

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**ESPECTRORRADIOMETRIA DO VISÍVEL E INFRAVERMELHO  
PRÓXIMO EM POVOAMENTO DE *Eucalyptus grandis* W.  
Hill ex Maiden**

**TESE DE DOUTORADO**

**Catize Brandelero**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

**ESPECTRORRADIOMETRIA DO VISÍVEL E INFRAVERMELHO  
PRÓXIMO EM POVOAMENTO DE *Eucalyptus grandis* W.**

**Hill ex Maiden**

por

**Catize Brandelero**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutor em Engenharia Florestal.**

**Orientador: Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

B817e

Brandelero, Catize, 1982-

Espectrorradiometria do visível e infravermelho próximo em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden / Catize Brandelero. - 2010.

82 f. ; il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, 2010.

“Orientador: Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira”

1. Engenharia florestal 2. *Eucalyptus grandis* 3. Comportamento espectral 4. Equações 5. Nutrientes I. Pereira, Rudiney Soares II. Título

CDU: 630\*2

Ficha catalográfica elaborada por

Patrícia da Rosa Corrêa – CRB 10/1652

Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Tese de Doutorado

**ESPECTRORRADIOMETRIA DO VISÍVEL E INFRAVERMELHO PRÓXIMO  
EM POVOAMENTO DE *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**

elaborada por  
**Catize Brandelero**

como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Doutor em Engenharia Florestal**

**Comissão Examinadora:**

---

**Rudiney Soares Pereira, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

---

**Frederico Dimas Fleig, Dr. (UFSM)**

---

**Elódio Sebem, Dr. (Colégio Politécnico UFSM)**

---

**Luciano Farinha Watzlawick, Dr. (UNICENTRO)**

---

**Eleandro José Brum, Dr. (UTFPR)**

Santa Maria, 20 de abril de 2010.

*Dedico este trabalho com muito carinho  
para:  
Meu marido **Lauro**,  
Nossa filha **Aiesha** e  
Meus pais **Argeo** e **Solange**.*

*"As homenagens deste dia se estendem a  
vocês, sempre presentes com um sorriso  
amigo e apoio nas horas difíceis.  
As alegrias de hoje também são de vocês,  
pois o vosso amor, carinho e estímulo,  
fazem parte desta vitória".*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade de aperfeiçoamento.

À CAPES, pelo auxílio financeiro concedido durante a realização deste curso.

Meu orientador e amigo Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira; dedicou seu tempo e compartilhou experiência, para que minha formação fosse também um aprendizado de vida. Com suas experiências, me fez ver que poderia encontrar o caminho certo. Soube ser mestre e, acima de tudo, grande amigo, meu agradecimento pelo carinho.

Aos Professores Doutores: Frederico Dimas Fleig (UFSM); Elódio Sebem (UFSM); Luciano Farinha Watzlawich (UFSM); Eleandro José Brun (UTFPR) por gentilmente aceitarem o convite em fazer parte desta banca.

Aos Professores Dr. Luciano Farinha Watzlawick (UNICENTRO) e Tatiane Chassot pelo auxílio na elaboração deste trabalho.

Aos Professores, Solon Jonas Longhi, Adroaldo Dias Robaina, Márcia Xavier Peiter, Elódio Sebem, Luiz Severo Mugica Mutti (UFSM), Enio Giotto, José Fernando Schlosser, Luiz Fernando Sangoi, José Américo de Mello Filho, pelos conselhos, carinho, atenção e disponibilidade.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, meu sincero muito obrigada pela partilha de seus conhecimentos.

Aos meus pais Argeo e Solange e meu irmão Rafael, Amo vocês de todo meu coração. Pai, Mãe: de vocês recebi o dom mais precioso do universo, a VIDA. Vocês foram peças marcantes nesta etapa! Cresci muito, como filha, mãe e profissional graças aos exemplos e a dedicação prestada. Obrigada!!

Falar da Família é sempre complicado, preciso agradecer a duas pessoas que mudaram a minha vida, o meu jeito de ser, de pensar e agir... Meu marido Lauro e nossa filha Aiesha (Vida), a vocês dois obrigada por entenderem e por me auxiliarem com Amor e Carinho diariamente, sem vocês este trabalho não teria sentido. A

vocês que se dedicaram sem medir esforços; a vocês AMORES DE MINHA VIDA, meu sorriso, meu carinho e o meu obrigado!

Às famílias Brandelero, Scalco, Behr, Mutti, Siqueira e Cia. Agradeço pelos conselhos, lições de amor e atenção que me foi transmitida.

Aos meus queridos amigos (as): Carla, Daianinha, Francielli, Péricles, Jean, Patrícia, Sabrina, Suellyenn, Mullinari: os verdadeiros amigos sabem entender o silêncio e manter a presença mesmo quando ausentes, vocês fazem muita falta!

A minha colega e grande amiga Kátia, que juntas participamos das aulas, provas, reivindicações, festas, alegrias e tristezas com a certeza de que estaríamos hoje comemorando o final desta luta e o início de muitas outras... Valeu!

Aos amigos e colegas conquistados na realização deste trabalho: Fernandinha, Josita, Charlotte, Erni, Paulo Floss e Diego. Agradeço por tantas coisas boas que pude aprender com vocês.

Aos colegas de Laboratório: Ana Caroline, Ariane, Dani, Elias, Renata, Laura, Luana, Kátia, Mateus, Luis; neste período cultivamos uma amizade que com o tempo amadureceu, sou grata por cada momento compartilhado, a todos muito obrigada!

À Fepagro Florestas Boca do Monte – Santa Maria, pela disponibilidade da área, além do apoio e ensinamentos técnicos de seus funcionários.

Aos funcionários, André, Luiz, Wanderley e Tita meu agradecimento pela atenção e amizade e a Rose, pelo carinho de todo dia e por manter nosso ambiente agradável.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Geomática e Engenharia Rural meu agradecimento pelo auxílio e amizade.

*"Às vezes ouço passar o vento; e só de ouvir o vento passar, vale a pena ter nascido". (Fernando Pessoa)*

Obrigada por vocês fazerem parte da minha vida.

*“De tudo ficaram três coisas: a certeza de que estamos sempre a começar, a certeza de que é preciso continuar, e a certeza de que seremos interrompidos antes de terminar.*

*Portanto, devemos fazer da interrupção um caminho novo, da queda um passo de dança, do medo uma escada, do sonho uma ponte, da procura um encontro”.*

*(Fernando Sabino)*

## RESUMO

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Centro de Ciências Rurais  
Universidade Federal de Santa Maria

### **ESPECTRORRADIOMETRIA DO VISÍVEL E INFRAVERMELHO PRÓXIMO EM POVOAMENTO DE *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**

Autor: Catize Brandelero

Orientador: Dr. Rudiney Soares Pereira

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 20 de abril de 2010.

Com o intuito de desenvolver estudos relacionando a espectrorradiometria de laboratório com os teores de macro e micronutrientes em materiais vegetativos de povoamentos florestais de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, com diferentes idades, uma área experimental foi selecionada para estudo na Fundação Estadual de Pesquisas Agropecuárias – FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. A partir da proposta de estudar o comportamento espectral, os objetivos específicos foram: 1) avaliar os teores de macro e micronutrientes de folhas de *E. grandis* nas quatro estações climáticas do ano em diferentes tipos de preparo de solo; 2) avaliar o comportamento espectral de folhas de *Eucalyptus grandis* abrangendo o intervalo de comprimento de onda de 475 a 980nm, e abordar as interações: períodos sazonais, preparos de solo e a localização cardinal das árvores amostradas; 3) avaliar o estado nutricional de folhas de plantas jovens de *E. grandis* por análise foliar e espectrorradiometria e gerar modelos capazes de estimar os teores de macro e micronutrientes a partir de dados de reflectância. Os resultados indicam que o povoamento de *E. grandis*, com 44 meses de idade, apresenta deficiência de P, S e B; Cu e Mn apresentam teores elevados; N é o único nutriente que apresenta diferença significativa; entre as estações climáticas não existem diferenças significativas. Para o povoamento de *E. grandis* com 20 meses, as variações obtidas para os teores de nutrientes foram iguais as da área anterior; a estação inverno apresentou comportamento diferenciado das demais estações. Para os diferentes preparos de solo os macro e micronutrientes, não variaram significativamente. Avaliando os dados de reflectância de folhas de *E. grandis*, com 20 meses de idade, conclui-se que: 1) as estações verão e primavera interferiram estatisticamente na reflectância; 2) as amostras de material vegetativo podem ser coletadas independentemente do tipo de manejo do solo; 3) as bandas espectrais que melhor expressaram o comportamento da vegetação, foram as bandas 12, 8, 7 e 3; e, 4) a avaliação das posições em que as folhas foram coletadas (Leste, Oeste, Norte, Sul e central) no tratamento com preparo de solo plantio direto indicaram que: a) as coletas de material vegetativo devem ser realizadas separando a parte central do povoamento da bordadura; e, b) a banda que melhor caracterizou a resposta espectral dessa vegetação foi a de número oito. A análise de componentes principais indicou as bandas 8, 11 e 12, como responsáveis por um total de 98,10% dos valores de reflectância em estudo. Ao gerar modelos considerando os elementos como variáveis dependentes da reflectância e estação do ano interagindo com comprimentos de onda, os elementos P e K apresentaram os valores dos coeficientes de correlação ajustados baixos; os valores de  $r^2_{aj}$  dos demais elementos variaram de moderados a altos.

Palavras-chave: comportamento espectral, modelos, macro e micronutrientes.

## ABSTRACT

Doctoral Thesis  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Centro de Ciências Rurais  
Universidade Federal de Santa Maria

### VISIBLE AND NEAR INFRARED SPECTRORADIOMETRY IN A *Eucalyptus grandis* W Hill ex Maiden POPULATION

Author: Catize Brandelero  
Adviser: Dr. Rudiney Soares Pereira  
Date and Place of Defense: Santa Maria, April 20<sup>th</sup>, 2010-04-06

Aiming to develop studies relating laboratory spectroradiometry with macro and micronutrients' contents of vegetative materials of forest populations of *Eucalyptus grandis* W Hill ex Maiden, of different ages, an experimental área was selected for the study at the Fundação Estadual de Pesquisas Agropecuárias – FEPAGRO FLORESTAS, at Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil. Departing from the purpose of studying the spectral behaviour, the specific objectives were: 1) to evaluate the leaves of *E. grandis*' contents of macro and micronutrients, in the four climatic seasons, under different types of soil managements; 2) to evaluate the leaves of *E. grandis*' spectral behaviour including the waveband of 475 to 980nm and approach the interaction between: climatic seasonal periods, different soil managements and the cardinal points locations of the sampled trees; 3) evaluate the nutritional status of *E. grandis* young trees' leaves through leaf analyses and spectroradiometry, and generate models capable to estimate macro and micronutrients from reflectancy data. Results indicate that the *E. grandis* population, of 44 months old, shows deficiencies of P, S, B; Cu and Mn showed high contents; N was the only nutrient showing significant differences; there is no significant differences between climatic seasons. For the *E. grandis*' population of 20 months old, variations observed in the nutrients contents were equal to those of the former area; the winter sesason showed a diferente behaviour from the other climatic seasons. For the different soil managements, the macro and micronutrients did not vary significantly. Evaluating the reflectancy data for the leaves of *E. grandis*, of 20 months old, it was concluded that: 1) the summer and spring seasons statistically interfered on the reflectancy; 2) samples of vegetative material may be collected independently of the type of soil management; and, 3) the spectral wavebands that better expresses the vegetation behaviour were the 12, 8, 7 and 3; and, 4) the evaluation of points where the leaves were sampled (East, West, North, South and central) in the no-tillage soil management treatment indicated that: a) sampling of vegetative material should be done separating the central part of the bordering population; and, b) the waveband that better characterized the spectral response of the vegetation was that of number eight. Analysis of the main components indicated the 8, 11 na 12 wavebands as responsible for a total of 98.10% of the reflectancy values under study. The elements P and K showed low adjusted correlation coefficients while generating models considering the elements as dependent variables from reflectancy and climatic seaso;n interacting with wavelengths; the  $r^2_{aj}$  values for the remaining elements varied from moderate to high.

