	0,142521	0,341850	0,142414	0,376243	0,138443	0,366520	0,515423	0,558480
2101	<b>0,148608</b>	0,339719	<b>0,148011</b>	0,374100	<b>0,143561</b>	0,364463	<b>0,516600</b>	0,557075
2102/6/7	0,148608	<b>0,339398</b>	0,148011	<b>0,373763</b>	0,143561	<b>0,364204</b>	0,516600	<b>0,557066</b>
2110	0,153542	0,339506	0,152526	0,373874	0,147736	0,364359	0,518903	0,558023
Central	0,006087	-0,002452	0,005597	-0,002480	0,005117	-0,002316	0,001176	-0,001414
Final	0,011022	-0,002344	0,010112	-0,002369	0,009293	-0,002161	0,003480	-0,000457

A Figura 56 mostra o valor das absorções das folhas no comprimento de onda central (a) em 2001nm e (b) nas diferentes ocorrências das absorções em 2001, 2002, 2006, 2007nm.

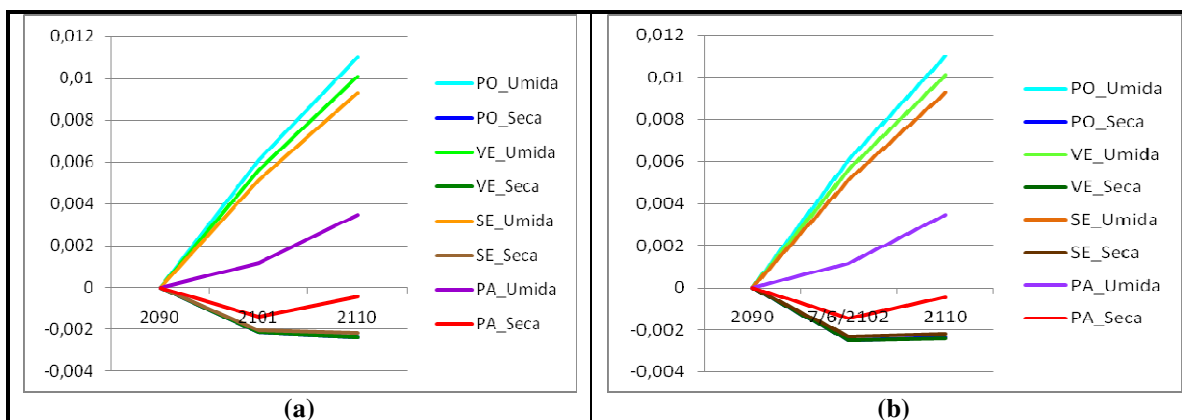


Figura 56. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 2090 e 2110 nm.



A Figura 56, elaborada a partir da Tabela 23 mostra que, visualmente, ocorreram absorções de todas as folhas secas e da palha úmida próxima a 2100 nm, com exceção das folhas úmidas (ponteira, verde e senescente).

A Figura 57 mostra a remoção de contínuo das folhas entre 2090 e 2110 nm.

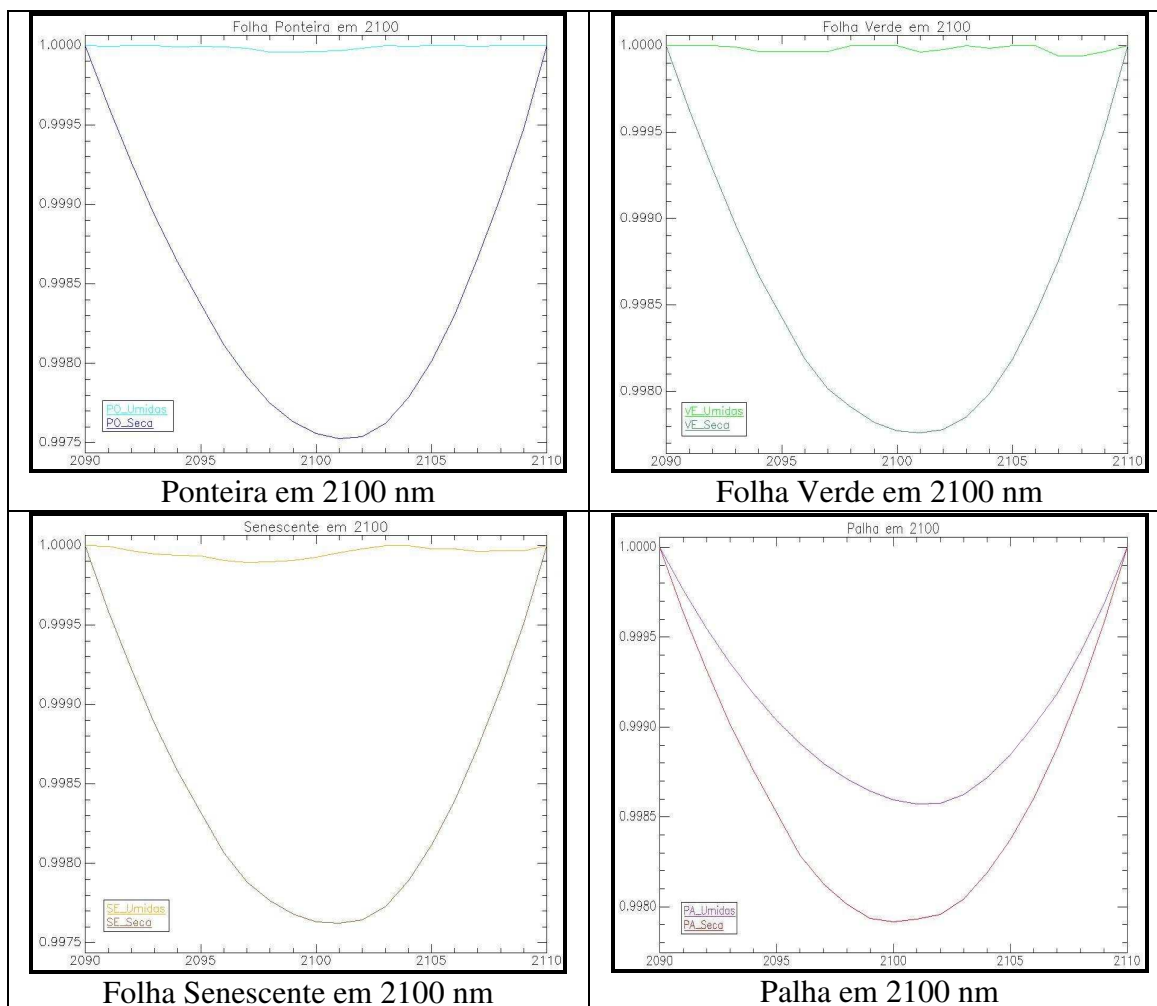


Figura 57. Remoção de Contínuo das folhas próxima a 2100nm.

Próximo a 2100 nm, todas as folhas apresentaram valores de absorção menores que 0,01, logo, neste intervalo de análise, a absorção de todas as folhas foram consideradas ruído.

## Análise próxima a 2300 nm

Alguns autores observaram feições de lignina e celulose próximas a 2,3  $\mu\text{m}$  na refletância espectral de plantas secas (DAUGHTRY et al., 2005; DAUGHTRY et al., 2010).

CURRAN (1989) identificou uma feição de absorção em 2340 associada somente à celulose. Por outro lado, DAUGHTRY et al. (2004, 2009) identificaram uma refletância próxima a 2350 nm fortemente correlacionada com a concentração da hemicelulose, celulose e lignina. Entretanto, CURRAN (1989) identificou uma feição de absorção em 2350 associada à três componentes estruturais (celulose, proteína e nitrogênio).

Deste modo, foram analisados dois comprimentos de ondas centrais: 2340 e 2350 nm.

Verificou-se que, próximo a 2337 nm, ocorreram feições de absorção em todas as folhas secas e na palha úmida, e não houve absorção nas folhas úmidas (ponteira, folha verde e senescente), de acordo com a Figura 58.

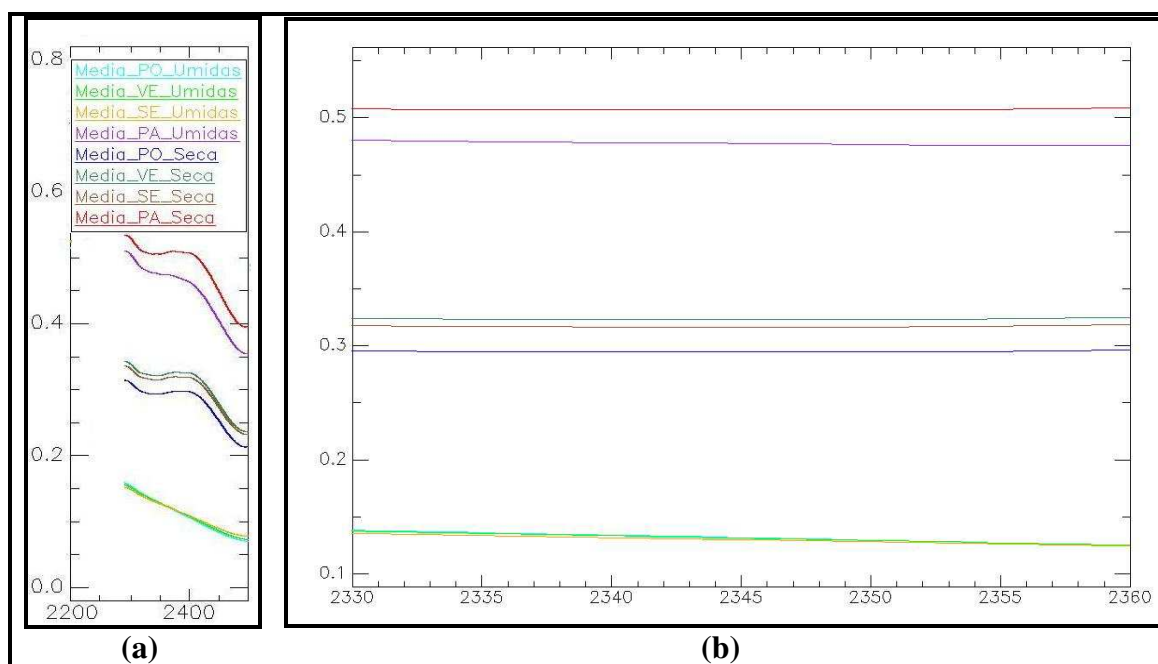


Figura 58. FR das Folhas próximo a 2340nm.

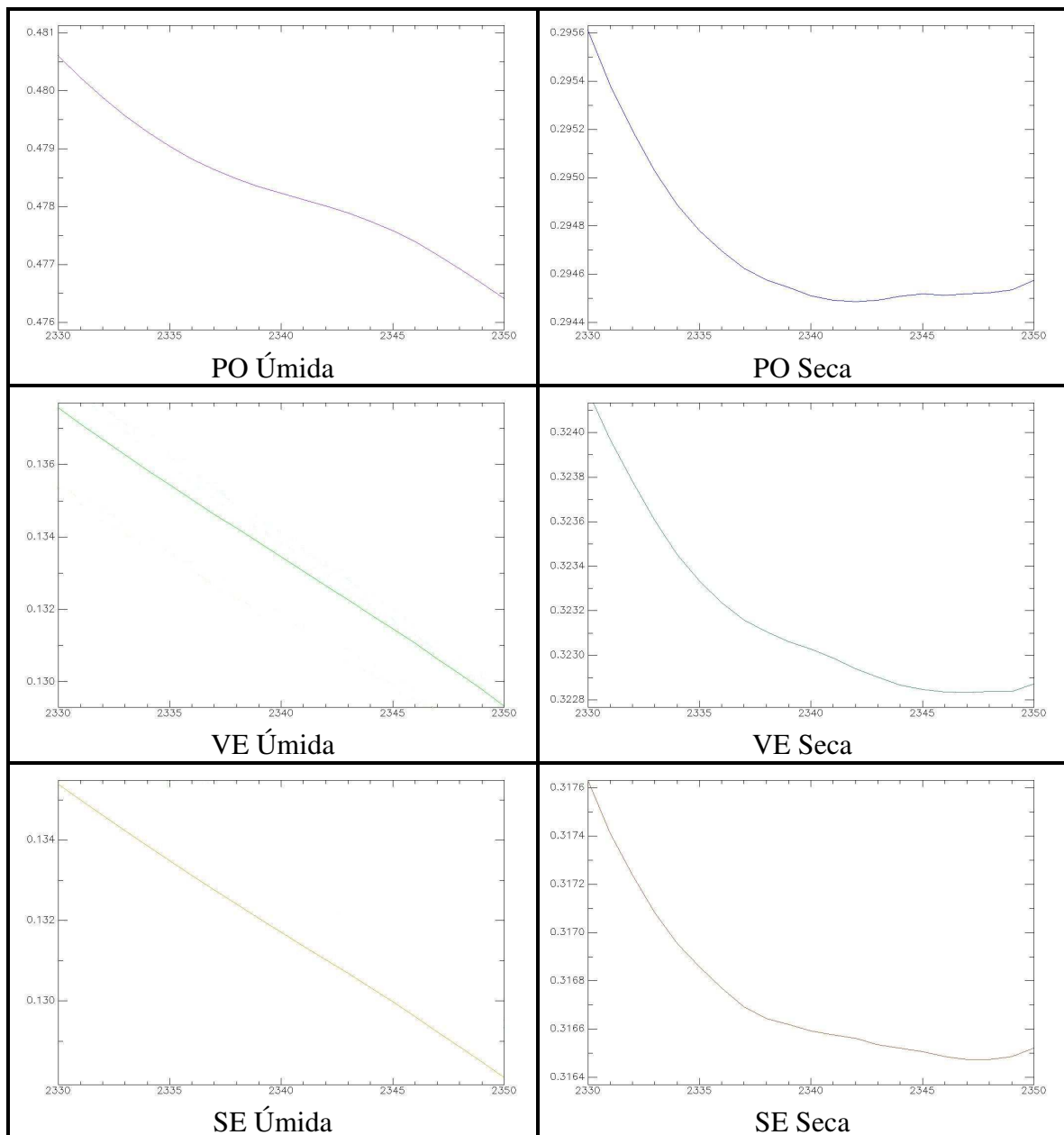
A Figura 58a trata-se do espectro, entre 1000 e 2500nm, recortado entre 2300 e 2500nm. A Figura 58b trata-se do intervalo de análise entre 2330 e 2360nm.