**Keywords;** spectral behaviour, temporal analysis, macro and micronutrients

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Caracterização química do solo dos povoamentos de <i>Eucalyptus</i> sp. com 20 meses (A1) e 44 meses (A2) de idade, FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS. ....	36
TABELA 2 – Descrição dos procedimentos analíticos utilizados na determinação dos macro e micronutrientes de tecido vegetal – UFSM.....	40
TABELA 3 – Intervalos do espectro eletromagnético, utilizados para explicar o comportamento espectral de folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> – FEPAGRO FLORESTA, Santa Maria/RS.....	41
TABELA 4 – Médias dos teores de macronutrientes ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e micronutrientes ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), em folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> com 44 meses de idade, Santa Maria, RS .....	44
TABELA 5 – Faixas de concentração para os teores de macro e micronutrientes em folhas de <i>Eucalyptus</i> sp. ....	45
TABELA 6 – Análise de variância (experimento fatorial) para conteúdo de macronutrientes em <i>Eucalyptus grandis</i> com 44 meses de idade.....	46
TABELA 7 – Teste de Tukey para as médias dos teores de macronutrientes em <i>Eucalyptus grandis</i> com 44 meses de idade.....	46
TABELA 8 – Interação entre os teores de macronutrientes e as estações sazonais em folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> com 44 meses de idade.....	47
TABELA 9 – Análise da variância para um experimento fatorial para teores de micronutrientes <i>Eucalyptus grandis</i> com 44 meses de idade.....	47
TABELA 10 – Médias dos teores de macronutrientes ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e micronutrientes ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) para <i>Eucalyptus grandis</i> aos 20 meses de idade .....	49
TABELA 11 – ANOVA para teores de macronutrientes, em <i>Eucalyptus grandis</i> com relação aos fatores: preparo de solo, período sazonal, macronutrientes e suas interações. ....	50
TABELA 12 – Resultado do teste de comparação de médias para <i>Eucalyptus</i>	50

<i>grandis</i> considerando as quatro estações do ano e os macronutrientes.....	
TABELA 13 – Resultado do teste de comparação de médias para <i>Eucalyptus grandis</i> , considerando a interação entre as quatro estações do ano e os macronutrientes.....	51
TABELA 14 – Análise da variância para um experimento fatorial para os teores de micronutrientes em <i>Eucalyptus grandis</i> com 20 meses de idade.....	52
TABELA 15 – Resultado do teste de comparação de médias para a área 2 considerando as quatro estações do ano e os micronutrientes.....	52
TABELA 16 – Análise da variância para os cruzamentos de reflectâncias correspondentes às diferentes estações do ano, aos preparos de solo e às doze bandas em análise em <i>Eucalyptus grandis</i> com 20 meses de idade.....	55
TABELA 17 – Teste de Tukey para as médias de reflectâncias das folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> com 20 meses de idade. ....	56
TABELA 18 – Teste de comparação de médias de reflectância considerando a interação entre as quatro estações do ano e os preparos de solo .....	59
TABELA 19 – Resultado do teste de comparação de médias de reflectância considerando a interação entre as quatro estações do ano e as bandas.....	59
TABELA 20 – ANOVA para o comportamento espectral correspondente aos diferentes períodos sazonais, posição de coleta das folhas e 12 bandas em <i>Eucalyptus grandis</i> .....	60
TABELA 21 – Teste de Tukey para as médias de reflectâncias das folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> com 20 meses de idade, no preparo de solo plantio direto ...	60
TABELA 22 – Comparação de médias considerando a interação entre os períodos sazonais e as posições cardeais de coleta do material vegetativo de <i>Eucalyptus grandis</i> .....	61
TABELA 23 – Resultado do teste de comparação de médias considerando os períodos sazonais e as bandas do espectro eletromagnético de <i>Eucalyptus grandis</i> .....	62
TABELA 24 – Análise de componentes principais das reflectâncias de 3 bandas selecionadas de 12 bandas, apresentam variância acumulada que abrangem comprimentos de onda variando de 475 a 980nm do espectro eletromagnético .....	62

TABELA 25 – Análise da variância para as interações das reflectâncias médias correspondentes às diferentes estações do ano e comprimentos de onda (nm)..	65
TABELA 26 – Teste de Tukey a 95% de probabilidade, para as médias das reflectâncias nas diferentes estações do ano.....	66
TABELA 27 – Coeficientes de determinação para as equações geradas pelo método de regressão, no pacote estatístico “R”, sendo cada elemento dependente em função da reflectância, estação do ano e interação com comprimentos de onda. ....	69

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Espectro de reflectância de uma folha verde e sadia.....	27
FIGURA 2 – Localização da Fundação Estadual de Pesquisas Agropecuárias – FEPAGRO FLORESTAS, distrito Boca do Monte, Santa Maria, RS.....	33
FIGURA 3 – Localização ilustrativa das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> onde foi coletado material vegetativo do povoamento – FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS.....	37
FIGURA 4 – Processamento laboratorial com espectrorradiômetro, Laboratório de Sensoriamento Remoto – UFSM; “a” conjunto de aparelhos necessários para efetuar o processo de leituras (espectrorradiômetro modelo FieldSpec®, unidade detectora - pistola de mão); “b” calibração do aparelho para o alvo desejado no orifício paralelo ao feixe de luz; “c” leitura efetiva, no orifício perpendicular ao feixe de luz.....	39
FIGURA 5 – Teores de macro e micronutrientes para os quatro períodos de coletas de material vegetativo para <i>Eucalyptus grandis</i> , Santa Maria, RS.....	45
FIGURA 6 – Ilustração da resposta espectral média entre os quatro preparos de solo e as quatro estações do ano.....	54
FIGURA 7 – Variações do comportamento espectral médio para cada banda nas quatro estações do ano para cada preparo de solo em povoamento de <i>Eucalyptus grandis</i> .....	56
FIGURA 8 – Variações do comportamento espectral médio em cada banda nas quatro estações do ano para as diferentes posições de coleta do material vegetativo dentro das parcelas.....	61
FIGURA 9 – Gráfico do tipo <i>Boxplot</i> indicando as interações entre estações do ano, comprimento de onda e reflectância.....	65

FIGURA 10 – Teste Tukey a 95% de probabilidade, para as diferentes estações do ano.....	66
FIGURA 11 – Análise de resíduos segundo o método de distancias de Cook (1977), (a); gráfico normal com a probabilidade de resíduos (b); resíduos versus os comprimentos de onda (c).....	68

## **LISTA DE EQUAÇÕES**

EQUAÇÃO 1 – Equação do balanço da energia.....	25
--	----

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Gênero <i>Eucalyptus</i>.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Sensoriamento Remoto.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 Radiação eletromagnética e vegetação.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4 Avaliação nutricional em material vegetativo.....</b>	<b>28</b>
<b>2.5 Variações sazonais nas coletas de material vegetativo para análise de teores nutricionais.....</b>	<b>31</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Localização da área de estudo.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2 Descrição da área de estudo.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 Amostragem foliar.....</b>	<b>36</b>
<b>3.4 Processamento laboratorial com espectrorradiômetro FieldSpec®3 .....</b>	<b>38</b>
<b>3.5 Análise química do material vegetativo de <i>Eucalyptus grandis</i>.....</b>	<b>39</b>
<b>3.6 Avaliação nutricional em material vegetativo de <i>Eucalyptus grandis</i> com 20 e 44 meses de idade .....</b>	<b>40</b>
<b>3.7 Avaliações do comportamento espectral em povoamento de <i>Eucalyptus grandis</i> com 20 meses de idade.....</b>	<b>41</b>
<b>3.7.1 Análise de Componentes Principais .....</b>	<b>42</b>
<b>3.8 Estimar teores de macro e micronutrientes em folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> com 20 meses de idade, por espectrorradiometria em laboratório ...</b>	<b>42</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1 Conteúdo de nutrientes do material vegetativo para <i>Eucalyptus grandis</i> com 44 meses de idade.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2 Conteúdo de nutrientes do material vegetativo para <i>Eucalyptus grandis</i> com 20 meses de idade.....</b>	<b>49</b>

<b>4.3 Comportamento espectral em povoamento de <i>Eucalyptus grandis</i> com 20 meses de idade nas quatro estações do ano .....</b>	<b>53</b>
4.3.1 Resultados das interações entre as variáveis estações do ano, preparos de solo e as 12 bandas do espectro eletromagnético.....	54
4.3.2 Avaliações da reflectância para os períodos sazonais, posições de coleta das folhas e para as 12 bandas do espectro eletromagnético – plantio direto.....	59
4.3.3 Análise de Componentes Principais - ACP.....	62
<b>4.4 Estimativa de teores de macro e micronutrientes em folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> com 20 meses de idade, por espectrorradiometria em laboratório.....</b>	<b>64</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>72</b>
<b>6 RECOMENDAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>75</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A cobertura vegetal vem sendo estudada ao longo de séculos, segundo os mais diferentes níveis de abordagem, que incluem estudos taxonômicos, botânicos, fisiológicos, fitossociológicos e outros. Desde a descoberta de que os vegetais extraem da radiação eletromagnética emitida pelo Sol parte da energia de que necessitam para viver, a interação passou a ser estudada detalhadamente. Uma das ciências que mais contribuiu e ainda vem contribuindo e motivando o avanço nos conhecimentos de como a vegetação processa a radiação eletromagnética, é o Sensoriamento Remoto (PONZONI, 2001).

O Sol, como fonte de radiação eletromagnética, emite não somente luz visível, mas também radiação do ultravioleta e infravermelho de ondas curtas. A radiometria espectral é uma das mais importantes, senão a mais fundamental área do conhecimento do sensoriamento remoto. Isso porque é por meio das medidas radiométricas de laboratório ou de campo que se descobre com qual intensidade cada material, seja um solo, um tipo de rocha ou uma vegetação, reflete a radiação eletromagnética nos diferentes comprimentos de onda do espectro (MENEZES, 2001).

A medida espectralradiométrica feita em laboratório, sob condições controladas, resulta em valores de reflectância em cada comprimento de onda como função direta da composição química e física do objeto, o que permite ao pesquisador avaliar características da natureza do objeto (MENESES e MADEIRA NETTO, 2001).

Experimentos têm sido conduzidos em todo o mundo buscando caracterizar o comportamento espectral das partes ou todo das plantas, e conjunto de plantas (dosséis), com o objetivo de atender as necessidades específicas, desde um simples trabalho acadêmico, até a aquisição de dados compatíveis com modelos matemáticos destinados à previsão de fenômenos e/ou à estimativa de parâmetros biofísicos mediante o uso de dados orbitais (PONZONI, 2001).

Muitas vezes, esses estudos se concentraram em apenas alguns produtos químicos, como a clorofila (HABOUDANE et al., 2002; PEREIRA et al., 2001; MADEIRA et al. 2009) outros pigmentos (BLACKBURN, 1998) ou o nitrogênio

(EBBERS et al., 2002 e LILIENTHAL et al., 2000); e macronutrientes em Floresta Mista Montana (CANAVESI e KIRCHENER, 2005).

O teor de nitrogênio, que é relacionado ao funcionamento da clorofila, também pode ser previsto com bastante precisão (JOHNSON, 2001). A detecção de elementos de outros nutrientes e “oligoelementos” (fósforo, potássio, sódio, cálcio e magnésio) na vegetação fresca têm recebido menos atenção, embora Curran (1989) tenha realizado algumas pesquisas a esse respeito.

Segundo Canavesi e Kirchner (2005), há uma forte relação dos nutrientes com a reflectância das plantas. A deficiência mineral pode trazer alterações nas concentrações de clorofila e pode afetar também a estrutura interna das folhas. Essas modificações foliares são percebidas na resposta da vegetação no espectro eletromagnético.

Nas últimas décadas, os pesquisadores da área vêm buscando prever, através de modelos, exatamente como a energia radiante em comprimentos de onda específicos é refletida por uma determinada folha ou por certo dossel vegetal (JENSEN, 2009). A maioria dos modelos propostos para explicar a reflectância espectral de folhas considera uma série de fatores, leis e condições ideais (PONZONI, 2001).

Com o conhecimento da reflectância da energia eletromagnética realizada pela vegetação, o conhecimento da biomassa, do carbono fixado nos ecossistemas florestais e os teores de macro e micronutrientes torna-se necessário aperfeiçoar os métodos indiretos para gerar estimativas mais confiáveis.

Segundo Ferwerda e Skidmore (2007), a utilização de dados de sensoriamento remoto para detecção de nutrientes em vegetação tem sido desenvolvida, testada e tem tido sua eficácia comprovada. Embora este seja viável em projetos com muitas amostras para analisar, o potencial do sensoriamento remoto não é plenamente explorado.

O objetivo neste trabalho foi desenvolver estudos relacionando a espectrorradiometria de laboratório com os teores de macro e micronutrientes em material vegetativo de povoamentos florestais homogêneos, foram selecionadas como área de estudo, povoamentos florestais de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com diferentes idades em Santa Maria – RS.

Os objetivos específicos são – comportamento espectral:

1. avaliar os teores de macro e micronutrientes de folhas de *Eucalyptus grandis* com 20 e 44 meses de idade nas diferentes estações do ano e diferentes preparos de solo;
2. avaliar o comportamento espectral de folhas de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade abrangendo o intervalo de comprimento de onda de 475 a 980nm, e abordar as interações entre: os períodos sazonais, diferentes preparos de solos e a localização cardinal das árvores amostradas dentro dos tratamentos;
3. avaliar o estado nutricional de plantas jovens de *Eucalyptus grandis* por análise foliar e espectrorradiometria;
4. gerar equações capazes de estimar os teores de macro e micronutrientes a partir de dados de reflectância oriundos de folhas do povoamento de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Gênero *Eucalyptus*

Segundo Waugh (1998), as florestas australianas são dominadas por *Eucalyptus*. Existem cerca de 720 espécies reconhecidas do gênero, sendo que aproximadamente 250 delas são utilizadas para produtos de madeira. O gênero cobre cerca de 90% do território, cujas espécies estão distribuídas em florestas de zonas tropicais, zonas de clima mediterrâneo e algumas em zonas áridas (MARCHIORI, 1997).

Silva (2001) menciona que a espécie *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden ocorre naturalmente na Austrália, ao Norte do estado de New South Wales, entre as latitudes 25 e 33°S, e nas regiões Central (latitude de 21° S) e Norte (latitude 16 a 19° S) de Queensland, em áreas com altitude variando desde o nível do mar até 600 metros, na área de maior ocorrência, e de 500 a 1.100 metros de altitude nas áreas mais ao Norte (Atherton – QLD). A precipitação pluviométrica varia de 1.000 a 3.500 mm anuais, predominantemente no verão, e a estação seca raramente ultrapassa três meses.

Para Lorenzi et al. (2003) e a Sociedade Brasileira de Silvicultura (SBS, 2006), o *Eucalyptus grandis* pertence a família Myrtaceae e é conhecido popularmente como eucalipto-rosa; originário da Austrália, de tronco retilíneo, com casca pulverulenta que se desprende em tiras longas, deixando aparecer em baixo uma superfície lisa de cor branca acinzentada, esverdeada ou salmão, algumas vezes persistente na base. Possui ramagem longa e robusta, formando copa aberta ou alongada. Apresenta folhas juvenis opostas, depois alternas, oval-lanceoladas, pecioladas; as adultas são lanceoladas, verde-escuras, brilhantes, com ápice agudo e margens levemente onduladas. Ressaltam os autores que a espécie pode ser usada para reflorestamento e plantio em lugares inundados e para a fixação de barrancos de rios pelas raízes profundas que possui.

No Brasil, segundo Silva (2001) a introdução e a expansão da eucaliptocultura deve-se ao trabalho desenvolvido pelo Dr. Edmundo Navarro de Andrade e pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro. Trevisan (2006), Schenone (2000) e Wink (2009) relatam que o gênero *Eucalyptus* é atualmente uma das principais essências florestais encontradas no Brasil. Entre as folhosas, poderá ser a matéria-prima com

maior demanda no mercado, vindo a ser utilizada para atender diversos segmentos industriais e para confecção de múltiplos produtos de madeira, e não somente para a produção de celulose e papel, carvão, chapas de fibras e aglomerados.

Brown et al. (2000, apud MULLER, 2004), estima que, atualmente, uma área de aproximadamente 18 milhões de hectares no mundo seja plantada com eucalipto, sendo mais de 3 milhões de hectares desta área no Brasil. Segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia (2009), o Brasil tem a maior área plantada de eucaliptos do mundo, sendo o maior produtor mundial de celulose (cerca de 6,3 milhões de toneladas ano) e alcança o maior índice médio de produtividade ( $40\text{m}^3/\text{ha}/\text{ano}$ ).

## 2.2 Sensoriamento Remoto

O termo Sensoriamento Remoto surgiu no início dos anos 60, quando pesquisadores concluíram que a Fotogrametria, “arte ou ciência de obter medidas confiáveis por meio da fotografia” (AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 1952; 1966 apud JENSEN, 2009, p. 03), já não podia ser considerada o termo mais adequado a série de evoluções que aconteciam na área, como a expansão de pesquisas utilizando instrumentos além de câmeras e abrangendo regiões do espectro eletromagnético além do visível e do infravermelho próximo (JENSEN, 2009).

Colwell (1983, apud JENSEN 2009, p. 3), esclarece de onde veio a ciência Sensoriamento Remoto:

Vem de um artigo não publicado do começo dos anos 1960 feito pelo grupo do Office of Naval Research (ONG) Geography Branch, de Evelyn L. Pruitt. A fotointerpretação aérea tinha se tornado muito importante na II Guerra Mundial. A era espacial estava apenas começando com o lançamento do Sputnik (U.R.S.S) em 1957 e com a coleção de fotografias do então secreto programa CORONA iniciado em 1960. Além disso, o Grupo de Geografia do ONR estava expandindo suas pesquisas usando instrumentos além de câmeras e abrangendo regiões do espectro eletromagnético além do visível e do infravermelho próximo. Assim, ao final dos anos 1950 estava claro que o prefixo “foto” estava sendo muito forçado em vista do fato que a palavra raiz, fotografia, literalmente significa “escrever com luz (visível)”.

O sensoriamento remoto pode ser definido ainda como a ciência e a arte de se obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno, por meio da análise de dados adquiridos por um sistema que não está em contato com esse objeto, área ou

fenômeno sob investigação (LILLESAND e KIEFER, 1994; SOUZA et al., 1996; ROCHA, 2000; NOVO e PONZONI, 2001; SILVA, 2007). Também pode ser definido como sendo a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves, entre outros, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das informações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra, em suas mais diversas manifestações (NOVO, 2002; SILVA, 2007).

Para o sensoriamento remoto, a energia eletromagnética (REM) proveniente, na maioria das vezes do Sol, é a base de todos os princípios em que se fundamenta essa tecnologia. As ondas eletromagnéticas são do tipo transversal e não necessitam de um meio de propagação. Hoje se sabe que existem diversas denominações para as radiações eletromagnéticas, que variam de acordo com a frequência e o comprimento de onda (MOREIRA, 2005).

Segundo Silva (2007) e Rocha (2000), a REM é o meio através do qual a informação é transmitida do objeto ao sensor. A informação pode ser codificada em termos de frequência, intensidade e polarização da onda eletromagnética e de como esta se propaga à velocidade da luz: quanto maior sua frequência, menor seu comprimento de onda.

A espectrorradiometria de reflectância, de acordo com Meneses e Madeira Netto (2001), tem a função de medir, em diferentes comprimentos de onda, a energia eletromagnética refletida da superfície dos objetos e representá-la na forma de um gráfico, denominado curva de reflectância espectral.

Os sistemas sensores, para grande parte dos pesquisadores na área, como Moraes (2002), Silva (2007) e Jensen (2009), são divididos em: imageadores e não-imageadores. O sensor imageador é, conforme os autores, aquele que fornece como produto uma imagem do alvo observado. Já os sistemas não-imageadores, também denominados radiômetros, apresentam o resultado em forma de dígitos ou gráficos.

Os dados utilizados na espectrorradiometria são normalmente coletados em condições controladas de laboratório com total controle da intensidade e distribuição espectral da iluminação, bem como da visualização da geometria. A amostra geralmente tem sido preparada para melhorar a detecção da substância-alvo, segundo Tsai e Philpot (1998).

Salisbury e A'ria (1992 apud Zanini 2008), citam que estudos sobre espectrorradiometria demonstram que estudo de alvos a partir de sua resposta espectral podem ser realizados com espectrorradiômetros, sendo que estes, realizam ampla leitura do espectro com altíssima resolução.