Verifica-se que, no intervalo 1000-2500 nm (Figura 58a), ocorreram significativas absorções próximas a 2340 e 2350 nm na palha úmida e em todas as folhas secas. Entretanto,

no intervalo 2090-2110 nm (Figura 58b), nota-se que não é visual a absorção do componente neste comprimento de onda. As folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) não apresentaram absorções no FR.

### Análise próxima a 2340 nm

Segue o fator de refletância de todas as folhas separadamente no intervalo de análise que se inicia em 2330 nm e termina em 2350 nm na Figura 59.



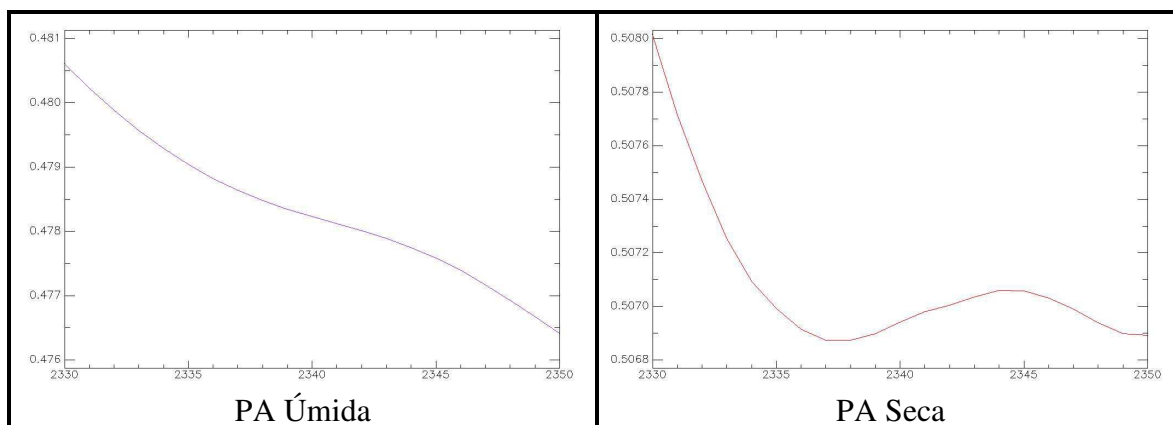


Figura 59. FR das Folhas próximo a 2340 nm separadamente.

Na Figura 59, pode-se visualizar a curva espectral de cada folha, entre 2330 e 2350nm, isoladamente. Todas as folhas secas apresentaram suaves absorções próximas a 2337 nm.

Tabela 24. Valor da absorção dos componentes no FR próximo a 2340nm.

$\lambda_{FR}$	PO Úmida	PO Seca	VE Úmida	VE Seca	SE Úmida	SE Seca	PA Úmida	PA Seca
2330	0,138454	0,295608	0,137564	0,324189	0,135383	0,317628	0,480599	0,508011
2337	0,135232	0,294626	0,134631	0,323160	0,132765	0,316692	0,478639	0,506873
2350	0,129528	0,294576	0,129344	0,322874	0,128096	0,316523	0,476418	0,506893
Central	-0,003222	-0,000982	-0,00293	-0,001029	-0,002618	-0,000936	-0,001961	-0,001138
Final	-0,008925	-0,001032	-0,00822	-0,001315	-0,007287	-0,001105	-0,004181	-0,001118

A Tabela 24 mostra que todas as folhas apresentaram diminuições dos fatores de refletância no comprimento de onda central 2337nm. Já a Figura 60 mostra que todas as folhas úmidas apresentaram leve saliência no comprimento de onda central 2337 nm.

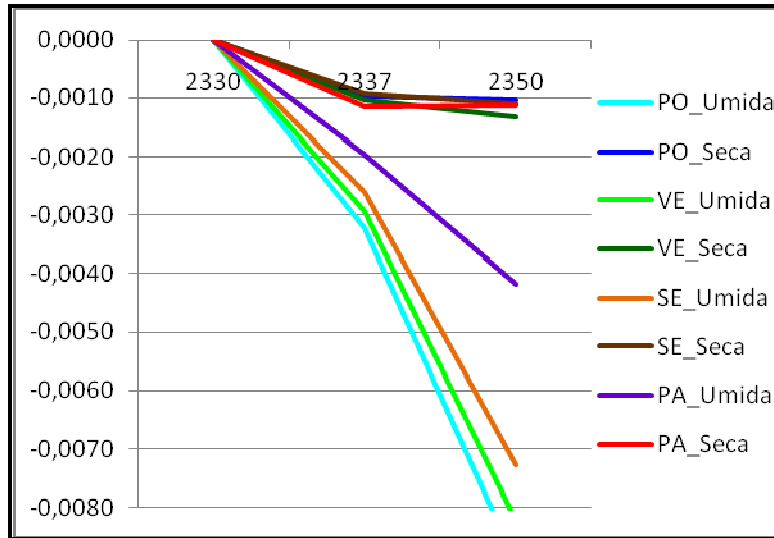


Figura 60. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 2330 e 2350 nm.

A Figura 61 exibe a remoção de contínuo das folhas entre 2330 e 2350 nm.

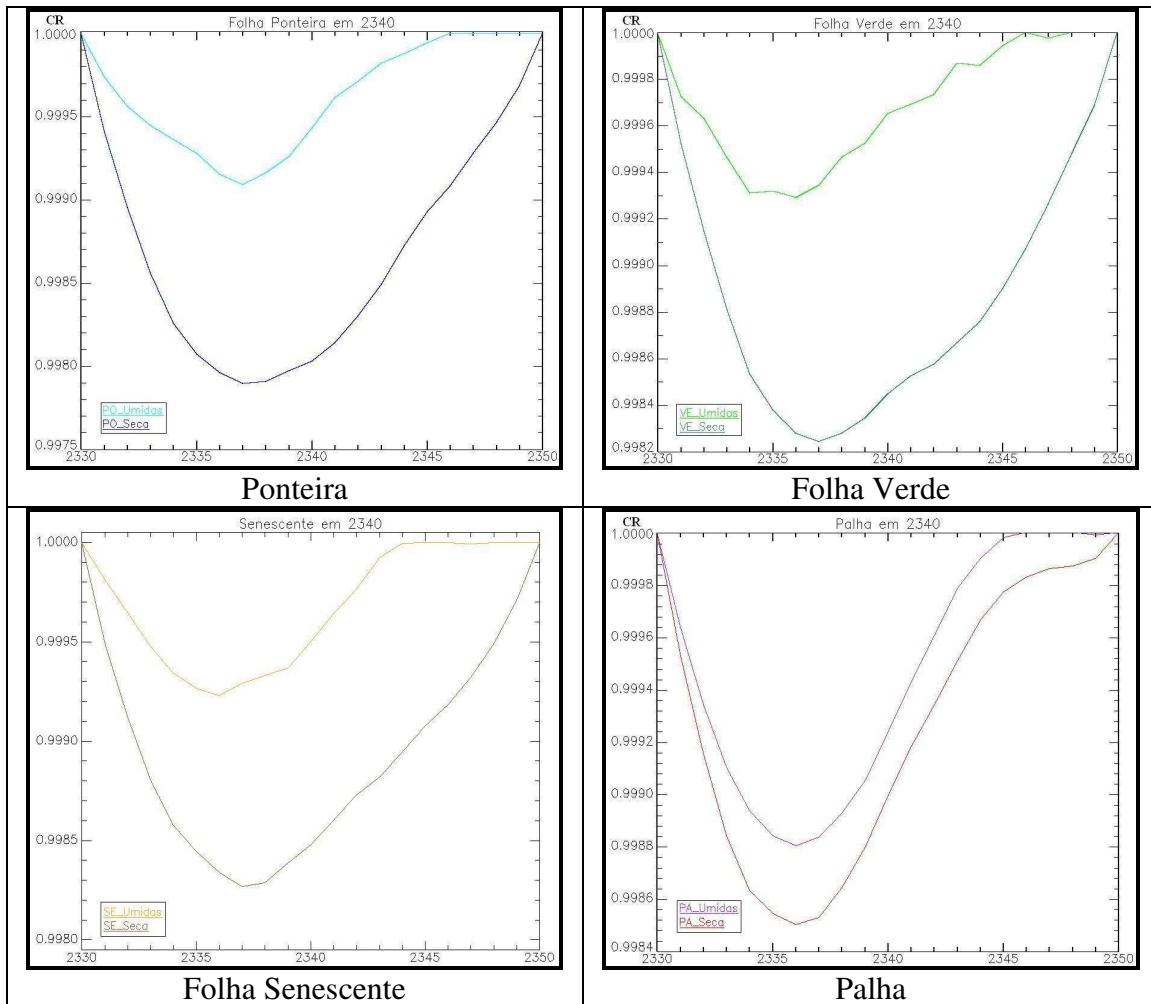
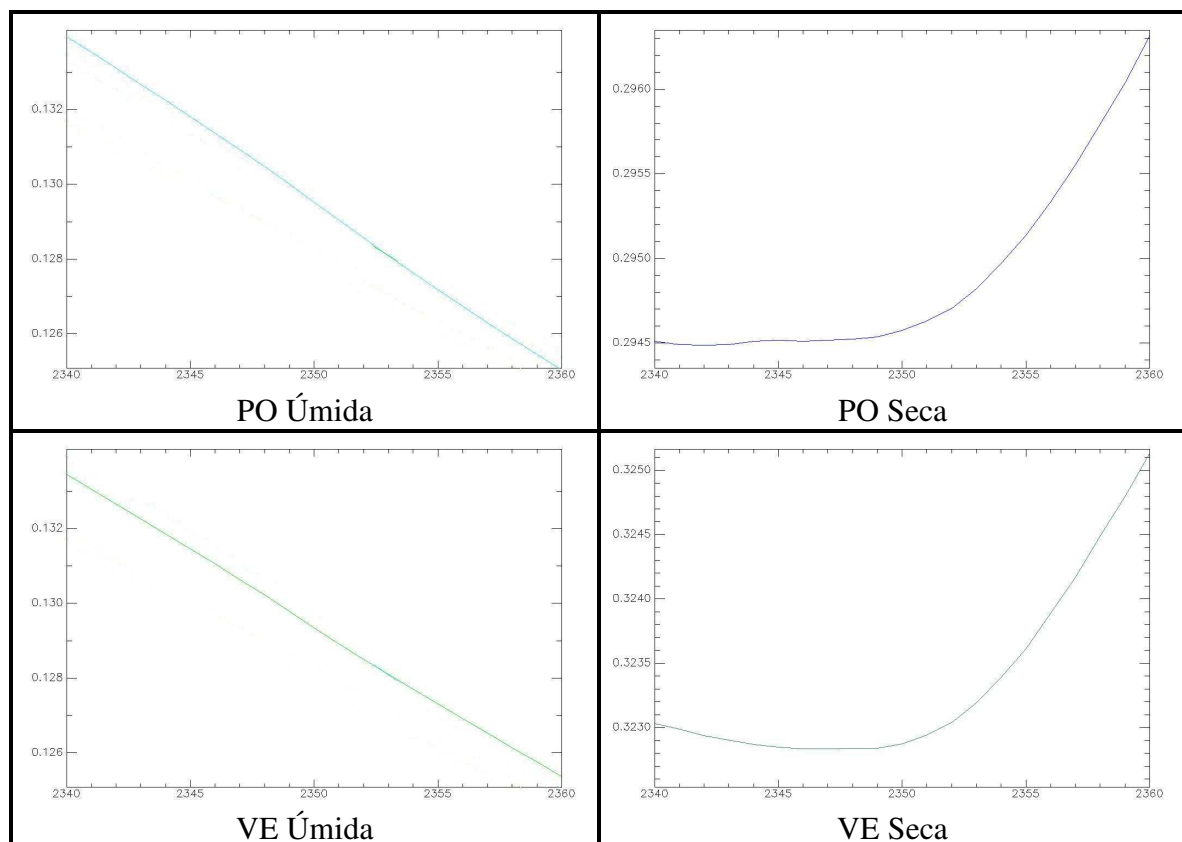


Figura 61. Remoção de Contínuo das folhas próxima a 2340nm.

Infere-se, portanto que, apesar de todas as folhas secas terem apresentado absorções próximas a 2337nm no FR, todas as absorções apresentaram-se com valores muito pequenos na remoção de contínuo. Desta forma, não é possível afirmar que ocorreram absorções neste comprimento de onda, conforme os estudos de CURRAN (1989), que identificou uma feição de absorção próxima a 2340 nm associada somente à celulose, pois as absorções apresentadas podem ser ruídos.

### Análise próxima a 2350 nm

DAUGHTRY et al. (2004, 2009) identificaram uma feição de absorção próxima a 2350 nm fortemente correlacionada com a concentração da hemicelulose, celulose e lignina. Por outro lado, CURRAN (1989) identificou uma feição de absorção em 2350 nm associada a três componentes estruturais (celulose, proteína e nitrogênio).