Do ponto de vista de Steffen e Moraes (1993), para uma melhor caracterização do comportamento espectral de objetos, devem-se obter as medidas de reflectância em campo, preferencialmente sob as mesmas condições atmosféricas e de iluminação em que estes seriam imageados pelos sensores orbitais. Entretanto, devido à dificuldade de se obter tais condições técnicas para as medidas da reflectância espectral, utiliza-se uma grandeza equivalente denominada fator de reflectância. Esse fator é definido pela razão entre a radiância do alvo ( $L_a$ ) e a radiância de uma superfície lambertiana com reflectância conhecida ( $L_r$ ) nas mesmas condições de iluminação e observação (STEFFEN e MORAES, 1993). Assim como a reflectância, o fator de reflectância espectral depende das propriedades da amostra, da geometria de iluminação e observação e da faixa espectral de medição.

### **2.3 Radiação eletromagnética e vegetação**

Conforme Cardoso (1996), diferentes técnicas do sensoriamento remoto vêm sendo utilizadas na caracterização espectral da cobertura vegetal em diversos níveis de abordagem. Esses níveis incluem o estudo de dosséis e/ou de folhas isoladas (extraídas ou não).

Para Novo e Ponzoni (2001), a principal motivação dos estudos em vegetação envolvendo a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto, está na compreensão da “aparência” que uma dada cobertura vegetal assume em um determinado produto de sensoriamento remoto, a qual é fruto de um processo complexo que envolve muitos parâmetros e fatores ambientais.

A radiação solar que chega à superfície da terra, ao atingir as plantas, interage com estas e resulta em três frações, segundo Moreira (2005) e Sanches et al., (2003):

- Aproximadamente 50% do total da radiação que chega até o planeta é absorvida pelos pigmentos contidos na folha e participa na síntese de compostos ricos em energia (fotossíntese), altera estruturas moleculares

(fotoconversão), acelera reações, como a fotooxidação das xantofilas, ou ainda destrói estruturas de uma molécula.

- Outra parte é refletida pelas folhas, fenômeno denominado reflexão.
- A terceira parte sofre o processo de transmissão das camadas de folhas que compõem a copa e daquelas que constituem a folha, como a cutícula, o parênquima lacunoso e o paliçádico.

A *absorção* é o processo pelo qual a energia radiante é absorvida e convertida em outras formas de energia, isso pode ocorrer na atmosfera ou no terreno. Uma banda de absorção é o intervalo de comprimento de onda (ou frequência) do espectro eletromagnético no qual a energia radiante é absorvida por uma substância. A *reflectância* é o processo pelo qual a radiação “resvala” num objeto como o topo de uma nuvem, corpo d’água, ou um solo exposto (JENSEN, 2009).

Jensen (2009) explica que uma folha verde sadia intercepta o fluxo radiante incidente ( $\Phi_i$ ) direto proveniente do sol ou da radiação difusa espalhada sobre a folha. Essa energia eletromagnética interage com os pigmentos, água e espaços intercelulares internos à folha vegetal. A quantidade de fluxo radiante refletido da folha ( $\Phi_\rho$ ), a quantidade de fluxo radiante absorvido pela folha ( $\Phi_\alpha$ ) e a quantidade de fluxo radiante transmitido através da folha ( $\Phi_\tau$ ) podem ser cuidadosamente medidos se aplicarmos a equação do balanço de energia e continuarmos acompanhando o que acontece com toda a energia incidente. A equação geral para a interação do fluxo radiante espectral ( $\lambda$ ) sobre e dentro da folha é:

$$\Phi_{i\lambda} = \Phi_{\rho\lambda} + \Phi_{\alpha\lambda} + \Phi_{\tau\lambda} \quad (1)$$

Onde:  $\rho_\lambda$  é a reflectância hemisférica espectral da folha,  $\alpha_\lambda$  é a absorptância e  $\Phi_{\tau\lambda}$  é a transmitância hemisférica espectral pela folha.

Tanto para as folhas quanto para os dosséis, os padrões das curvas de refletância são bastante semelhantes, apenas com diferenças nos valores das intensidades (MENESES e MADEIRA NETTO, 2001).

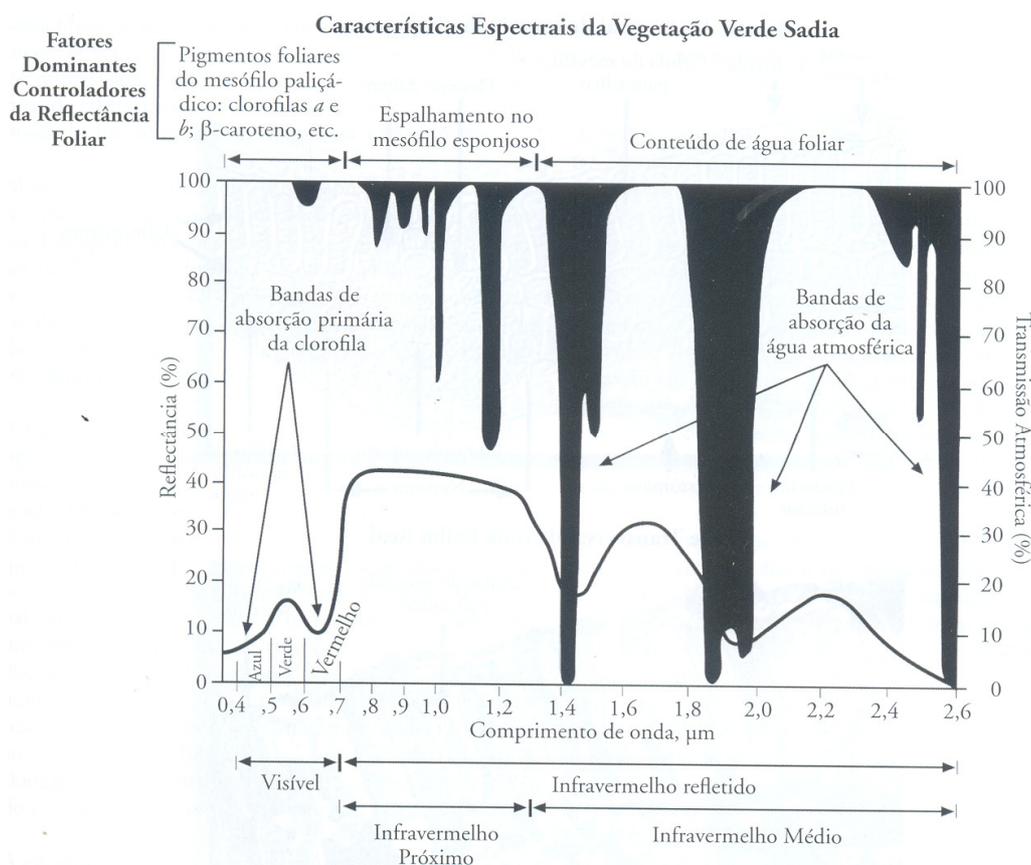
O comportamento espectral de uma folha é diferente quando comparado com o de uma floresta, devido à influência do solo, às alterações da vegetação e a fatores externos (de iluminação, meteorológicos). De um modo geral, a reflectância

espectral de folhas isoladas é superior àquela apresentada pelos dosséis (LILLESAND e KIEFER, 1994; SILVA e PONZONI, 1995).

Segundo Gates et al. (1965), são três os principais mecanismos que influenciam a quantidade de energia eletromagnética refletida pelas folhas: pigmentos, espaços ocupados pela água e pelo ar e estruturas celulares com dimensões do comprimento de onda da radiação incidente. Gausman (1985) comenta que, além desses três mecanismos, existem outros fatores que afetam a energia refletida pelas folhas, como conteúdo de água, maturação ou idade da folha, posição nodal, condição de iluminação (folhas expostas ao sol e folhas constantemente à sombra), pubescência e senescência foliar.

No comportamento espectral da vegetação, dentre as partes da planta, a folha é a que mais contribui para a reflexão a ser detectada pelos sensores, já que o comportamento espectral atua em função de sua composição química, morfológica e estrutura interna. Assim ocorrem diferenças no comportamento espectral entre grupos geneticamente diferentes, segundo afirmação de Watzlawick e Kirchner (2004). Em cada faixa do espectro eletromagnético a radiação eletromagnética interage com a vegetação de maneira diferenciada.

A reflectância espectral característica da folha vegetal verde sadia, para o intervalo de comprimento de onda entre 0,4 e 2,6  $\mu\text{m}$ , pode ser observada na Figura 1. Os fatores dominantes que controlam a reflectância foliar são os vários pigmentos foliares existentes no mesófilo paliçádico (por exemplo, as cloroficas a e b, e o  $\beta$ -caroteno), o espalhamento da energia infravermelha no mesófilo esponjoso e a quantidade de umidade na planta. As principais bandas de absorção pela clorofila ocorrem em 0,43 – 0,45  $\mu\text{m}$  e em 0,65 – 0,66  $\mu\text{m}$  na região do visível. As principais bandas de absorção pela água ocorrem em 0,97; 1,19; 1,45; 1,94 e 2,7  $\mu\text{m}$  (JENSEN, 2009).



**Figura 1 - Espectro de reflectância de uma folha verde e sadia.**

Fonte: Jensen (2009).

Szekiela (1988) comenta também que na região do visível fica compreendida a radiação eletromagnética da faixa espectral de 400 a 700  $\text{nm}$ , que está associada à presença de pigmentos dos cloroplastos, ocorrendo um pico de absorção na região do azul (400 a 500  $\text{nm}$  - ocorre a absorção por todos os pigmentos) e vermelho (600 a 700  $\text{nm}$  - corresponde à máxima absorção, apenas a clorofila absorve a radiação eletromagnética), devido à presença das clorofilas "a" e "b".

Chuvieco (1990) enumera alguns dos fatores externos que modificam o comportamento espectral da vegetação:

- a) Ângulo de iluminação solar, que depende da estação do ano.
- b) Modificações no relevo introduzem diferentes ângulos de iluminação.
- c) Influência da atmosfera, principalmente no que se refere à dispersão seletiva em distintos comprimentos de onda.
- d) Variações ambientais na cobertura, associação com outras coberturas, estados fenológicos diferentes.

- e) Ângulo de observação relacionado com a órbita do satélite, características do sensor e do momento de passagem do satélite.

Estudos envolvendo a reflectância espectral de dosséis têm sido na sua maioria, motivados pela necessidade de relacionar os níveis de cinza que definem os padrões existentes em fotografias aéreas e imagens orbitais de diferentes regiões espectrais, às diferentes tipologias florestais (MENESES e MADEIRA NETTO, 2001).

#### **2.4 Avaliação nutricional em material vegetativo**

Os nutrientes são elementos químicos que têm ampla variedade de papéis no metabolismo das plantas; sem eles, as plantas não podem sobreviver. As plantas retiram os nutrientes do solo através das raízes finas que estão localizadas nas extremidades do sistema radicular. Os nutrientes, para serem absorvidos pelas raízes finas devem estar dissolvidos na solução do solo que ocupa os espaços livres no solo (WEST, 2006).

O conteúdo dos elementos minerais dos tecidos vegetais é geralmente utilizado como critério para avaliar o estado de nutrição de plantas. Quando utilizadas técnicas suficientemente sensíveis para analisar os tecidos vegetais, é possível detectar a maioria dos elementos químicos da Tabela Periódica, porém, somente alguns são reconhecidamente essenciais (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Cl e Ni) para o desenvolvimento da maioria das espécies vegetais (EPSTEIN e BLOOM, 2006). A técnica de avaliação nutricional de tecidos vegetais foi primeiramente descrita por Lagatu e Maumere (1934 apud BELLOTE, 1990) e aplicada desde então, por diversos autores.

Para Malavolta et al. (1997), os nutrientes, segundo sua movimentação dentro da planta, são classificados em móveis, como é o caso do N, P, K, Mg, Mo e Cl; pouco móveis, como o S, Cu, Fe, Mn e Zn; e imóveis, caso do Ca e B, embora pesquisas mais recentes tenham comprovado que estes elementos apresentam uma certa mobilidade no interior das árvores.

Os conteúdos dos nutrientes identificados pela análise química de tecidos refletem o estado nutricional da planta e a fertilidade do solo, sendo uma ferramenta importante para avaliar e determinar as condições de crescimento de um povoamento florestal. As plantas apresentam sintomas visuais de deficiências

nutricionais comprovados nas análises, cujos resultados são comparados com teores obtidos em plantas com boas taxas de crescimento e sem sintomas visuais. Atualmente, são estabelecidos intervalos de teores de cada nutriente no tecido que indicam deficiência, suficiência ou excesso (GONÇALVES, 1995).

A planta retira nutrientes do ar, da água e do solo. O carbono vêm do ar, o hidrogênio vêm da água e o oxigênio da água e do ar. Os demais elementos vêm do solo, o que o torna de importância vital para as plantas, especialmente por ser o meio em que o homem consegue interferir, com adubações e correções de pH (MALAVOLTA, 1979).

Os nutrientes movimentam-se basicamente através de três ciclos: o ciclo geoquímico, caracterizado pela transferência dos nutrientes entre o ecossistema e seus componentes externos, envolvendo os processos de entrada e saída de nutrientes no ecossistema; o ciclo biogeoquímico, caracterizado pela movimentação dos nutrientes entre solo-vegetação e o ciclo bioquímico, caracterizado pela redistribuição interna na planta (SWITZER e NELSON, 1972; RAMEZOV, 1959 apud WITSCHORECK, 2008).

Para MALAVOLTA (1980), os macronutrientes representam estão presentes em maior ou menor proporção no solo, dependendo da composição e estrutura da rocha em que o solo foi originado, dos resíduos orgânicos presentes nesse solo, bem como do clima e topografia do terreno. Esses nutrientes são quantificados a partir de amostras destrutivas no campo.

Os ecossistemas florestais, naturais ou implantados, são sistemas abertos sujeitos a uma série de entradas e saídas de componentes inorgânicos e elementos químicos, muitos deles essenciais para o desenvolvimento das plantas (ODUM, 1988; PALLARDY, 2008).

Os nutrientes são constantemente ciclados entre a biomassa e o solo, sendo que o processo de ciclagem depende das propriedades físico-químicas dos nutrientes e da sua função fisiológica, mas principalmente, do ciclo hidrológico que mantém os processos de lixiviação do solo e da biomassa, da disponibilidade no solo e da taxa de intemperismo (FLINN et al., 1979).

O teor de nutrientes encontrados nas espécies e nos diversos componentes das plantas, com diferentes idades ou desenvolvidas em sítios distintos, pode ser muito variável. Diante disso, vários autores, com Simões et al. (1973), De Hoogh (1981), Binkley (1986), Gonçalves et al. (2000) e Schumacher et al. (2002),

salientam algumas considerações sobre o status nutricional das espécies em diversas condições, o que possibilita a melhor compreensão das faixas de nutrientes classificadas nos limites de controle, bem como indicar uma orientação para estudos futuros envolvendo a classificação de sítios e determinação de nutrientes em espécies florestais.

Para Kramer e Kozlowski (1972) as folhas geralmente armazenam maiores concentrações de elementos minerais que os demais componentes das árvores devido aos sais que tendem a concentrar-se em função do processo de evaporação. Isto pode explicar por que estes elementos apresentam grande facilidade de se movimentar dentro dos compartimentos das plantas, passando rapidamente dos tecidos mais velhos para os meristemas em atividade. O potássio, ao se movimentar vai catalisando as reações, mantendo e regulando o equilíbrio osmótico (CARNEIRO, 1995; BINKLEY, 1986).

Bellote e Silva (2000) confirmam que o compartimento composto pelas folhas é o que melhor reflete o estado nutricional das árvores, com correlação significativa entre a disponibilidade de nutrientes no solo e os seus teores nas folhas, relação esta que afeta a produtividade. Sendo assim, as folhas têm sido recomendadas e utilizadas no monitoramento nutricional para a maioria dos nutrientes.

Gonçalves et al. (2000) ressaltam que os teores de nutrientes são maiores nas partes metabolicamente mais ativas das plantas, como folhas e brotações, devido ao seu envolvimento em relações enzimáticas e compostos bioquímicos de transferência de energia e transporte eletrônico, enquanto as menores concentrações de micronutrientes são encontradas na madeira.

Atualmente, os resultados em análises de nutrientes dos componentes vegetais são determinados quantitativamente em concentrações ou teores dados em  $\text{g kg}^{-1}$  para macronutrientes e  $\text{mg kg}^{-1}$  para micronutrientes. A distribuição dos nutrientes em diversos componentes de uma árvore é muito variada, pois um tecido pode conter diversos teores de um nutriente em função da distribuição na planta. O conhecimento dessa distribuição pode contribuir para os estudos das espécies, a fim de suprir suas necessidades nutricionais, favorecendo um ciclo nutricional fechado e reduzindo a exportação de nutrientes (ROSSATO, 2006). Segundo Pallardy (2008), a quantidade de nutrientes nas plantas varia bastante em função da espécie e genótipo, idade da planta, sítio, época do ano e da parte da planta analisada.

Bellotte (1990) afirma que, para diferentes espécies em diferentes condições edafoclimáticas não existe um método específico estabelecido de amostragem em geral, e que em povoamentos homogêneos, a análise das folhas é frequentemente usada como método de pesquisa.

Os teores dos nutrientes nas árvores de uma mesma espécie variam com a qualidade do sítio, estação do ano, idade do povoamento, componente analisado, localização na copa e condições climáticas (BINKLEY, 1986), bem como com as atividades silviculturais realizadas, como adubações e tratamentos culturais. Como exemplo, Silveira et al. (2000) e Lamb, (1976), relatam que a concentração de nutrientes em *Eucalyptus* sp., principalmente nas folhas, é função de vários fatores, como: espécie em estudo, material genético, solo, clima, práticas culturais, doenças e pragas, posição da folha na copa e nos ramos.

De Hoogh (1981) relata que elementos como P, K, Ca e Mg mostram variações regulares de acordo com a posição das amostras de folhas na copa. O autor também destaca condições amostrais de umidade que influenciam na redução dos teores de N, P, zinco (Zn) e cobre (Cu) após uma seca severa.

Pereira et al. (1984), estudando a concentração e distribuição de nutrientes em *Eucalyptus grandis* em função da idade, concluíram que as maiores concentrações de nutrientes encontram-se nas folhas, com exceção do cálcio, cuja maior concentração está na casca.

Para a espécie *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd. os micronutrientes, com exceção do Cu no fruto e do B na casca, a folha é o componente que contém a maior concentração dos demais elementos. O nitrogênio, o fósforo e o potássio encontram-se em maior proporção nas folhas, nos frutos e também na casca e nas raízes, diminuindo sensivelmente seus teores na madeira e nos galhos (HOPPE, 2003).

## **2.5 Variações sazonais nas coletas de material vegetativo para análise de teores nutricionais**

Com relação à época do ano, as amostragens têm sido realizadas em diferentes períodos: verão chuvoso com alta umidade do solo; inverno chuvoso; inverno com baixa precipitação (baixa umidade do solo); na primavera com déficit hídrico. Essas pesquisas foram realizadas por diversos autores citados por Bellotte e

Silva, (2000) (BELLOTE, 1979; FELLER, 1980; LAMB, 1977; POGGIANI, 1985). Bellote (1990), em sua pesquisa realizou coletas de material vegetativo nas 4 estações climáticas; Bellote et al. (1980) estudaram a extração de nutrientes pelo *E. grandis* em função da idade no período da primavera; Valeri et al. (1993) realizaram suas coletas de material vegetativo nos períodos de inverno dos anos de 1983 e 1988 respectivamente.

Gonçalves et al. (2000) destacam os efeitos das variações sazonais em plantios de eucaliptos com diferentes idades, quando as plantas apresentaram sintomas de deficiência de enxofre, cálcio, boro e zinco no inverno, após um verão e outono quentes e chuvosos, com altas taxas de crescimento e demandas nutricionais. No inverno frio e seco, ocorreu redução da disponibilidade e absorção dos nutrientes, que foi retomada no fim da estação, quando ocorreram algumas semanas de temperaturas mais elevadas, desaparecendo, assim, os sintomas de deficiência.

Em relação à época de amostragem, são as flutuações climáticas sazonais as que mais influenciam as variações dos teores de nutrientes minerais nas folhas. É no período de maior temperatura ambiente e maior umidade no solo (verão/outono no Brasil) que são encontrados, para os macronutrientes, os maiores teores nas folhas e as menores variações na concentração de nutrientes entre repetições dentro de um mesmo tratamento. Os teores observados nessa época estão relacionados a uma maior atividade fisiológica das árvores e maior oferta de nutrientes do solo em função da presença de maior quantidade de água, que favorece a absorção de nutrientes pelas árvores (BELLOTE e SILVA, 2000).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização da área de estudo

A coleta de dados foi realizada em povoamentos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com diferentes idades, na área experimental da Fundação Estadual de Pesquisas Agropecuárias – FEPAGRO FLORESTAS – Centro de Pesquisas de Recursos Florestais. A FEPAGRO FLORESTAS possui uma área total de 542 hectares, e tem como objetivos a pesquisa florestal e o estudo da conservação de solos. O Centro de Pesquisa está sob domínio do poder público estadual, sendo vinculado à Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado do Rio Grande do Sul.

A FEPAGRO FLORESTAS situa-se no município de Santa Maria, Distrito de Boca do Monte, região da Depressão Central, no Estado do Rio Grande do Sul, nas coordenadas de 29°30' de latitude S 54°15' de longitude W de Greenwich (Figura 2), tendo uma altitude entre 90 e 135 metros.