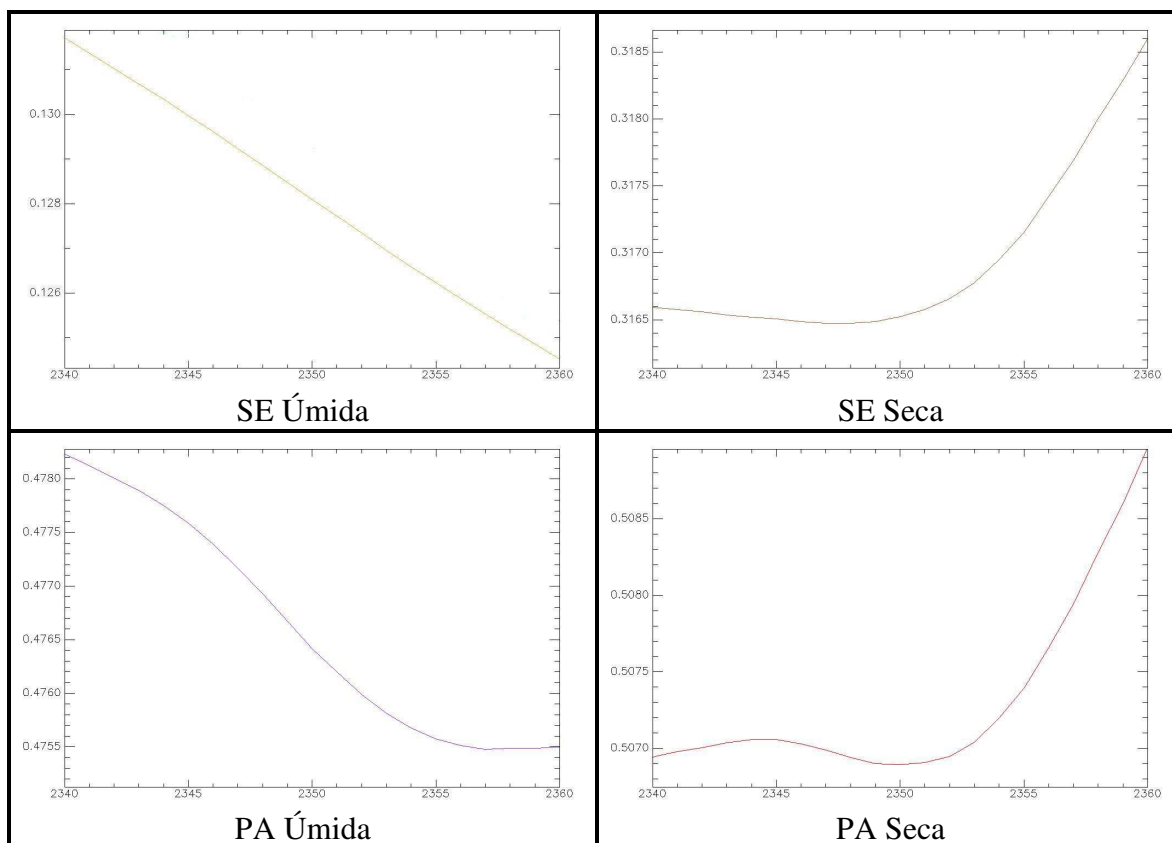


Figura 62. FR das Folhas próximo a 2352nm.

Na Figura 62 pode-se visualizar a curva espectral de cada folha, entre 2340 e 2360 nm. Visualmente, verificou-se que próximo a 2352 nm ocorreram feições de absorção de todas as folhas secas e da palha úmida, contudo, não houve absorção nas folhas úmidas (ponteira, folha verde e senescente).

Tabela 25. Valor da absorção dos componentes no FR próximo a 2350nm.

$\lambda$ /FR	PO Úmida	PO Seca	VE Úmida	VE Seca	SE Úmida	SE Seca	PA Úmida	PA Seca
2340	0,133951	0,294512	0,133454	0,323029	0,131712	0,316593	0,478232	0,506942
2352	0,128562	0,294706	0,128498	0,323041	0,127343	0,316657	0,475990	0,506947
2360	0,125032	0,296316	0,125380	0,325133	0,124520	0,318599	0,475504	0,508966
Central	-0,005389	0,000195	-0,004955	0,000011	-0,004369	0,000064	-0,002242	0,000004
Final	-0,008919	0,001805	-0,008074	0,002103	-0,007192	0,002006	-0,002728	0,002023

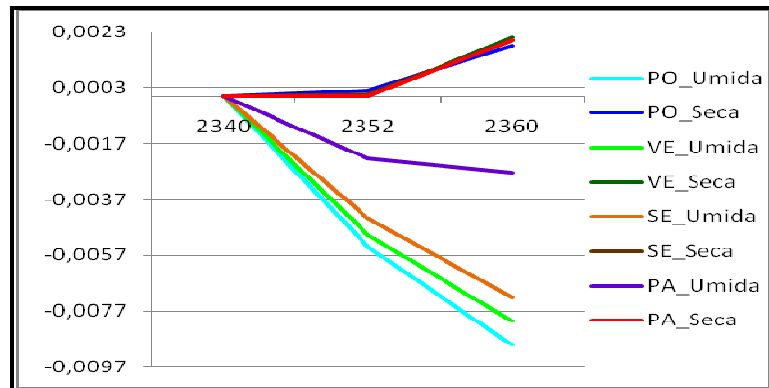


Figura 63. Valor da absorção ao longo do intervalo entre 2340 e 2360 nm.

De acordo com a Figura 63, nota-se que todas as folhas apresentaram suaves absorções. A Figura 64 mostra que todas as folhas secas apresentaram absorções na remoção de contínuo maiores que as folhas úmidas, entre 2340 e 2360 nm.

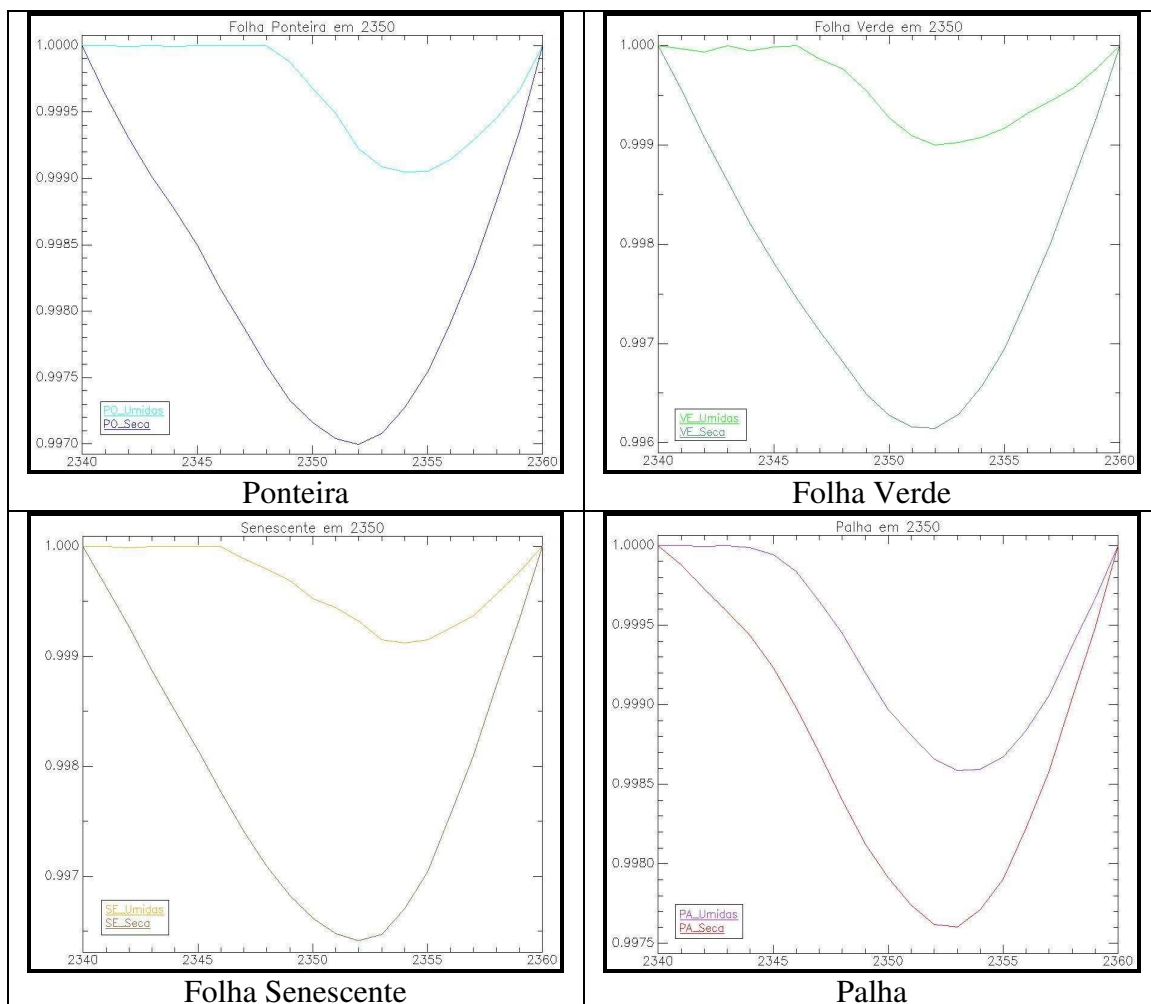


Figura 64. Remoção de contínuo das folhas próximo a 2350 nm.



Ao analisar o FR, constatou-se que houve absorção da palha úmida e de todas as folhas secas próximas a 2352 nm. No entanto, na remoção de contínuo, verificou-se que todas as absorções apresentaram valores muito pequenos, em razão disto, foram considerados ruídos, pois, não é possível afirmar que ocorreram absorções, conforme as afirmações de DAUGHTRY et al. (2004, 2009) e CURRAN (1989) que identificaram uma absorção próxima a 2350 nm associada aos componentes (hemicelulose, celulose e lignina).

## Conclusão da segunda análise

A Tabela 26 sintetiza as ocorrências das absorções no FR para todas as folhas, conforme o 2º método de análise. Dentre as 64 possibilidades de ocorrência de absorções realizadas nesta 2ª análise, verificou-se que, visivelmente, ocorreram 51,6% ocorrências de absorções associadas aos componentes estruturais (lignina, celulose e hemicelulose) no espectro de Fator de Refletância.

Tabela 26. Síntese das absorções dos componentes no FR da 2ª análise.

	PO Úmida	PO Seca	VE Úmida	VE Seca	SE Úmida	SE Seca	PA Úmida	PA Seca
1124	R	R	R	R	R	R	R	R
1420	R	R	R	R	R	R	R	R
1727	R	•	R	•	R	•	•	•
1776	•	•	•	•	•	•	•	•
1822	R	•	R	•	R	•	•	•
2101	R	•	R	•	R	•	•	•
2337	R	•	R	•	R	•	•	•
2352	R	•	R	•	R	•	•	•

• → Ocorrência de absorção.

R → Não-ocorrência de absorção.

A análise realizada no espectro da remoção de contínuo identificou a ocorrência de apenas 15,6% de absorções associadas aos componentes estruturais (lignina, celulose e hemicelulose), como pode ser visto na Tabela 27.

Tabela 27. Síntese das absorções dos componentes na Remoção de Contínuo da 2ª análise.

	PO Úmida	PO Seca	VE Úmida	VE Seca	SE Úmida	SE Seca	PA Úmida	PA Seca
1124	R	R	R	R	R	R	R	R
1420	•	R	•	R	•	R	R	R
1727	R	•	R	•	R	•	R	R
1776	•	•	•	R	•	R	R	R
1822	R	R	R	R	R	R	R	R
2101	R	R	R	R	R	R	R	R
2337	R	R	R	R	R	R	R	R
2352	R	R	R	R	R	R	R	R

• → Ocorrência de absorção.

R → Ruído, ocorrência de absorção menor 0,01.

Nota-se que, dentre as 31 ocorrências de absorções no FR, apenas 7 coincidiram com as ocorrências na remoção de contínuo, que predominaram entre os comprimentos de ondas próximo a 1730nm e 1780nm.

As outras três ocorrências da remoção de contínuo apresentaram-se nas folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) próximo a 1420 nm, que foram consideradas sem absorções visíveis no FR, pois a absorção da água em 1450nm dominou a refletância espectral das folhas neste intervalo de análise.

## **Conclusão sobre os dois métodos de análise**

A princípio, infere-se que, realmente existem, nas folhas da cana-de-açúcar, absorções próximas a 1730, 1780, 2100, 2270 e 2310 nm associadas à lignina, celulose e hemicelulose consoante as afirmações de vários estudos, como por exemplo, CURRAN (1989); NAGLER et al. (2000), DAUGHTRY (2001), DAUGHTRY et al. (2004), DAUGHTRY et al. (2009), DAUGHTRY et al. (2005), DAUGHTRY et al. (2006); MURRAY e WILLIAMS (1988), DAUGHTRY e HUNT JR. (2008), SERBIN et al. (2009); DAUGHTRY et al. (2010).

É importante ressaltar que as folhas úmidas (ponteiras, verdes e senescentes), em geral, não apresentaram absorções, provavelmente, devido ao fato dessas folhas possuírem volume de água no interior de suas estruturas celulares, fato que influencia muito na refletância espectral dos alvos, dificultando a identificação das absorções dos componentes.

O 1º método de análise, no qual foram definidos os picos máximos/extremos da absorção para depois normalizá-los na remoção de contínuo, mostrou-se mais eficaz na identificação e na quantificação da absorção associadas aos componentes de interesse. O 2º método de análise possui certa limitação para identificar as possíveis absorções associadas aos componentes, devido ao fato do intervalo de análise ser pequeno (20 nm), de modo que mostra com eficiência a real profundidade da absorção.

A Figura 65 mostra os valores de profundidade de absorção na remoção de contínuo, conforme o 1º método de análise, e que as maiores absorções ocorreram próximas aos comprimentos de onda 2100 e 2300 nm. Verifica-se que das 40 possibilidades de absorção da 1ª análise, apenas sete apresentaram valores de absorções menores que 0,01 (equivalente a 17,5%). Nota-se que a profundidade das absorções das folhas analisadas pela 1ª análise são bem maiores que as analisadas pelo 2º método de análise.

Na Figura 66 mostra os valores de profundidade de absorção na remoção de contínuo, conforme o 2º método de análise. As maiores absorções ocorreram próximas aos comprimentos de onda 1780 e 1420 nm, e não ultrapassam 0,032 de profundidade de absorção. Sendo que no 1º método de análise, a maior profundidade de absorção é três vezes superior (0,14). Das 64 possibilidades de absorção da 2ª análise, 54 apresentaram valores de absorções menores que 0,01 (equivalente a 84,4%).

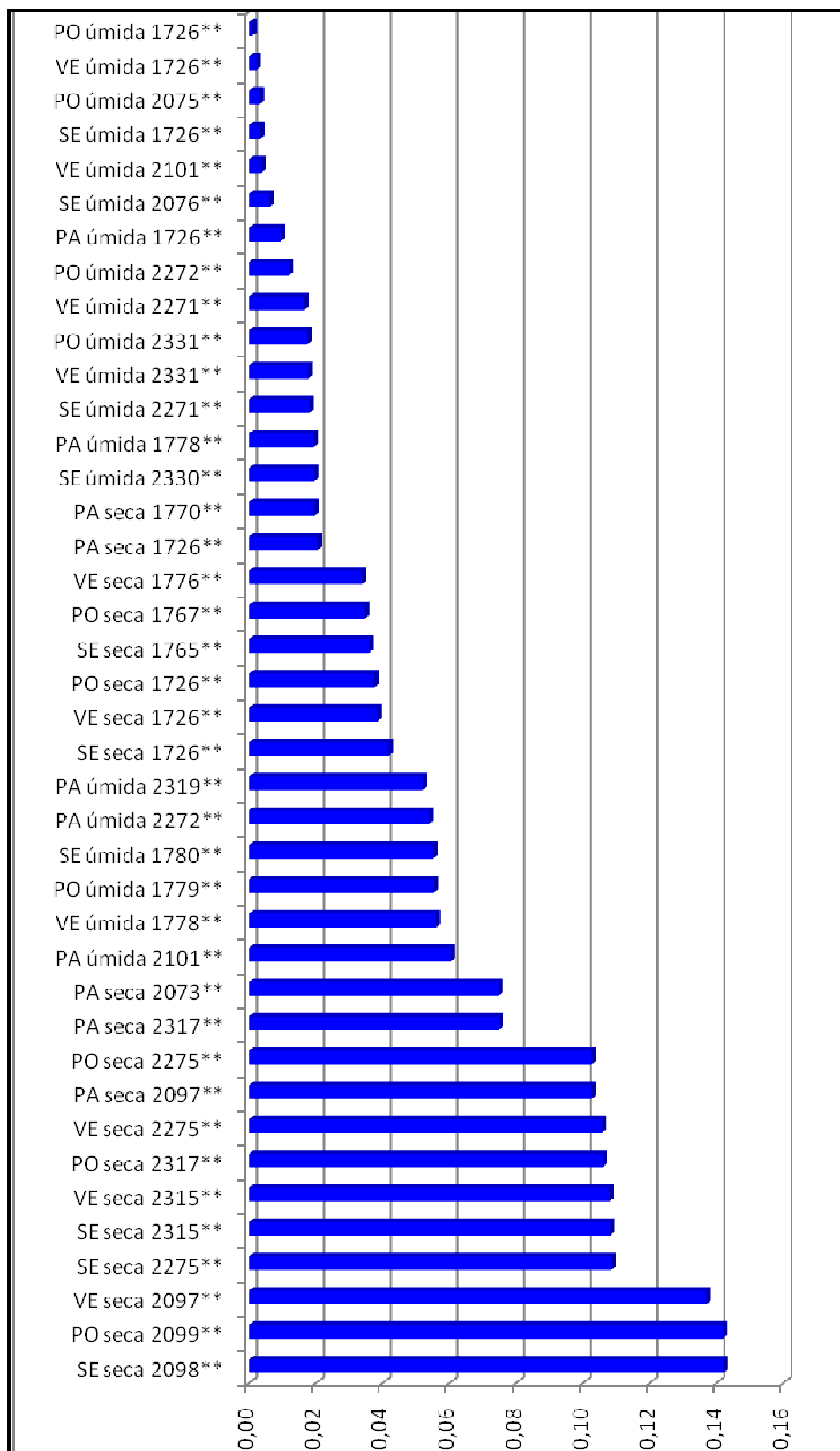


Figura 65. Absorção da Remoção de Contínuo - 1º método de análise.



Figura 66. Absorção da Remoção de Contínuo - 2º método de análise.

## **ANÁLISE DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO**

Basicamente, utilizou-se três índices de vegetação propostos pela literatura. O CAI - Índice de Absorção de Celulose (DAUGHTRY et al., 2001) e o LCA - Índice de Absorção de lignina-celulose (DAUGHTRY et al., 2005) foram utilizados para auxiliar na identificação da lignina, celulose e hemicelulose.

O CAI apresentou os melhores resultados na identificação da celulose nos alvos estudados por diversos autores, que observaram, por exemplo, que este índice mostrou a melhor separação entre solos e resíduos, seguido do índice LCA. Os maiores valores do CAI e do LCA indicam, respectivamente, maior presença de celulose e lignina nas folhas (NAGLER et al., 2000; STRECK et al., 2002; DAUGHTRY et al., 2005; DAUGHTRY e HUNT JR., 2008; DAUGHTRY et al., 2009; SERBIN et al., 2009; ELVIDGE, 1988).

Usou-se também o NDVI – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada, para ser correlacionado com o CAI e o LCA, com o intuito de associar o grau de biomassa das folhas com seus respectivos índices de celulose e lignina. Os maiores valores do NDVI indicam maior quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa (ROUSE et al., 1973).

### **Correlação entre CAI e LCA**

Avaliou-se a correlação entre o CAI e o LCA, pois o CAI indica fortemente a presença do componente celulose e o LCA está associado a presença da lignina e também da celulose (Figura 67). Deste modo, tentou-se verificar se havia uma correlação entre os índices que indicasse proporcionalidade entre os componentes.

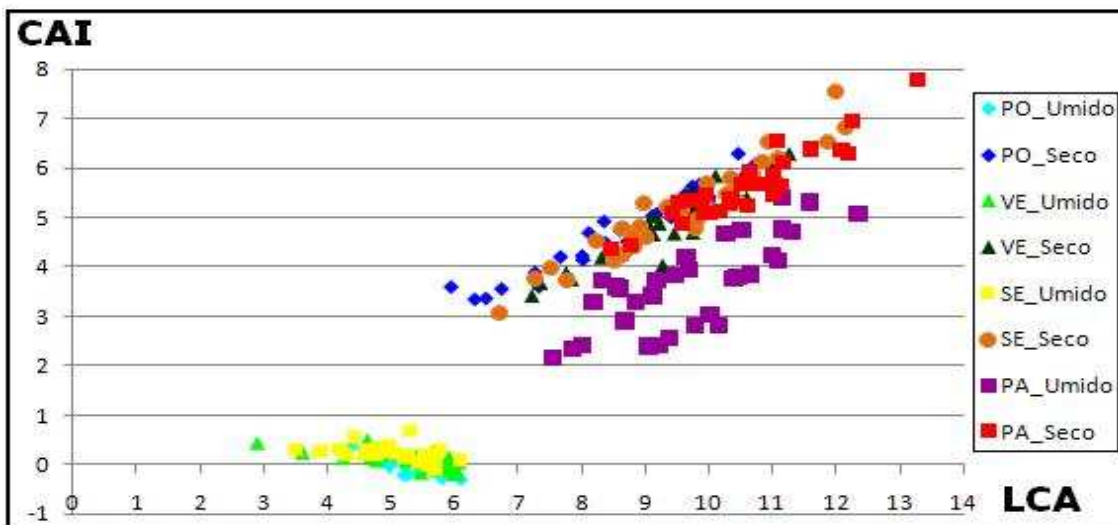


Figura 67. Correlação entre CAI e LCA de todas as folhas.

Na Figura 67, nota-se que, ocorre na parte inferior esquerda do gráfico, aglomeração das folhas úmidas (ponteira, folha verde e senescente) tendendo a zero no CAI e variando entre 3 e 6 no LCA. Vale ressaltar que, justamente, essas folhas não apresentaram absorções na maior parte dos intervalos analisados.

Verificou-se que 100% das amostras de todas as folhas secas possuíam valores de CAI positivos.

A palha úmida e todas as folhas secas apresentaram valores de CAI e LCA maiores que os das folhas úmidas (ponteira, verde e senescente). Essas folhas foram, justamente, as que apresentaram absorções na maioria dos intervalos analisados.

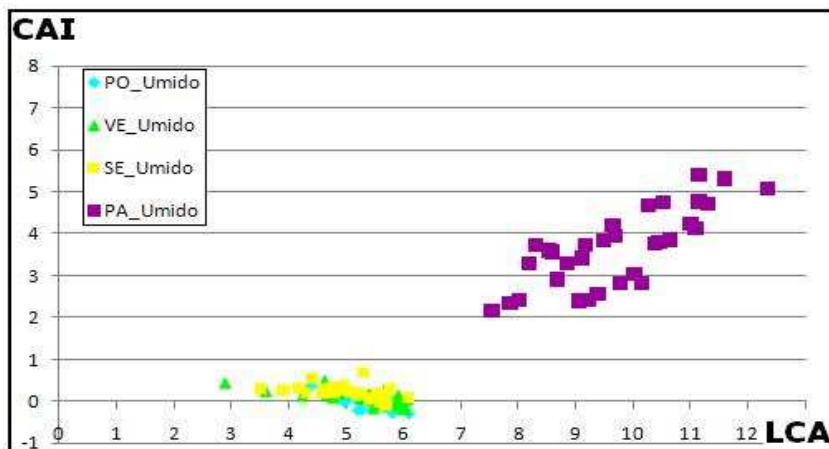


Figura 68. Correlação entre CAI e LCA das folhas úmidas.



Percebe-se, na Figura 68, que dentre as folhas úmidas, a palha é a única segregada das demais, apresentando maiores valores nos dois índices, tanto no CAI quanto no LCA.

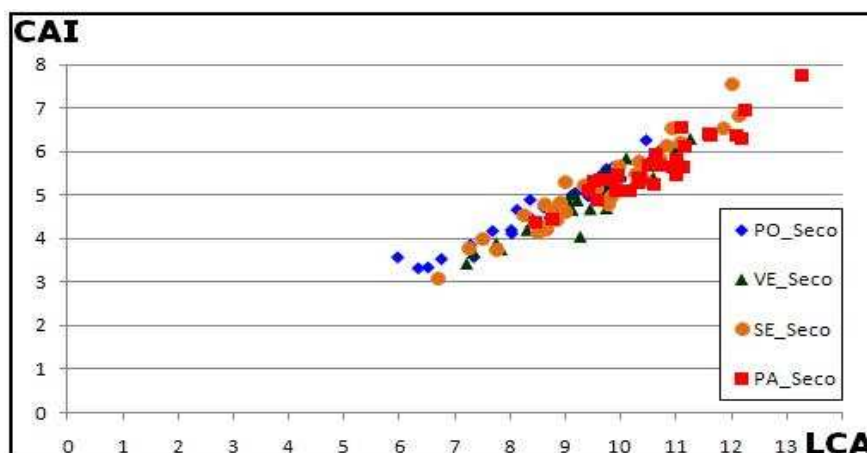


Figura 69. Correlação entre CAI e LCA das folhas secas.

Dentre as folhas secas, verifica-se que não é possível separar nenhuma das quatro folhas, pela sequência de crescimento e pode-se afirmar que o gráfico apresentou forma linear crescente, indicando que o valor do CAI é proporcional ao valor do LCA, pois, quanto maior o CAI de uma folha, maior será o seu LCA (Figura 69). Esta afirmação também vale para a palha úmida, uma vez que as folhas apresentaram uma forma linear crescente, mesmo com uma suave dispersão/espalhamento no gráfico (Figura 68).

Esta proporcionalidade pode ser comprovada pela Tabela 28 “Coeficiente de Correlação entre CAI e LCA das folhas”, que demonstra valores negativos para as folhas úmidas (ponteira, verde e senescente) e altas correlações entre todas as folhas secas e a palha úmida.

Tabela 28. Coeficiente de Correlação entre CAI e LCA das folhas.