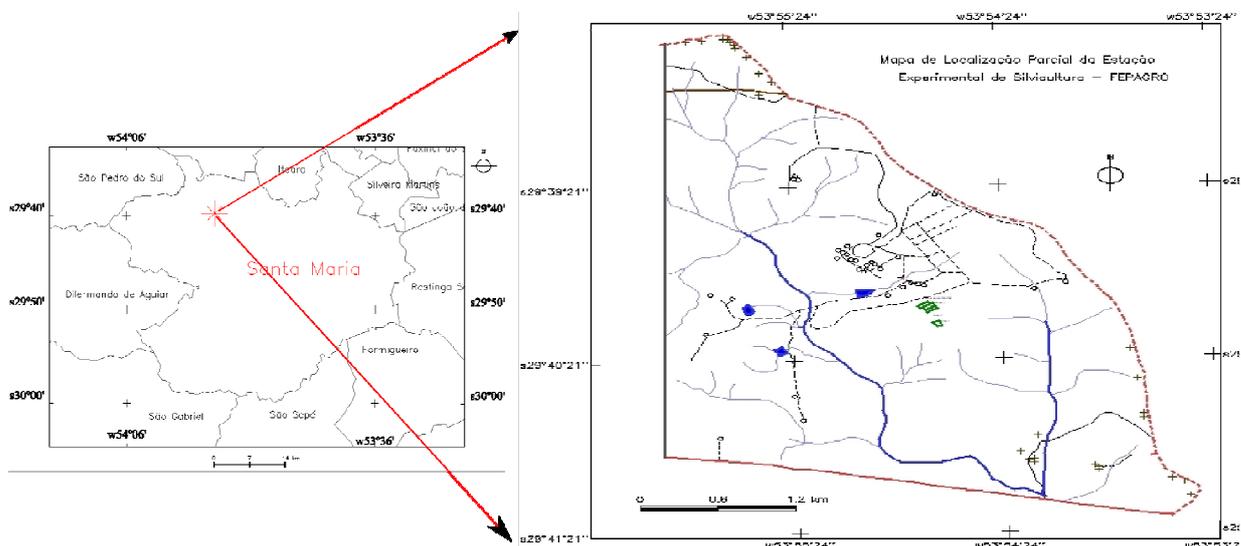


Figura 2 - Localização da Fundação Estadual de Pesquisas Agropecuárias – FEPAGRO FLORESTAS, distrito Boca do Monte, Santa Maria, RS.

### 3.2 Descrição da área de estudo

A unidade de relevo da área pertence à Depressão Periférica da Bacia do Paraná, que se entrepõe entre rochas efusivas e cristalinas constituídas pelas formações sedimentares Gonduânicas e modeladas pelos processos erosivos, não apresentando continuidade espacial e caracterizando um relevo suave ondulado a ondulado (ABRÃO et al., 1988; HERRMANN e ROSA, 1990). Para Kaul (1990), a região é constituída por arenito de granulação fina à média, sendo produto de vulcanismo ácido e básico.

O município de Santa Maria (RS) possui solos do tipo ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO Distrófico e solos hidromórficos (Planossolos e Gleissolos), Embrapa (2006).

O local de estudo – FEPAGRO FLORESTAS - é classificado como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico Arênico (EMBRAPA, 2006; STRECK et al., 2002), pertencente à Unidade de Mapeamento São Pedro. Essa unidade de mapeamento caracteriza-se por apresentar solos mediamente profundos, não hidromórficos e avermelhados, com textura superficial franco arenosa, friáveis e bem drenados, que possuem B textural. São solos ácidos e de baixos teores em matéria orgânica.

Segundo a classificação de Köppen, as características climáticas da região onde se situa a área de estudo enquadram-se na classificação do tipo "Cfa" (sub-tropical úmido). A temperatura média anual oscila em torno de 19,2°C. A precipitação média anual pode variar de 1.322 e 1.769 mm/ano (MORENO, 1961).

Neste município, ocorrem basicamente dois tipos de formações vegetais, os campos limpos e a Floresta Estacional Decidual Submontana, que cobre as escarpas da Serra Geral e vários morros testemunhos que são resquícios do planalto meridional, situados sobre região conhecida como Depressão Central (LEITE e KLEIN, 1990). A vegetação natural predominante na área experimental é a de campo, porém as matas nativas são representadas apenas por formações de galerias ao longo de cursos d'água (ABRÃO et al., 1988).

As atividades de pesquisa foram realizadas em duas áreas florestais de Eucalipto, cujas idades mencionadas, no momento do início da coleta de dados:

- Povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, com 44 meses (área 1);

- Povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, com aproximadamente 20 meses (área 2).

Buscando caracterizar quimicamente o solo da área em estudo, utilizou-se o trabalho de Wink (2009) que realizou coleta de solo em quatro trincheiras por tratamento, com 1,0 x 0,6 m e profundidade média de 1,3 m, localizadas na entrelinha de plantio. A localização das trincheiras nos povoamentos de 20 meses e 44 meses de idade foi realizada observando a proporcionalidade igualitária dos diâmetros a altura do peito das árvores vértices na trincheira e homogeneidade na densidade das plantas (efeito clareira). A profundidade das trincheiras variou de 1,15 a 1,40 m na área de 20 meses de idade; no povoamento com 44 meses de idade, essa profundidade variou de 1,15 a 1,30 m. Os perfis foram divididos em seis camadas, observando as características morfológicas como: cor, textura e consistência, medindo-se a profundidade de cada camada. Os solos amostrados apresentam uma baixa qualidade química, expressos pela baixa presença de elementos minerais, como cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) e potássio (K), presença de acidez expressa pelos baixos valores de pH e alta presença de alumínio (Al), Tabela 1.

**Tabela 1 – Caracterização química do solo dos povoamentos de *Eucalyptus* sp. com 20 meses (A1) e 44 meses (A2) de idade, FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS.**

Avaliação	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4		Camada 5		Camada 6	
	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2
pH – H <sub>2</sub> O	4,90	4,5	4,90	4,60	5,10	4,80	5,20	4,90	5,30	4,90	5,40	4,80
Al <sup>3+</sup> trocável	3,30	4,30	4,80	5,10	4,10	5,10	4,00	4,40	5,20	5,30	5,30	5,80
M.O	1,78	1,37	1,61	1,55	1,29	1,36	1,10	1,15	1,23	1,13	1,16	1,09
N <sub>total</sub>	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
P	2,02	2,03	0,95	1,33	0,55	0,64	0,48	0,47	0,45	0,40	0,34	0,37
K <sup>+</sup>	42,0	54,5	23,0	55,5	23,0	58,0	27,00	53,00	23,00	48,80	34,00	42,50
Ca <sup>++</sup>	2,70	1,10	3,20	2,10	4,10	2,90	4,80	3,50	6,20	5,30	6,90	6,10
Mg <sup>++</sup>	1,50	1,30	0,70	1,00	0,90	0,60	1,40	1,30	1,80	1,80	2,30	2,20
Mn	8,20	21,8	2,00	6,10	2,60	3,40	2,30	3,30	1,00	0,70	1,30	0,70
CTC <sub>pH 7.0</sub>	51,5	62,1	31,9	63,60	33,10	66,50	38,40	62,90	36,00	60,90	48,20	55,80
CTC <sub>efetiva</sub>	49,5	61,2	31,70	63,79	32,00	66,60	37,10	61,90	35,70	60,80	48,10	56,30

al<sup>3+</sup> trocável: cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; mo: matéria orgânica (%); n<sub>total</sub>: %; p<sup>-3</sup>: mg dm<sup>-3</sup>; k+: mg dm<sup>-3</sup>; ca<sup>++</sup>: cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; mg<sup>++</sup>: cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; mn<sup>++</sup>: mg dm<sup>-3</sup>. Modificado de WINK (2009).

O povoamento de *Eucalyptus grandis* com 44 meses de idade (área um), está implantado sob vegetação de campo nativo em topo de relevo, com área de 0,225 ha. O plantio foi realizado em outubro de 2004, sob espaçamento 3 m x 1,5 m, consistindo de 20 linhas com 25 plantas por linha, utilizando mudas produzidas no viveiro da FEPAGRO FLORESTAS. Anteriormente à implantação, foi realizada a roçada mecânica em toda a área e o preparo de solo somente na linha, utilizando

enxada rotativa acoplada ao trator em 15 cm de profundidade. Foram realizadas roçadas na entrelinha e combate a formigas nos primeiros seis meses, aplicação de herbicida em dezembro de 2004, não havendo adubação no momento do plantio. Não se verificou qualquer tipo de trato silvicultural, como desbaste ou desrama até a presente idade (WINK, 2009).

As informações referentes ao povoamento de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade (área dois) foram obtidas a partir da dissertação de Prevedello (2008), devido à área de pesquisa ter sido implantada por este pesquisador. O povoamento foi implantado em novembro de 2006, sobre área com vegetação de campo nativo, em planície suave do relevo, sob diferentes tipos de preparos de solo. Foram realizados antes da instalação das parcelas, a roçada mecânica em toda a área e o controle de formigas.

A área total do povoamento abrange 0,72 ha, representados por três blocos com quatro parcelas de 600 m<sup>2</sup> cada uma, correspondendo aos tratamentos de preparo do solo (na linha): plantio direto, escarificação, grade niveladora e enxada rotativa.

O plantio das mudas da área 2 foi realizado em 28 novembro de 2006, sob espaçamento 3 m x 2 m, com 100 plantas por parcela (10 linhas e 10 plantas por linha), utilizando mudas da Tecnoplanta Florestal Ltda. O replantio foi realizado no primeiro mês, em torno de 15%, e a adubação 30 dias após o plantio, utilizando a formulação 33-80-18 NPK, equivalendo em torno de 218 kg ha<sup>-1</sup>, conforme recomendação do CQFS-RS/SC.

### **3.3 Amostragem foliar**

Ponzoni (2002) menciona que para trabalhos de espectrorradiometria realizados em laboratório, comumente são consideradas as folhas, partes de plantas ou até alguns arranjos de plantas, dos quais são coletados dados radiométricos com o objetivo de caracterizar espectralmente fenômenos e/ou aspectos relacionados ao processo de interação entre a radiação eletromagnética e a vegetação. Assim, mediante a necessidade de avaliar também os teores nutricionais, foram coletadas folhas para as análises espectrorradiométricas.

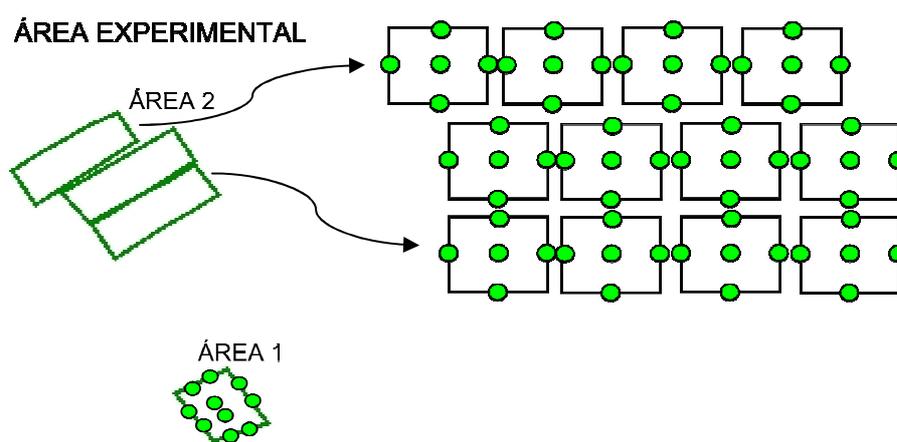
Na área 1, foram selecionadas duas árvores dominantes em cada posição cardinal (Norte, Sul, Leste e Oeste) mais a posição central do povoamento,

totalizando 10 árvores (Figura 3). Na área 2, foram selecionadas uma árvore dominante em cada posição cardinal mais a posição central de cada parcela, totalizando vinte árvores por bloco.

Para cada árvore selecionada, foram coletadas 40 folhas em cada tempo de estudo, sendo que destas 40, 15 foram utilizadas para leitura no espectrorradiômetro no primeiro momento (pegas de forma aleatória do conjunto de 40 folhas). Posteriormente, as 40 folhas formaram uma amostra composta para análise química.

As coletas foram realizadas nas quatro estações do ano, ou seja:

- T 1: coleta realizada no mês de maio de 2008, estação climática outono;
- T 2: coleta realizada no mês de agosto de 2008, estação climática inverno;
- T 3: coleta realizada no mês de outubro de 2008, estação climática primavera;
- T 4: coleta realizada no mês de fevereiro de 2009, estação climática verão.



**Figura 3 – Localização ilustrativa das árvores de *Eucalyptus grandis* onde foi coletado material vegetativo do povoamento – FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RS.**

A coleta das folhas para cada estação do ano ocorreu em um único dia, entre às 13:00 e às 15:00 horas. Após a coleta do material, as folhas foram embaladas em sacos plásticos devidamente identificados, e postas em caixa térmica hermeticamente fechada.

### 3.4 Processamento laboratorial com espectrorradiômetro FieldSpec®3

No Laboratório de Sensoriamento Remoto – CCR – UFSM, todo o material vegetativo coletado foi analisado com o espectrorradiômetro FieldSpec®3. Os procedimentos de leitura com o aparelho tiveram início 1 (uma) hora após o material vegetativo ter sido coletado.

O espectrorradiômetro realiza medições de irradiação e radiância solar, sendo um aparelho para uso no campo e em laboratório. Opera na faixa de 350 a 2.500 nm do espectro eletromagnético, além de possuir uma resolução espectral de 10 nm e capacidade de coletar até 10 espectros por segundo. A unidade detectora (denominada pistola de mão) está conectada ao instrumento por um cabo de fibra óptica de 1,2 m de comprimento e possui três sensores: uma malha de fotodiodo de 512 elementos e dois sensores resfriados termoeletricamente (fotodiodos InGaAs) conforme Analytical et al., (2005).

Os procedimentos de calibração e obtenção de respostas pelo sensor são descritos por Pacheco (2001) como sendo o ajuste do sistema sensor para que ele forneça respostas padronizadas, evitando que se obtenham respostas incoerentes. Se isto de fato ocorrer, tem-se a falsa impressão de serem alvos distintos entre si, quando na realidade são similares e guardam semelhanças em suas propriedades físicas.

No processamento das informações foram utilizados os seguintes aplicativos: RS<sup>3</sup> 16052 1 (software de interface com o usuário para aquisição e armazenamento de dados espectrais); ASD ViewSpecPro Versão 4.05 e Microsoft Office Excel 2003.

O processo utilizado na leitura do material vegetativo de *Eucalyptus grandis* no laboratório seguiu a sequência:

1. O espectrorradiômetro foi conectado à unidade RS3 (esfera integradora) para realização das leituras espectrais, e calibrado com material vegetativo a ser analisado posteriormente;
2. Cada folha foi posicionada no orifício da esfera, com sua face ventral voltada para o interior desta. Foram tomadas 10 leituras amostrais médias por segundo, para cada folha. Os espectros gerados foram transferidos para o microcomputador e gravados em arquivo, para que fossem processados posteriormente.

3. De posse desses valores, foram eliminados os ruídos (valores acima de 1) presentes nas amostras a partir da metodologia empregada por Moreira (2005), que consiste em substituir o valor “ruído” da radiância do *pixel* no local do ruído pela média da radiância dos *pixels* das linhas superior e inferior.

Os dados resultantes desse procedimento constituem um conjunto de arquivos contendo comprimento de onda e reflectância correspondente na amplitude de 350 nm a 2.500 nm.

Na Figura 4 é apresentado o espectrorradiômetro FieldSpec®3 e alguns procedimentos realizados para o processamento laboratorial das folhas de *E. grandis*.



(a)

(b)

(c)

**Figura 4** - Processamento laboratorial com espectrorradiômetro, Laboratório de Sensoriamento Remoto – UFSM; a - conjunto de aparelhos necessários para efetuar o processo de leituras (espectrorradiômetro modelo FieldSpec®, unidade detectora - pistola de mão); b – processo de calibração do aparelho para o alvo desejado no orifício paralelo ao feixe de luz; c – processo de leitura efetiva, no orifício perpendicular ao feixe de luz.

### 3.5 Análise química do material vegetativo de *Eucalyptus grandis*

Para a área 1 foram preparadas 2 amostras compostas com material vegetativo de 10 árvores por estação climática, e para a área 2 foi utilizado a amostra das 5 árvores de cada parcela em estudo, para cada estação climática.

O material amostrado foi acondicionado em sacos de papel, devidamente identificados e enviados ao Laboratório de Ecologia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria (RS). No laboratório, estes foram secos em estufa de renovação e circulação de ar a uma temperatura constante de 70°C até atingir o

peso constante. O material vegetal foi moído em moinho tipo Wiley com peneira de 20 mesh.

As determinações dos macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg e S, bem como as dos micronutrientes: B, Cu, Fe, Mn e Zn, foram realizadas segundo a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995) e Miyazawa et al. (1999), como é apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Descrição dos procedimentos analíticos utilizados na determinação dos macro e micronutrientes de tecido vegetal – UFSM.**

<b>Nutriente</b>	<b>Digestão</b>	<b>Método</b>	<b>Comprimento de onda (nm)</b>
<b>N</b>	Sulfúrica (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	Kjeldahl (Gerhardt Vapodest)	—
<b>Ca</b>	Nítrica-perclórica (HNO <sub>3</sub> +HClO <sub>4</sub> ) [3:1]	Espectrometria de absorção atômica (Perkin Elmer, Analyst, 200)	422,67
<b>Cu</b>			324,75
<b>Fe</b>			248,33
<b>Mg</b>			285,21
<b>Mn</b>			279,48
<b>Zn</b>			213,86
<b>K</b>		Fotometria de chama	-----
<b>P</b>	Espectrofotometria	660,00	
<b>S</b>	Turbidimetria	420,00	
<b>B</b>		Espectrofotometria	460,00

### **3.6 Avaliação nutricional em material vegetativo de *Eucalyptus grandis* com 20 e 44 meses de idade**

Para esta avaliação foi considerando a interação de dois fatores: período sazonal (F1 - outono, inverno, primavera, verão) e nutrientes (F2 - macro ou micronutrientes).

Os teores nutricionais, foram tabulados e analisados quanto à homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett, análise de variância (ANOVA) e teste de comparação de médias (Tukey) ao nível de 5% de probabilidade de erro. Os resultados obtidos foram relacionados com as estações climáticas em que as coletas de dados foram realizadas. Essas análises foram realizadas no software “ASSISTAT”, versão 7.5.

### 3.7 Avaliações do comportamento espectral em povoamento de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade

Para melhor entendimento do comportamento espectral em florestas plantadas com *Eucalyptus grandis* foram realizadas duas análises, geradas a partir de um experimento fatorial (3 fatores).

A primeira foi organizada de tal forma a apontar quais estações do ano (outono, inverno, primavera, verão) influenciam as reflectâncias obtidas nos diferentes preparos de solo (plantio direto, escarificação, grade niveladora, enxada rotativa).

A segunda avaliação foi gerada a partir dos resultados obtidos na primeira análise, onde foram utilizadas apenas os valores das reflectâncias oriundos do preparo de solo plantio direto. Avaliaram-se as interações entre as estações do ano, as posições em que as folhas foram coletadas (posições cardeais mais a árvore central de cada parcela).

Em ambas as análises foram considerados doze bandas dentro do espectro eletromagnético, abrangendo comprimentos de onda de 475 a 980 nm (Tabela 3). No Anexo 1 são apresentados os doze fragmentos do espectro (bandas) e como a vegetação se comporta nestes intervalos de comprimento de onda.

**Tabela 3 – Intervalos do espectro eletromagnético, utilizados para explicar o comportamento espectral de folhas de *Eucalyptus grandis* – FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria/RS.**

N° da Banda	Nome	Centro de $\lambda$ (nm)	Largura da $\lambda$ (nm)
1	Azul	490	30
2	Verde I	520	15
3	Verde II	550	25
4	Verde III	575	15
5	Vermelho I	660	20
6	Vermelho II	675	15
7	Vermelho Borda I	700	5
8	Vermelho Borda II	720	15
9	NIR	845	120
10	NIR Pico I	905	15
11	NIR Pico II	920	15
12	NIR sensível a umidade	975	10

Os dados foram tabulados e analisados quanto à homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett. Foi realizada a análise de variância (ANOVA) a

partir de experimento fatorial e teste de comparação de médias (Tukey) ao nível de 1% e 5% de probabilidade de erro (Anexos 2 e 3).

As análises de variância e diferenças entre médias, nas suas diferentes frações, foram realizadas no software “ASSISTAT”.

### 3.7.1 Análise de Componentes Principais

Com o objetivo de selecionar quais bandas expressam melhor a reflectância de folhas de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade, foi realizada a análise de componentes principais com os dados da reflectância, considerando doze fragmentos (bandas) dentro do espectro eletromagnético.

A análise de componentes principais (ACP) foi conduzida para os diferentes grupos de variáveis (12 bandas espectrais) e baseada na matriz de correlação dessas variáveis, com o uso do programa “ASSISTAT”. Para cada CP, foram obtidos os autovetores das variáveis e o diagrama de ordenação das bandas. Esses componentes podem ser vistos como “supervariáveis”, construídas pela combinação da correlação entre as variáveis e são extraídos em ordem decrescente de importância em termos de sua contribuição para a variação total dos dados.

Este método permite a redução da dimensionalidade dos pontos representativos das amostras, pois, embora a informação estatística presente nas n-variáveis originais seja a mesma dos n-componentes principais, é comum obter em apenas 2 ou 3 das primeiras componentes principais mais que 90% desta informação. A análise de componentes principais também pode ser usada para julgar a importância das próprias variáveis originais escolhidas, ou seja, as variáveis originais com maior peso na combinação linear dos primeiros componentes principais são as mais importantes do ponto de vista estatístico (MOITA e MOITA, 1999).

## **3.8 Estimar teores de macro e micronutrientes em folhas de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade, por espectrorradiometria em laboratório**

Foram desenvolvidas as análises estatísticas nos aplicativos “R” versão 2.10 e “SAS”, versão 8. Os dados de reflectância foram organizados de tal forma a se

obter valores médios para as diferentes estações do ano, considerando o intervalo de 350 a 2.500 nm.