	CAI Úmida x LCA Úmida	CAI Seca x LCA Seca
PO	-0,63437	0,95881
VE	-0,69862	0,93274
SE	-0,45142	0,95578
PA	0,77537	0,93330

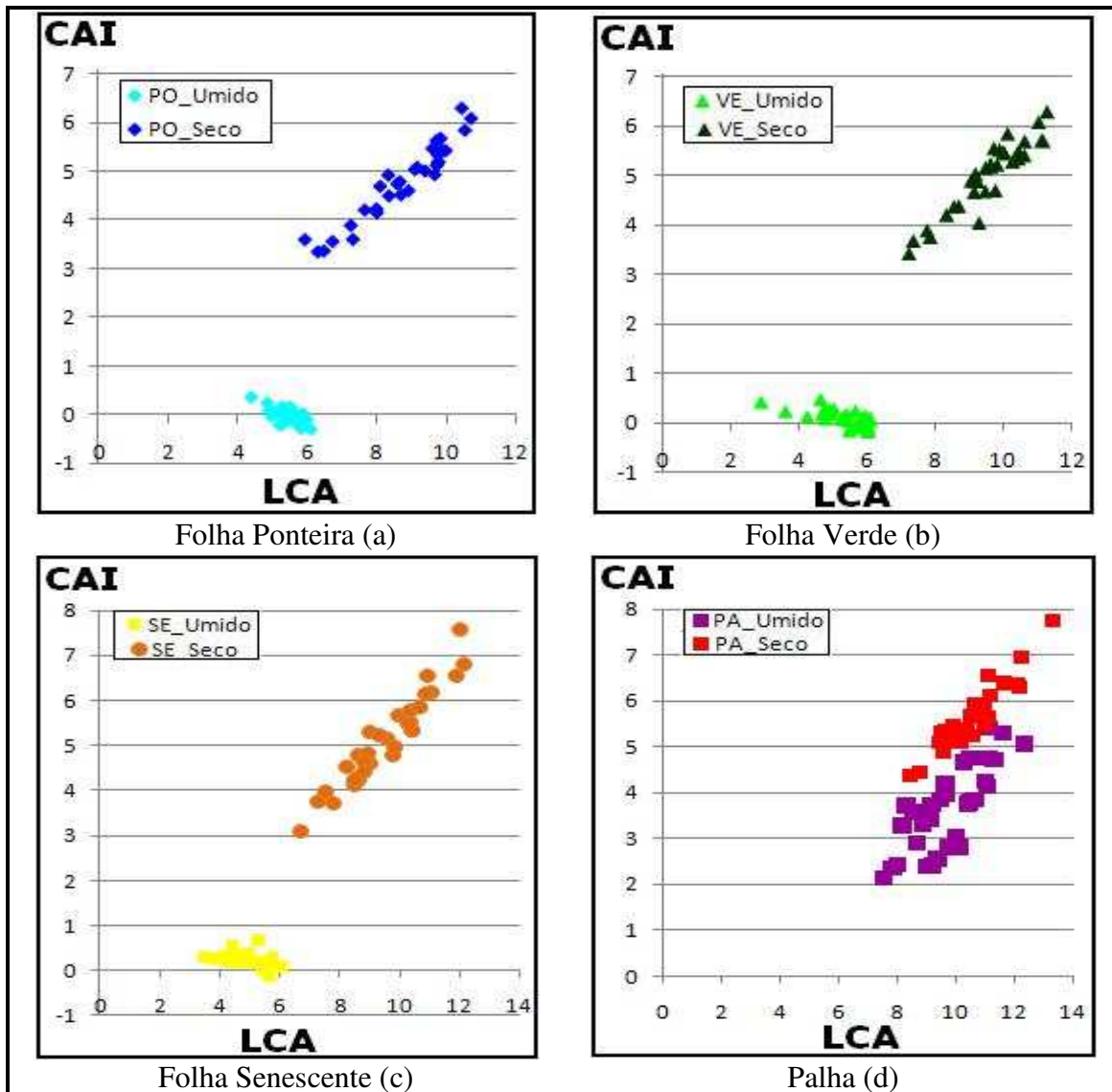


Figura 70. Correlação entre CAI e LCA de todas as folhas separadamente.

A Figura 70 mostra que todas as folhas foram separadas quanto às condições úmidas e secas. Na Figura 70d, houve aproximação da palha úmida e seca, pois o LCA dessas folhas não apresentaram fortes alterações em seus valores (ambas as folhas variando entre 8 e 12). Entretanto, pode-se afirmar que as palhas estão próximas uma das outras, e não sobrepostas, ocorrendo uma definida separação entre as palhas úmidas e as secas, pois o CAI da palha seca foi maior que o CAI da palha úmida.

Dentre as ponteiros úmidas, os valores de CAI tenderam a zero, variando entre -0,2865 e 0,4912, sendo que 47% das amostras possuíam valores de CAI negativos. O CAI das ponteiros secas variaram entre 3,3334 e 6,2754 (Figura 70a).

Dentre as folhas verdes úmidas, os valores também tenderam a zero, variando entre -0,19 e 0,3724, sendo que 37% das amostras possuíam valores de CAI negativos. O CAI das folhas verdes secas variaram entre 3,4172 e 6,2893 (Figura 70b).

Dentre as folhas senescentes úmidas, os valores de CAI também tenderam a zero, variando entre -0,1172 e 0,6814, sendo que 9% das amostras possuíam valores de CAI negativos. O CAI das folhas senescentes secas variaram entre 3,0867 e 7,5666 (Figura 70c).

Dentre todas as amostras de palhas, tanto as úmidas quanto as secas, 100% possuíam valores de CAI positivos. Dentre as palhas úmidas, o CAI variou entre 2,149 e 5,3969. Dentre as palhas secas, o CAI variou entre 4,3625 e 7,7687 (Figura 70d).

Pode-se, concluir que, os índices (CAI e LCA) melhoraram a discriminação dos componentes e indicaram, fortemente, a presença e correlação dos componentes (celulose e lignina) entre as condições úmidas e secas. Esses resultados coincidem com os estudos de diversos autores (NAGLER et al., 1998, 2000; DAUGHTRY, 2001; STRECK et al., 2002; DAUGHTRY e HUNT JR., 2008; SERBIN et al., 2009; DAUGHTRY et al., 2004, 2005, 2006, 2009, 2010) que observaram que dentre vários índices utilizados, o CAI se apresentou como um dos melhores estimadores do componente celulose, seguido do LCA, que estima a celulose e a lignina.

Neste mesmo sentido, infere-se que houve forte correlação entre os índices analisados, os fatores de refletâncias e as análises da remoção de contínuo, uma vez que as folhas úmidas (ponteira, folha verde e senescente) não apresentaram fortes absorções na análise dos FR, nem na análise da remoção de contínuo, fato coerente com os índices de vegetação que para estas folhas apresentaram baixos valores de CAI e LCA, indicando que a presença da água nas folhas denominadas “úmidas” mascararam as absorções dos componentes de interesse desta pesquisa.

## Correlação entre CAI e NDVI

Realizou-se a correlação entre o CAI e o NDVI, com o intuito de relacionar o nível de biomassa das folhas com seus respectivos índices de celulose estimados pelo CAI. Os maiores valores do CAI indicam maior presença de celulose nas folhas (DAUGHTRY et al., 2001). Os maiores valores de NDVI indicam maior quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa (ROUSE et al., 1973).

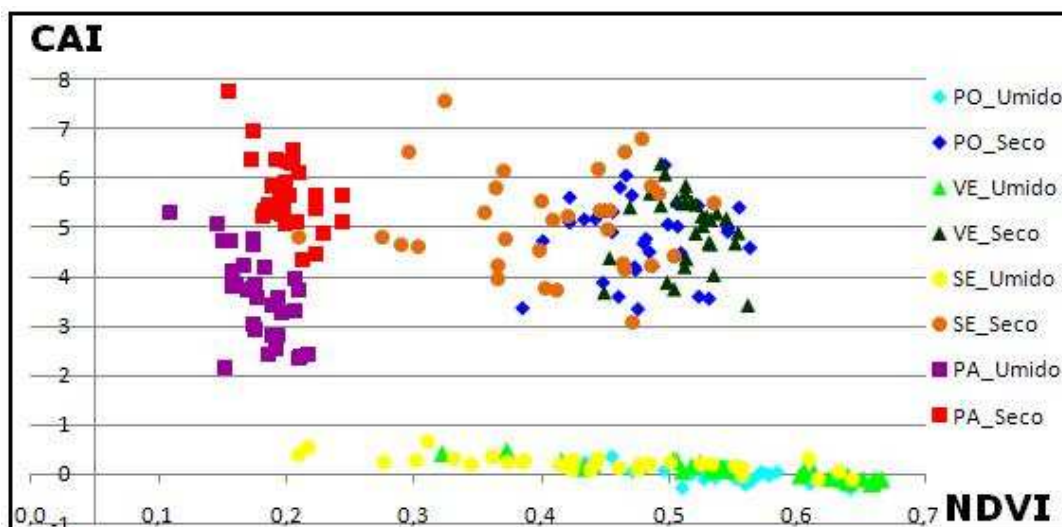


Figura 71. Correlação entre CAI e NDVI de todas as folhas.

Nota-se, na Figura 71, que houve aglomeração das folhas úmidas (ponteira, folha verde e senescente) tendendo a zero no CAI. Embora estas folhas tenham apresentado altos valores de NDVI (variando aproximadamente entre 0,2 e 0,7) indicando significativa quantidade de pigmentos fotossintetizantes e água, estas folhas úmidas apresentaram baixos valores no CAI (variando de -0,5 a 0,5), que podem ser explicados pela presença da água nestas folhas.

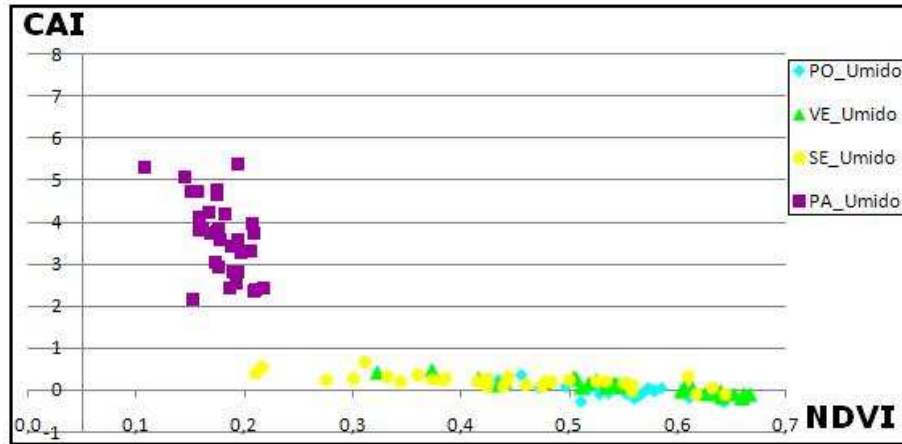


Figura 72. Correlação entre CAI e NDVI das folhas úmidas.

De acordo com a Figura 72, ocorre a segregação da palha dentro as folhas úmidas no CAI, pois, mesmo em condições de umidade, a palha é a folha que melhor responde à presença da celulose, conforme as afirmações de DAUGHTRY (2001). Nota-se que, dentre as folhas úmidas, a palha apresenta os menores valores de NDVI (variado entre 0,1 e 0,2), devido a sua menor quantidade de água e pigmentos na estrutura foliar.

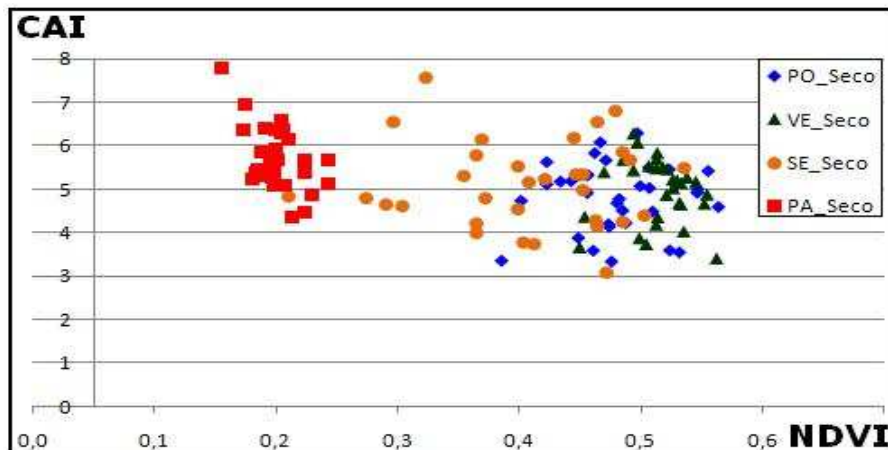


Figura 73. Correlação entre CAI e NDVI das folhas secas.

Verifica-se que todas as folhas secas possuem, praticamente, os mesmos valores de CAI (variando entre 3 e 4), sendo que a palha, levemente, se sobressai no CAI em relação às demais folhas secas (Figura 73).

Entretanto, quando se analisa o NDVI, nota-se coerência entre os níveis de biomassa das folhas, pois, as duas folhas mais jovens (a ponteira e a folha verde) são as que possuem

maiores valores de biomassa (NDVI). A folha senescente é intermediária entre as folhas jovens e a palha (Figura 73). Ressaltando que a palha apresenta os menores valores de NDVI, visto que possui baixa quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa.

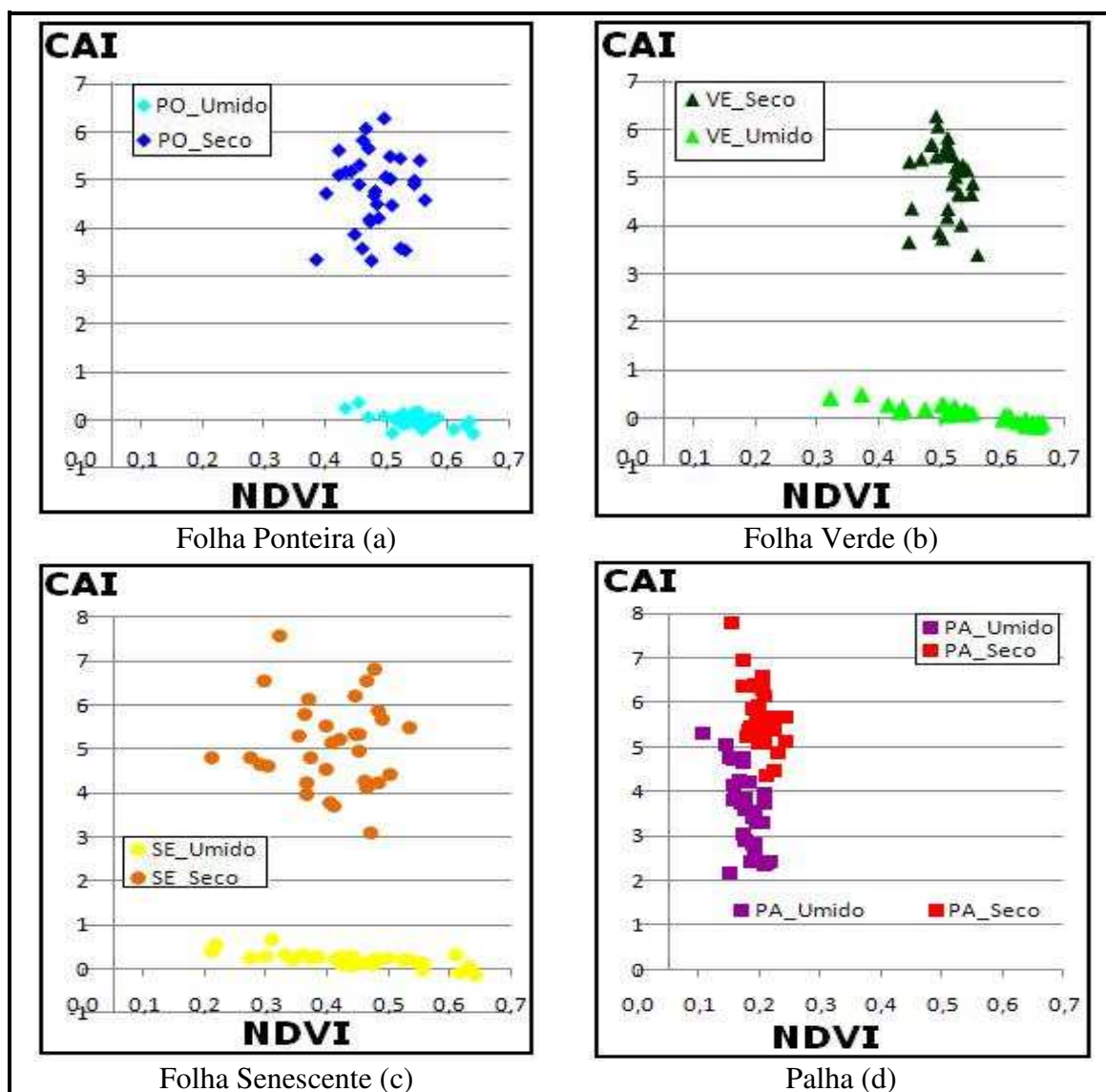


Figura 74. Correlação entre CAI e NDVI de todas as folhas separadamente.

Verifica-se que todas as folhas secas apresentaram valores de CAI maiores que as folhas úmidas (Figura 74). Com exceção da palha, todas as folhas apresentaram agrupamentos distanciados/discrepantes no CAI entre as condições úmidas e secas (Figuras 74a, 74b, 74c). Os valores de NDVI das folhas secas (ponteira, verde e senescente) diminuíram, sutilmente, se comparado aos valores do NDVI das folhas úmidas, fato que pode ser explicado pela redução

da água dentro da estrutura celular das folhas (GATES et al., 1965; GAUSMAN, 1985; MOREIRA, 2011; PONZONI e SHIMABUKURO, 2009).

Na Figura 74d, os valores de NDVI da palha seca permaneceram, praticamente, iguais aos valores do NDVI da palha úmida, ambas permaneceram próximas a 0,2. Entretanto, não ocorreu sobreposição, pois a palha seca apresentou valores de CAI maiores que a palha úmida, ou seja, o NDVI não segregou as folhas, os agrupamentos foram separados em função do CAI.

A Tabela 29 “Coeficiente de Correlação entre CAI e NDVI das folhas” constata que não ocorreu proporcionalidade entre os dois índices, uma vez que apresentou valores de correlação negativos para todas as folhas, com exceção da ponteira seca que tende a zero, indicando baixa correlação entre as variáveis.

Tabela 29. Coeficiente de Correlação entre CAI e NDVI das folhas.

	CAI Úmida x NDVI Úmida	CAI Seca x NDVI Seca
PO	-0,58415	0,05025
VE	-0,91337	-0,12668
SE	-0,71873	-0,04002
PA	-0,54441	-0,51524

Há que se concluir que houve clareza e definição entre os agrupamentos das folhas úmidas e secas, não em função da biomassa das mesmas, mas sim em função do índice que estima o componente celulose (CAI), que foi melhor discriminado/identificado/estimado sem a presença da água nas folhas, conforme as afirmações de DAUGHTRY (2001) ao elucidar que quanto menor o volume de água na folha, maior será a quantidade de radiação refletida dos componentes de interesse presentes nos alvos.

Pode-se afirmar que o gráfico de dispersão entre o CAI x NDVI foi o que melhor separou as folhas por tipos ou estágios de crescimento. Pois separou quatro grupos: o primeiro, das ponteiros secas com as folhas verdes secas; o segundo, das palhas segregadas das demais folhas secas; o terceiro, das folhas senescentes que ficaram intermediárias entre o primeiro e segundo grupo; e o quarto e último grupo, das folhas úmidas (ponteiros, verdes, senescentes).

## Correlação entre LCA e NDVI

Realizou-se a correlação entre o LCA e o NDVI, com o intuito de relacionar o nível de biomassa das folhas com seus respectivos índices de lignina e celulose estimados pelo LCA.

Os maiores valores de LCA indicam maior presença de lignina e celulose nas folhas (DAUGHTRY et al., 2005). Os maiores valores de NDVI indicam maior quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa (ROUSE et al., 1973).

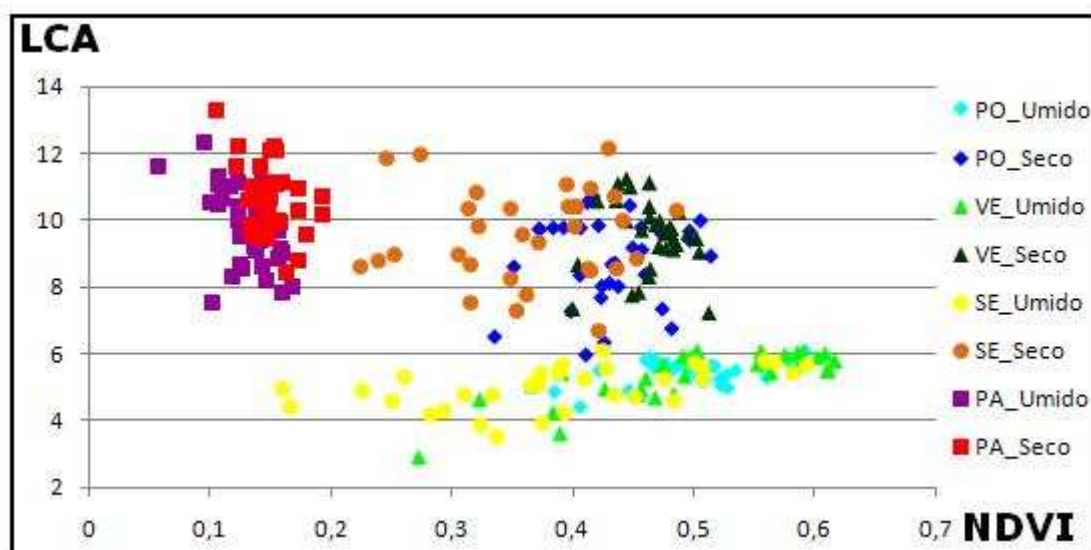


Figura 75. Correlação entre LCA e NDVI de todas as folhas.

De acordo com a Figura 75, ocorreram três agrupamentos no gráfico: o primeiro das folhas úmidas (ponteira, folha verde e senescente), apresentando altos valores de NDVI (variando aproximadamente entre 0,2 e 0,7), indicando significativa quantidade de biomassa, e apresentando os menores valores no LCA (variando entre 3 e 6), possivelmente, explicados pela presença de água nestas folhas, uma vez que a água absorve grande parte da radiação refletida pelos componentes nas folhas.

O segundo agrupamento é o das folhas secas (ponteira, folha verde e senescente), apresentando altos valores de NDVI e LCA, visto que, possuem significativa quantidade de pigmentos e pouca presença de água, uma vez que foram secas na estufa, aumentando a resposta dos componentes lignina e celulose.



O terceiro grupo é constituído pela palha úmida e seca, apresentando os menores valores de NDVI e altos valores de LCA, provavelmente, devido a pouca presença de água e pigmentos.

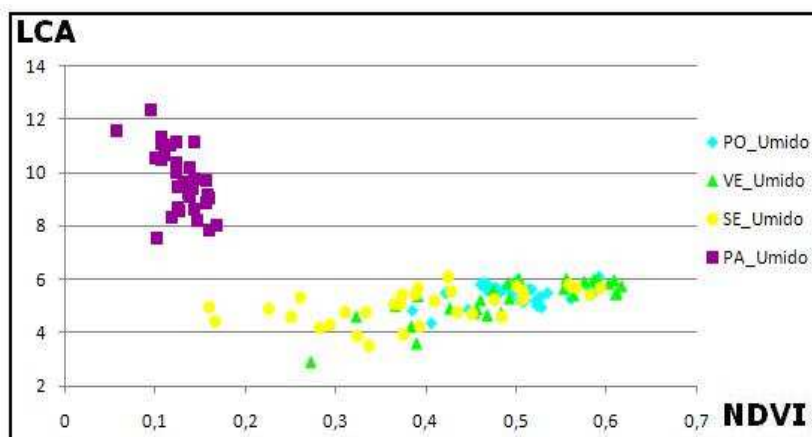


Figura 76. Correlação entre LCA e NDVI das folhas úmidas.

Na Figura 76, percebe-se a segregação da palha dentre as folhas úmidas no LCA, pois a palha é a folha que melhor responde à presença da lignina e celulose, mesmo em condições de umidade, conforme as afirmações de DAUGHTRY (2001).

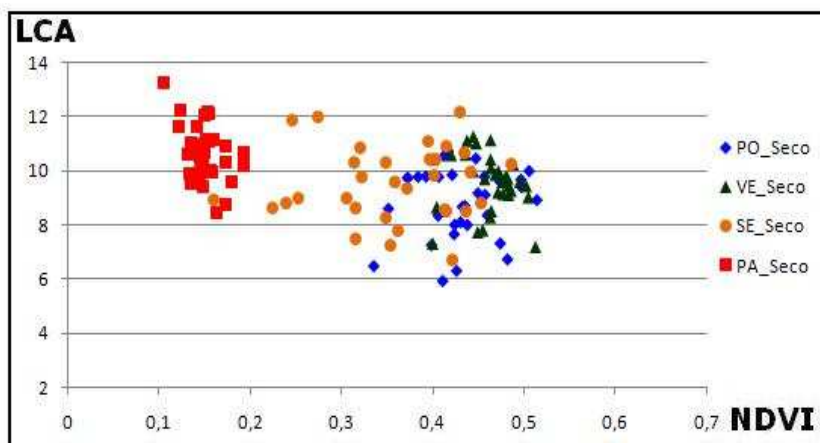


Figura 77. Correlação entre LCA e NDVI das folhas secas.

Nota-se que, todas as folhas secas possuem, praticamente, os mesmos valores de LCA, ressaltando que a palha se sobressai sutilmente em relação às demais folhas secas no LCA (Figura 77).

A ponteira e a folha verde estão no pico do NDVI, pois possuem maior presença de pigmentos fotossintetizantes e água na sua estrutura celular (Figura 77). As folhas senescentes possuem quantidades menores de água e pigmentos em seu interior, se comparadas às folhas verdes e ponteiros. E as palhas apresentaram os menores valores de NDVI, por possuírem pouco ou nenhum pigmento e água na folha.

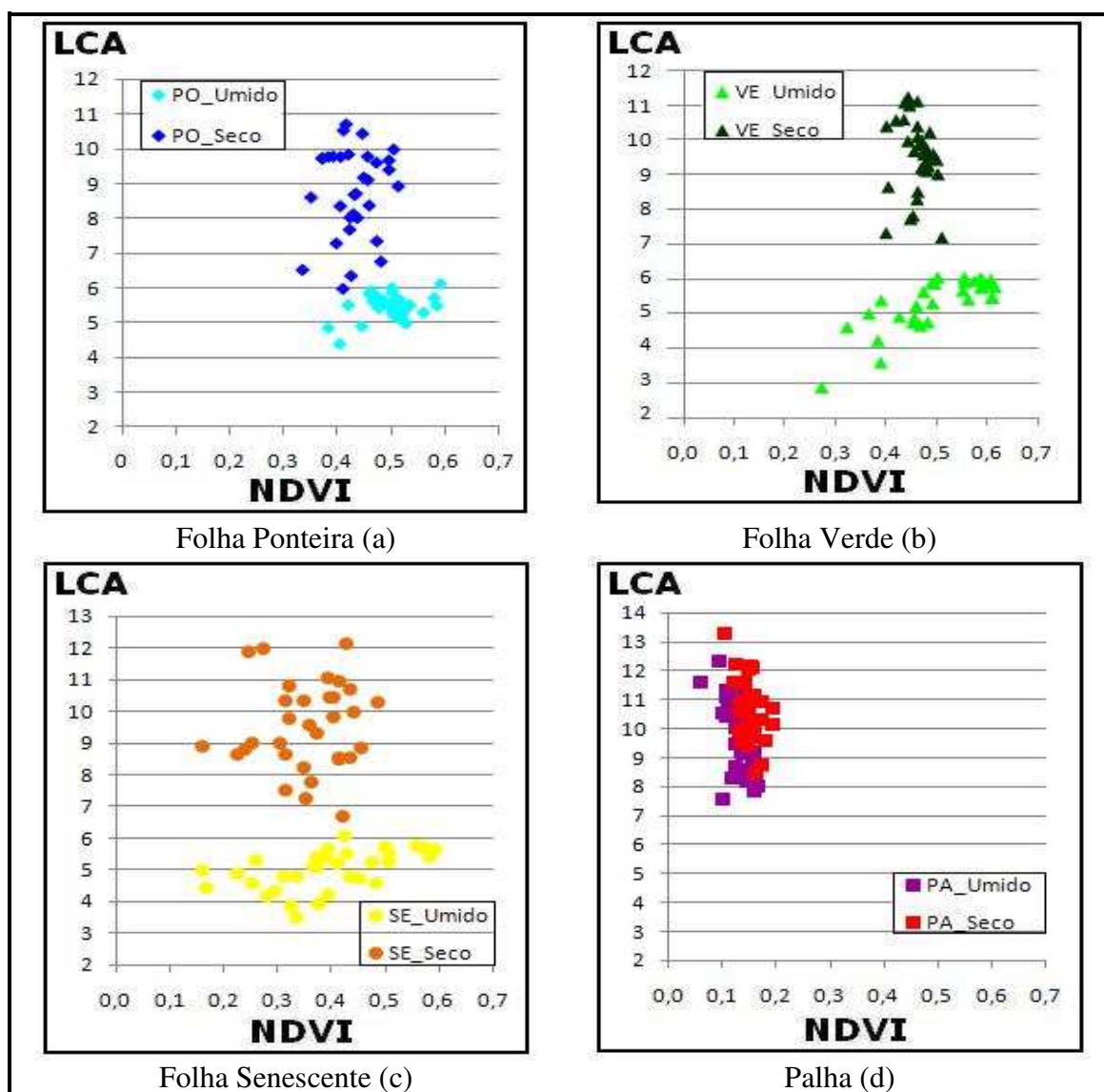


Figura 78. Correlação entre LCA e NDVI de todas as folhas separadamente.

Verifica-se que, na Figura 78, com exceção da palha, todas as folhas apresentaram agrupamentos bem definidos entre as condições úmidas e secas. Mesmo com as folhas úmidas

próximas às folhas secas, todas as folhas secas apresentaram valores de LCA maiores que as folhas úmidas, fato que separou os agrupamentos.

A palha seca aumentou infimamente os valores do NDVI e do LCA, se comparado aos valores da palha úmida (Figura 78d).

A Tabela 30 “Coeficiente de Correlação entre LCA e NDVI das folhas” mostrou boa/regular correlação entre as folhas úmidas (ponteira, verde e senescente). A folha verde seca e as palhas (úmida e seca) apresentaram valores negativos, indicando correlação inversa entre os índices. As folhas secas (ponteira e senescente) apresentaram valores tendendo a zero, indicando baixa correlação entre as variáveis.

Tabela 30. Coeficiente de Correlação entre LCA e NDVI das folhas.

	LCA Úmida x NDVI Úmida	LCA Seca x NDVI Seca
PO	0,36001	0,11711
VE	0,80115	-0,13779
SE	0,52504	0,05194
PA	-0,57740	-0,42421

Conclui-se, portanto que, o gráfico de dispersão entre os índices LCA e NDVI separaram os agrupamentos das folhas em função do LCA, que estima a lignina e a celulose, e que foram melhor identificados sem a presença da água nas folhas, conforme as afirmações de DAUGHTRY (2001) que explica, quanto menor o volume de água na folha, maior será a quantidade de radiação refletida dos componentes de interesse presentes nos alvos.

## **Conclusão geral dos índices de vegetação**

Em geral, conclui-se que os índices de vegetação (CAI e LCA) mostraram-se excelentes ferramentas do sensoriamento remoto, pois podem ajudar como indicador de teores de lignina e celulose, à luz dos novos programas espaciais de sensoriamento remoto hiperspectrais.

Na Figura 79 pode-se visualizar, de modo geral, todos os gráficos de dispersão e constatar que, com a utilização dos índices de vegetação, foi possível separar e definir os grupos das folhas úmidas em relação às folhas secas e o CAI apresentou melhor separação das folhas, se comparado ao LCA.

A correlação CAI x LCA foi eficaz quanto à separação entre as condições úmidas e secas, apresentando alta correlação entre os índices das folhas secas. No entanto, não foi eficaz quanto à separação por tipos de folhas, com exceção da palha úmida que se separou das demais folhas úmidas (Figura 79).

As correlações entre CAI x NDVI e LCA x NDVI foram eficazes quanto à separação por tipos de folhas, uma vez que houve junção somente das ponteiros secas com as folhas verdes secas, entretanto a palha se segregou das demais folhas secas e as folhas senescentes ficaram intermediárias entre a palha e as ponteiros misturadas com as verdes (Figura 79).

A comparação entre as fases de crescimento das folhas da cana foi feita com o objetivo de constatar que a intensidade da absorção da lignina, celulose e hemicelulose são proporcionais à medida que as folhas se desenvolvem. Tendo em vista que, a ponteira e a folha verde seriam as folhas com menores intensidades e absorções dos componentes, seguida da folha senescente e por último a palha com a maior presença e absorção dos componentes.

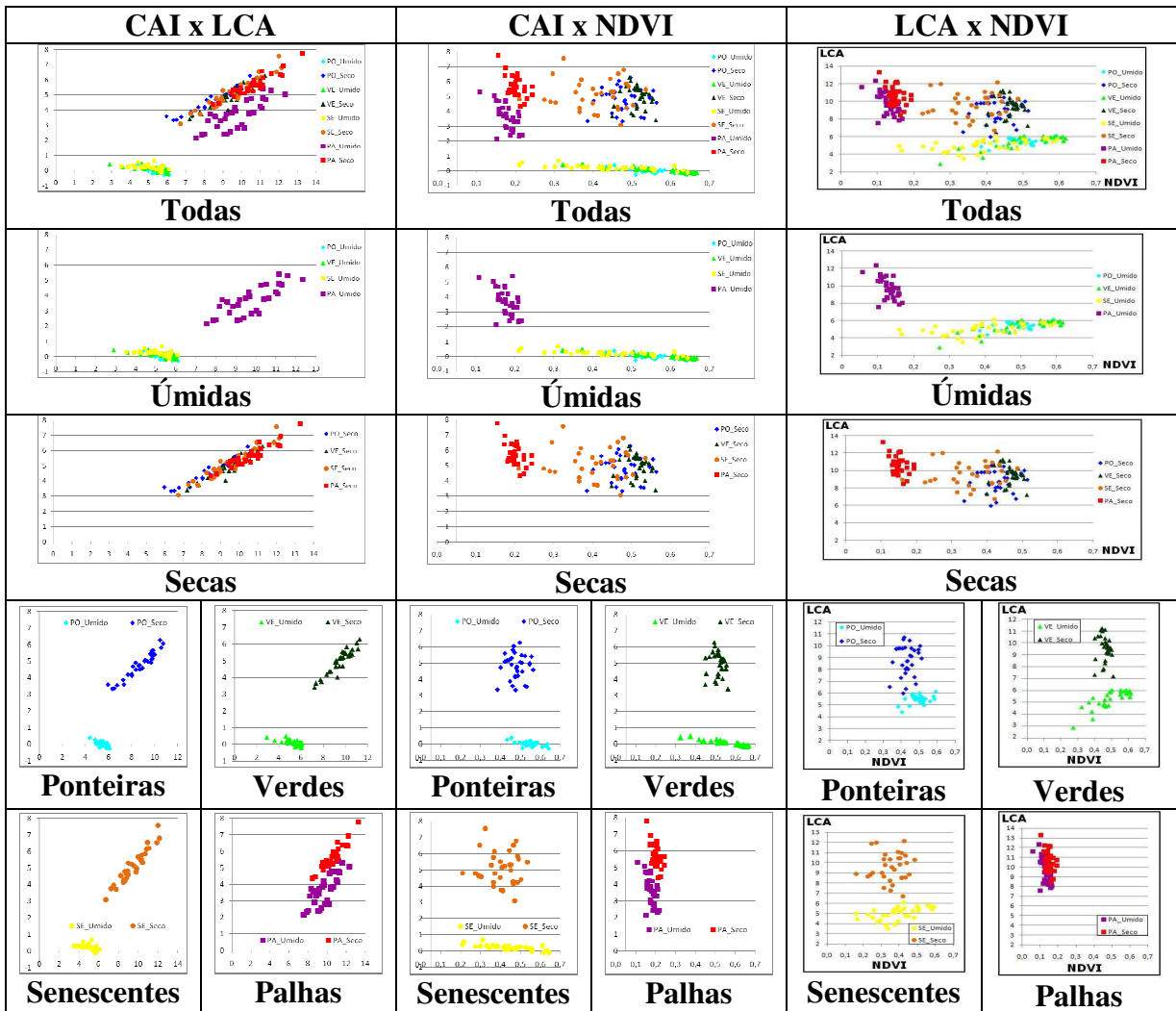


Figura 79. Síntese das Correlações entre os índices (CAI, LCA e NDVI).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

Para identificar as feições de absorção associadas aos componentes, tanto na análise do fator de refletância, quanto na remoção de contínuo e nos índices de vegetação, foi imprescindível analisar as folhas na condição seca.

Nas análises de FR, da remoção de contínuo e dos índices de vegetação, a folha verde e a ponteira apresentaram as menores correlações associadas à presença dos componentes.

Os resultados mostraram que ocorreram absorções próximas a 1730, 1780, 2100, 2270 e 2330 nm associadas à lignina, à celulose e à hemicelulose contidas nas folhas da cana-de-açúcar.

Quanto aos índices de vegetação, conclui-se que, o CAI e o LCA foram eficazes na identificação dos componentes celulose e lignina, sendo que o CAI apresentou-se como melhor estimador e discriminador entre as condições úmidas e secas das folhas, se comparado ao LCA.

Verificou-se que 100% das amostras secas apresentaram valores de CAI e LCA positivos, valores estes, expressivamente maiores que o das folhas úmidas.

O fator de refletância e o CAI das palhas foram significativamente maiores que das demais folhas.

As correlações entre CAI, LCA e NDVI permitiram a segregação e definição dos agrupamentos das folhas nas condições úmidas e secas. Houve somente uma aproximação entre a palha úmida e a palha seca, pois os valores do LCA dessas folhas não apresentaram fortes alterações, ressaltando que estas folhas mostraram-se próximas uma da outra, mas não sobrepostas, devido aos resultados do CAI da palha seca que foram maiores.

Quanto à segregação e definição por tipos de folhas, as correlações entre CAIxNDVI e LCA x NDVI foram eficientes na separação das palhas e das folhas senescentes, no entanto, não houve uma separação visível entre as folhas ponteiras e folhas verdes, provavelmente, pelo fato de que estão em fases de crescimento muito próximas uma da outra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ALEXANDER, A. G. **Sugarcane physiology**. A comprehensive study of the *Saccharum* source-to-sink system. Elsevier, Amsterdam, p. 60-193, 1973.

BANNARI, A.; PACHECO, A.; STAENZ, K.; MCNAIRN, H.; OMARI, K. Estimating and mapping crop residues cover on agricultural lands using hyperspectral and IKONOS data. **Remote Sensing Environment**, v.104, p.447-459, 2006.

BARROS, E.V. A matriz energética mundial e a competitividade das nações: bases de uma nova geopolítica. **ENGEVISTA**, v. 9, n. 1, p. 47-56, junho 2007. Disponível em: [http://www.uff.br/engevista/9\\_1Engevista5.pdf](http://www.uff.br/engevista/9_1Engevista5.pdf)

BENVENUTI, Fernando Aparecido. **Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos**. 103p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

BRUNINI, Orivaldo. Ambientes Climáticos e exploração agrícola da cana. In: DINARDO-MIRANDA, Leila Luci; VASCONCELOS, Antonio Carlos Marchado de; LANDELL, Marcos Guimarães de Andrade. **Cana-de-açúcar**. 1ª Edição: Campinas, Instituto Agrônômico, 2010, 882p.

CHANG, Chein-I. **Hyperspectral imaging: techniques for spectral detection and classification**. p.370, 2003.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. FUNEP, Jaboticabal, 157p, 1991.

CLARK, R. N., ROUSH, T. L. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications: **Journal of Geophysical Research**, v. 89, nº B7, 1984, pp. 6329-6340.

COLWELL, R. N. **Manual of Remote Sensing**. 2ª Edição. Ed., Falls Church: ASP&RS, 1983.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: Cana-de-açúcar – safra 2009: Segundo Levantamento**. 2009. Disponível: <http://www.conab.gov.br/> Acessado em: setembro de 2009.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: Cana-de-açúcar – safra 2011: Primeiro Levantamento. maio/2011**. Disponível: <http://www.conab.gov.br>. Acessado em: junho de 2011.

CORTEZ, L.A.B.; LEAL, M.R.L.V. **Uso da Palha da Cana VS Emissões de GEE**. Oficina de Trabalho Sustentabilidade do Bietanol. Brasília, 25 e 26 de Fev. 2010. site: [http://www.cgee.org.br/arquivos/pdf/of\\_bioetanol/Uso\\_da\\_palha\\_da\\_cana\\_vs\\_emissoes%20de%20GEE\\_CGEE\\_02\\_2010\\_Final\\_1.pdf](http://www.cgee.org.br/arquivos/pdf/of_bioetanol/Uso_da_palha_da_cana_vs_emissoes%20de%20GEE_CGEE_02_2010_Final_1.pdf) Acessado em: 16/07/2010.

CURRAN, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. **Remote Sensing of Environment**, 30, p. 271– 278, 1989.

DAUGHTRY, C.S.T. Discriminating crop residues from soil by shortwave infrared reflectance. **Agronomy Journal**. v.93, p.125-131, 2001.

DAUGHTRY, C.S.T.; HUNT, E.R., Jr.; MCMURTREY, J.E., III. Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance. **Remote Sensing Environment**. v.90, 2004, p.126-134.



DAUGHTRY, C.S.T.; HUNT Jr, E.R.; DORAISWAMY, P.C.; MCMURTREY, J.E., III. Remote sensing the spatial distribution of crop residues. **Agronomy Journal**. v.97, p.864-871, 2005.

DAUGHTRY, C.S.T.; DORAISWAMY, P.c.; HUNT JUNIOR, E.R.; STERN, A.J.; MCMURTREY III, J.E.; PRUEGER, J.H. . Remote sensing of crop residue cover and soil tillage intensity. **Soil & Tillage Research**, v.91, p.101-108, 2006.

DAUGHTRY, C.S.T.; HUNT Jr., E.R. Mitigating the effects of soil and residue water contents on remotely sensed estimates of crop residue cover. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1647–1657, 2008.

DAUGHTRY, C.S.T.; SERBIN, G.; REEVES III, J.B.; DORAISWAMY, P.C.; HUNT Jr., E.R. Wheat Straw Composition and Spectral Reflectance Changes During Decomposition. In: IEEE IGARSS ANNUAL PROCEEDINGS, 1, 2009, Grenoble. **Proceedings...** Grenoble: Evolution In Remote Sensing, p.1-4, 2009.

DAUGHTRY, C.S.T.; SERBIN, G.; REEVES III, J.B.; DORAISWAMY, P.C.; HUNT Jr., E.R. Spectral Reflectance of Wheat Residue during Decomposition and Remotely Sensed Estimates of Residue Cover. **Remote Sensing**. v.2, n.2, p.416-431, 2010.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Roma: FAO, 1979. 193p. (FAO: Irrigation and drainage, n.33).

ELVIDGE, C. D. Examination of the spectral features of vegetation in 1987 AVIRIS data. **Proceedings** of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Performance Evaluation Workshop. June 6, 7, 8, 1988. Sept. 15, 1988, NASA publication.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro: 2ª Edição. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - SPI. 306 p.

EMBRAPA. **Informações da cana-de-açúcar.** In: <  
[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia8/AG01/arvore/AG01\\_453\\_217200392420.ht](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia8/AG01/arvore/AG01_453_217200392420.html)  
ml > acesso: janeiro de 2009.

FELIX, Iara Musse; KAZMIERCZAK, Marcos Leandro; ESPINDOLA, Giovana Mira de. RapidEye: a nova geração de satélites de Observação da Terra. In: SBSR, 14, 2009, Natal, **Anais...** São José dos Campos: INPE, p.7619-7622, 2009.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria canavieira.** Piracicaba: STAB, 2000. 193p.

FIESP, Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço de cana-de-açúcar).** São Paulo: setembro, 2001.

GALVÃO, Lênio Soares; FORMAGGIO, Antônio Roberto; TISOT, Daniela Arnold **Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data.** Remote Sensing of Environment: 94(2005), pp. 523-534.

GASQUES, Vilma. **Uso mundial do álcool elevará PIB do Brasil.** Jornal Correio Popular, Folha Economia. Data: 17 de novembro de 2005. Fonte: Unicamp.

GATES, D. M.; KEEGAN, H. J.; CHLETER, J. C; WEIDNER, V. R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v.4, n.1, p. 11-20, 1965.

GAUSMAN, H.W. Leaf reflectance of near-infrared. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.** V.51, n.11, p.1725-1734, 1985.

GOETZ, S.J.A.; BACCINI, N.T.; LAPORTE, T.; WALKER J.W.; KELLNDORFER J.; HOUGHTON R.A.; SUN M.. Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods. **Carbon Balance and Management.** v. 4, n. 2, 2009.

GOMES, F. P. Curso de estatística experimental. 14 Edição. Piracicaba: ESALQ, 2000, 477 p.

GONÇALVES, D. B. **Considerações sobre a expansão recente da lavoura canavieira no Brasil.** Informações Econômicas, SP, v.39, n.10, out. 2009.

[http://www.uff.br/engevista/2\\_11Engevista6.pdf](http://www.uff.br/engevista/2_11Engevista6.pdf)

GREEN, A. A., and CRAIG, M. D. Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals: in **Proceedings**, AIS workshop, 8-10 April, 1985, JPL Publication 85-41, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 1985, p. 111-119.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dados sobre a área do município, sócio econômico e da cultura temporária da cana-de-açúcar.** Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/>> Acessado em 01 de Janeiro de 2009.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal.** Culturas temporárias. Tabela 1612. Disponível em:

< <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=1612&z=p&o=32>> Acesso em: 17 de fevereiro de 2012.

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*. **Climate change 2007: the physical science basis: summary for policymakers.** Geneva: IPCC, 2007. 18 p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>>. Acesso em: 3 ago. 2010.

JENSEN, John. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** / tradução da 2ª Edição por José Carlos Neves Epiphany (coordenador)... et al. São José dos Campos , SP: Parêntese, 2009.

KITAYAMA, Onório. Situação atual e perspectivas de expansão do setor sucroalcooleiro no Brasil e no Mundo. Palestra apresentada na OFICINA ANA – Agência Nacional da Água. 2007. Disponível em: <[www.ana.gov.br/SalaImprensa/doc\\_oficina/UNICA.pps](http://www.ana.gov.br/SalaImprensa/doc_oficina/UNICA.pps)>. Acesso em: fev. 2011.

KOKALY, R. F.; ASNER, Gregory P.; OLLINGER, Scott V.; MARTIN, Mary E.; WESSMAN, Carol A. Characterizing canopy biochemistry from imaging spectroscopy and its application to ecosystem studies. **Remote Sensing of Environment**, 113, S78-S91, 2009.

KRUSE, F. A., CALVIN, W. M., SEZNEC, O., 1988, Automated extraction of absorption features from Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) and Geophysical Environmental Research imaging spectrometer (GERIS) data: In **Proceedings** of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) performance evaluation workshop, JPL Publication 88-38, p. 62-75.

LAVANHOLI, Maria das Graças Drumsta Prado. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de açúcar e álcool. In: DINARDO-MIRANDA, Leila Luci; VASCONCELOS, Antonio Carlos Marchado de; LANDELL, Marcos Guimarães de Andrade. **Cana-de-açúcar**. 1ª Edição: Campinas, Instituto Agronômico, 2010, 882p.

LIMA, Magda Aparecida; LIGO, Marcos Antonio Vieira; CARVALHO, Elton César de; PESSOA, Maria Conceição Peres Young. **Estimativa de emissões de gases de efeito estufa provenientes da queima da cana-de-açúcar no estado de São Paulo no período de 1986 a 2008**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2010. 23p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 83).

LUPA – **Levantamento de Unidades de Produção Agropecuária do Estado de São Paulo, 2009**. <http://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/mapaculturas/Cana.php> acessado em 25 de abril de 2010.

NAGLER, P. L.; DAUGHTRY, C. S. T.; GOWARD, S. N. Plant Litter and Soil Reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 2, n. 71, p.207-215, Fev, 2000.

NORRIS, K. H., BARNES, R. F., MOORE, J. E., SHENK, J. S. Predicting forage quality by infrared reflectance spectroscopy, **J. Animal Sci.** 43:839-878, 1976.

MACHADO, E.C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (Saccharum sp.)**. 115p. Dissertação (Mestrado em Biologia) - Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, 1981.

MACHADO, H.M. **Determinação da biomassa da cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat 7 – ETM+**. 71p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MAGALHÃES, Lucíola Alves; QUITÉRIO, Giuliana Clarice Mercuri; SOUZA FILHO, Carlos Roberto de; ALMEIDA, Teodoro Isnard Ribeiro de; ALVES, Marcos Nopper; OLIVEIRA, Wilson José; RABACO, Lis Maria Leoni; ROCHA, Renato. Caracterização espectral de Eucalyptus camaldulensis submetidos a fluxo forçado de. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** . São José Dos Campos: INPE, 2011. p. 8559 – 8566.

MÁXIMO, Fernando Atitique; EVANGELISTA, Silvio Roberto Medeiros. **Manual da árvore hiperbólica** - Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 33 p., 2009.

MOREIRA, Maurício Alves. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2011. 4º edição. 422p.

MURRAY, I., WILLIAMS, P.C. Chemical principles of near- infrared technology. p. 17–34. In P. Williams and K. Norris (ed.) **Near-infrared technology in the agricultural and food industries**. Am. Assoc. Cereal Chemists, St. Paul, MN, 1988.

NOVO, Evelyn Márcia Leão de Moraes. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2008. 3ª Edição, 363p.

PRADO, Hélio do; PÁDUA JR., Alceu Linares; GARCIA, Júlio César; MORAES, Jener Fernando Leite de; CARVALHO, João Paulo de; DONZELI, Pedro Luiz. Solos e Ambientes

de Produção. In: DINARDO-MIRANDA, Leila Luci; VASCONCELOS, Antonio Carlos Marchado de; LANDELL, Marcos Guimarães de Andrade. **Cana-de-açúcar**. 1ª Edição: Campinas, Instituto Agronômico, 2010, 882p.

PELLEGRINO, Giampaolo Queiroz. **Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar**. 114p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

PINTER JR., P. J.; JACKSON, R.D.; EZRA, C. E.; GAUSMAN, H. W. Sun-angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. **International Journal of Remote Sensing**. v.6, n.12, p.1813-25, dec. 1985.

PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. Edição 2010. São José dos Campos, SP: Editora Parêntese, 2009, 136p.

RIPOLI, Marco Lorenzo Cunali; RIPOLI, Tomaz Caetano Cannavam. Palhiço como fonte de energia. In: DINARDO-MIRANDA, Leila Luci; VASCONCELOS, Antonio Carlos Marchado de; LANDELL, Marcos Guimarães de Andrade. **Cana-de-açúcar**. 1ª Edição: Campinas, Instituto Agronômico, 2010, 882p.

ROSA. R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 5. ed. Uberlândia: EDUFU, 2005. pp.11-111.

ROSSETO, RAFFAELLA. A cana-de-açúcar e a questão ambiental. In: DINARDO-MIRANDA, Leila Luci; VASCONCELOS, Antonio Carlos Marchado de; LANDELL, Marcos Guimarães de Andrade. **Cana-de-açúcar**. 1ª Edição: Campinas, Instituto Agronômico, 2010, 882p.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3, 1973. **Proceedings**. Washington, 1973, v.1, Sec. A, p. 309-317.

SANO, Edson Eyji; ASSAD, Eduardo Delgado; ORIOLI, Álvaro Luiz. Monitoramento da Ocupação Agrícola. In: ASSAD, Eduardo Delgado; SANO, Edson Eyji. **Sistemas de Informações Geográficas: aplicações na agricultura**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1993. cap. 12, p. 155-170.

SANTOS, A. H. M. Análise econômica em conservação de energia. In: Jamil Haddad; André Ramon Silva Martins; Milton Marques. (Org.). **Conservação de energia eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá: Editora da Efei, 2001.

SÃO PAULO (Estado). Lei n. 11.241, de 19 de setembro de 2002. **Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas**. Disponível em: <  
[http://www.iea.sp.gov.br/out/bioenergia/legislacao/2002\\_Lei\\_Est\\_11241](http://www.iea.sp.gov.br/out/bioenergia/legislacao/2002_Lei_Est_11241)>. Acesso em: 30 de janeiro de 2011.

SÃO PAULO (Estado). **Protocolo de Cooperação Agro-Ambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista para a adoção de ações destinadas a consolidar o desenvolvimento sustentável da indústria da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. Disposto em 04 de junho de 2007. Disponível em:  
<http://www.ambiente.sp.gov.br/cana/protocolo.pdf>. Acesso em: 13 de maio de 2010.

SCARPARI, Maximiliano Salles e BEAUCLAIR, Edgar Gomes Ferreira de. Anatomia e Botânica. In: DINARDO-MIRANDA, Leila Luci; VASCONCELOS, Antonio Carlos Marchado de; LANDELL, Marcos Guimarães de Andrade. **Cana-de-açúcar**. 1ª Edição: Campinas, Instituto Agrônomo, 2010.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; Pinto, A. S.; Jendiroba, E. Nóbrega, J. C. M. (org.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006, p. 19-36.

SERBIN, G.; DAUGHTRY, C.S.T.; HUNT JR., E. R.; BROWN, D. J.; MCCARTY, G.W. Effect of Soil Spectral Properties on Remote Sensing of Crop Residue Cover. **Soil & Water Management & Conservation**, Washington, Dc, v. 73, n. 5, p.1545-1558, out. 2009.

SILVA, D.J.; QUEIROZ, A.C. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. Viçosa: Imprensa Universitária, p. 235, 2002.

STRECK, N. A.; RUNDQUIS, D.; CONNOT, J.I. Estimating Residual Wheat Dry Matter from Remote Sensing Measurements. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 68, n. 11, p.1193-1201, nov. 2002.

SUGAWARA, Luciana Miura; RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor. Acompanhamento do crescimento vegetativo da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. **Anais...** São José Dos Campos: INPE, 2011. p. 391-398. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1216.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2011.

UNICA, **União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo. Estimativa de Safra 2011/2012**. Março de 2011. Disponível em [www.unica.org.br](http://www.unica.org.br). Acesso em junho de 2011.

VEIGA FILHO, Alceu de Arruda; FRONZAGLIA, Thomaz; TORQUATO, Sérgio Alves. A necessidade de inovação tecnológica agrícola para sustentar o novo ciclo expansionista do setor sucroalcooleiro. In: DINARDO-MIRANDA, Leila Luci; VASCONCELOS, Antonio Carlos Marchado de; LANDELL, Marcos Guimarães de Andrade. **Cana-de-açúcar**. 1ª Edição: Campinas, Instituto Agrônômico, 2010, 882p.



THOMA, D.P; GUPTA, S.C.; BAUER, M.E.. Evaluation of optical remote. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 59, n.5., p. 224-234. out. 2004.

## **Apêndice**

---

CD room contendo biblioteca espectral das folhas de cana-de-açúcar, nos formatos ASCII e imagem JPG.