No aplicativo “R”, foi aplicada à seguinte sequência metodológica nos dados de reflectância:

1. Média aritmética: foram determinados os fatores de reflectância médios para as quatro estações do ano.
2. Teste de Normalidade das observações: aplicou-se o teste de Shapiro-Wilksons para verificar a normalidade das observações nos diferentes tratamentos (medida de reflectância das folhas). Aceita a normalidade das observações se  $W > p\text{-value}$  ( $W > p$  valor tab).
3. Análise de variância (ANOVA): para verificar diferenças entre a variável reflectância nas diferentes estações do ano. Essa análise também foi realizada para as interações individuais para cada micro e macronutrientes em função das reflectâncias, estações do ano e comprimentos de onda.
4. Na ocorrência de um F calculado significativo ao nível de probabilidade determinado, aplicou-se o teste de comparações múltiplas de médias Tukey a 95% de nível de confiança, analisando em quais pares de estações climáticas ocorreram diferenças significativas na reflectância (sendo a variável reflectância dependente da estação do ano e do comprimento de onda) e em quais pares as diferenças foram maiores.
5. Foi calculada a análise dos resíduos, alavancagem e influência através do método de Cook (1977).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados estão dispostos conforme as análises foram geradas, primeiramente, é apresentado o conteúdo de nutrientes das folhas de *Eucalyptus grandis* com 44 meses de idade, logo na sequência o conteúdo de nutrientes das folhas de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade. Na sequência é apresentado o comportamento espectral em povoamento de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade, logo depois os resultados das interações entre as variáveis estações do ano, preparo de solo e as 12 bandas do espectro eletromagnético; também são apresentadas as avaliações da reflectância para os períodos sazonais, posições de coleta das folhas e para as 12 bandas do espectro eletromagnético – plantio direto. Para finalizar é apresentada a estimativa de teores de macro e micronutrientes em folhas de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade, por espectrorradiometria em laboratório.

### 4.1 Conteúdo de nutrientes das folhas de *Eucalyptus grandis* com 44 meses de idade

Na Tabela 4, é possível verificar os teores dos macro e micronutrientes das folhas de *Eucalyptus grandis* com 44 meses de idade, nas diferentes estações do ano.

**Tabela 4 – Médias dos teores de macronutrientes ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e micronutrientes ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), em folhas de *Eucalyptus grandis* com 44 meses de idade, Santa Maria, RS.**

Estações	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	$\text{g Kg}^{-1}$						$\text{mg kg}^{-1}$				
<b>Outono</b>	19,98	1,08	9,12	8,93	2,41	1,33	17,44	5,74	56,94	1401,50	14,18
<b>Inverno</b>	20,56	0,99	9,60	3,70	2,72	1,01	26,01	8,80	77,68	1830,01	16,04
<b>Primavera</b>	19,02	1,14	7,23	13,56	2,10	0,98	17,48	9,78	82,15	1691,85	21,06
<b>Verão</b>	16,49	1,02	8,85	7,39	2,67	0,92	25,15	6,01	77,49	534,05	13,52

Os teores apresentados na Tabela 4, foram dispostos em gráficos, e encontram-se na Figura 5, onde é possível perceber que os teores dos macronutrientes, P, Mg e S e dos micronutrientes B, Cu, Fe e Zn possuem valores próximos nas diferentes estações do ano, apontando assim, a não ocorrência de mudanças nutricionais. Já os macronutrientes Ca, N, e K e o micronutriente Mn

apresentam teores variando de acordo com os diferentes períodos sazonais em que foram efetuadas as coletas.

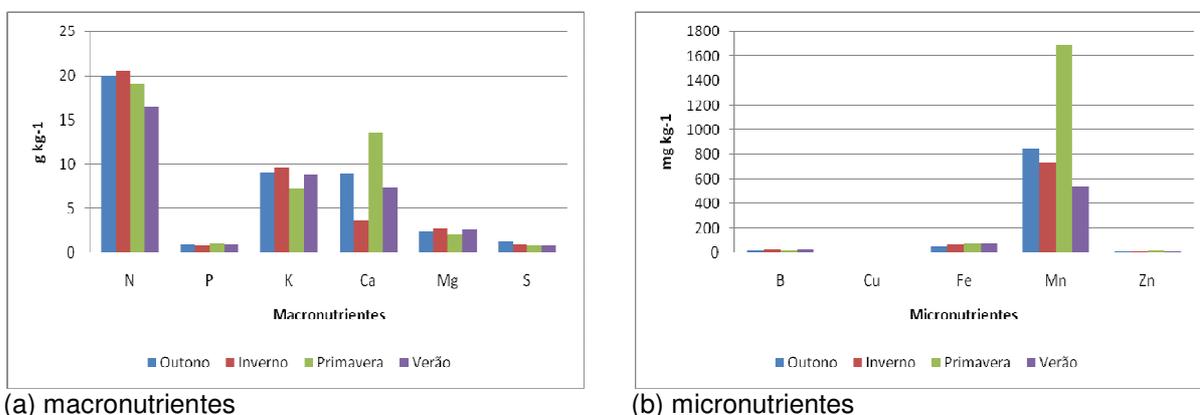


Figura 5 – Teores de macro e micronutrientes para os quatro períodos de coletas de material vegetativo para *Eucalyptus grandis*, Santa Maria, RS.

Em estudos objetivando avaliar o estado nutricional de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, cujas idades variavam de 1 a 5 anos, Silveira et al. (1998), estabeleceram faixas de concentrações de macro ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e micronutrientes ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) para interpretação de análise foliar (Tabela 5).

Tabela 5 – Faixas de concentração para os teores de macro e micronutrientes em folhas de *Eucalyptus sp.*

Macronutriente ( $\text{g kg}^{-1}$ )			Micronutriente ( $\text{mg kg}^{-1}$ )		
Elemento	FA	FD	Elemento	FA	FD
N	22,0-27,0	< 16	B	34,0 – 44,0	< 21
P	1,7 - 2,2	< 1,1	Cu	6,0 – 7,0	< 4
K	8,5 - 9,0	< 7,0	Fe	65,0 – 125,0	-
Ca	7,1 - 11	< 5,5	Mn	200,0 – 840,0	-
Mg	2,5 - 2,8	< 2,1	Zn	15,0 – 20,0	< 7
S	1,5 - 2,1	< 1,3			

Onde: FA= Faixa adequada dos teores de nutrientes em folhas de *Eucalyptus sp.* FD= Faixa de deficiência (elemento encontra-se com teor abaixo do necessário), segundo Silveira et al. (1998).

Observando as concentrações indicadas por Silveira et al. (1998), o N apresentou valor inferior ao recomendado, porém não se encontra na faixa de deficiência. O P apresenta valor abaixo do teor recomendado e a área apresenta deficiência deste elemento. O mesmo ocorrendo para S. Os elementos K, Ca e Mg resultaram em valores dentro dos teores recomendados. Para os micronutrientes, o B apresenta-se com teor deficiente. Cu e Mn apresentam teores acima do recomendado. Os elementos Fe e Zn tiveram valores dentro do intervalo mencionado pelos autores.

Ao avaliar estatisticamente as informações (*Eucalyptus grandis*, aos 44 meses), obtiveram-se resultados significativos ao nível de 5% de probabilidade para o primeiro fator (estações climáticas). Já para o fator 2 (macronutrientes) os resultados foram significativos ao nível de 1% de probabilidade. O mesmo foi obtido para a interação entre os fatores 1 e 2 (Tabela 6).

**Tabela 6 - Análise de variância (experimento fatorial) para conteúdo de macronutrientes em *Eucalyptus grandis* com 44 meses de idade.**

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
<b>Período sazonal (F1)</b>	3	10.45777	3.48592	4.0404 *
<b>Macronutriente (F2)</b>	5	1919.39690	383.87938	444.9421 **
<b>Int. F1xF2</b>	15	116.10915	7.74061	8.9719 **
<b>Tratamentos</b>	23	2045.96383	88.95495	103.1048 **
<b>Resíduo</b>	24	20.70630	0.86276	
<b>Total</b>	47	2066.67013		

\*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \*significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 = p < .05$ ); ns não significativo ( $p \geq .05$ )

Para comprovar os resultados mencionados na Tabela 6, foi efetuado o teste de Tukey (Tabela 7). Para o fator período sazonal, o teste apontou diferenças significativas entre as estações climáticas, porém nenhuma das médias é totalmente diferente, as estações outono, inverno e primavera apontaram semelhanças; o mesmo ocorre para as médias das estações outono, inverno e verão.

**Tabela 7 - Teste de Tukey para as médias dos teores de macronutrientes em *Eucalyptus grandis* com 44 meses de idade.**

	Período sazonal		Macronutriente g kg <sup>-1</sup>		
	<b>Outono</b>	7,14	ab	<b>N</b>	19,01
<b>Inverno</b>	6,43	ab	<b>P</b>	1,05	c
<b>Primavera</b>	7,34	a	<b>K</b>	8,70	b
<b>Verão</b>	6,22	b	<b>Ca</b>	8,39	b
			<b>Mg</b>	2,47	c
			<b>S</b>	1,05	c

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de comparação de médias de Tukey a 95% de probabilidade de confiança.

Quando avaliadas as médias para os teores de macronutrientes, vê-se que a média do elemento nitrogênio difere das demais, pois seu metabolismo é mais ativo. Já as médias dos elementos P, Mg e S não diferem entre si e o mesmo ocorre para as médias dos elementos K e Ca. Ao avaliar as interações entre os fatores 1 e 2 (Tabela 8) individualmente, observa-se que o elemento nitrogênio apresenta comportamento semelhante nas estações outono, inverno e primavera, o mesmo ocorre para as estações primavera e verão. Outro elemento que apresentou

interação foi o Ca, variando no inverno, na primavera e tendo valores semelhantes no outono e verão. Quando avaliados os elementos em cada estação observa-se que no outono apenas o N apresentou média com diferença significativa. No inverno os elementos N e K diferiram entre si; na primavera, os elementos N, K e Ca apresentaram médias com diferenças significativas; e no verão obteve-se a mesma resultante que no outono.

**Tabela 8 – Interação entre os teores de macronutrientes e as estações sazonais em folhas de *Eucalyptus grandis* com 44 meses de idade.**

Período sazonal	Macronutriente					
	N	P	K	Ca	Mg	S
<b>Outono</b>	19,97 aA	1,07 aC	9,12 aB	8,92 bB	2,41 aC	1,32 aC
<b>Inverno</b>	20,56 aA	0,98 aC	9,60 aB	3,69 cC	2,72 aC	1,00 aC
<b>Primavera</b>	19,015 abA	1,14 aD	7,22 aC	13,56 aB	2,10 aD	0,97 aD
<b>Verão</b>	16,49 bA	1,02 aC	8,85 aB	7,39 bB	2,67 aC	0,92 aC

\*Teste Tukey a 95% de probabilidade; Para colunas = Classificação c/letras minúsculas; Para linhas = Classificação c/letras maiúsculas

Na Tabela 9, é apresentada a ANOVA para os teores de micronutrientes, onde obtiveram-se valores apontando não significância para o fator 1 (período sazonal) e a mesma situação para a interação entre fator 1 e fator 2. Para o fator 2 (micronutrientes), apresentou resultado significativo para F a 1% de probabilidade.

**Tabela 9 - Análise da variância para um experimento fatorial para teores de micronutrientes *Eucalyptus grandis* com 44 meses de idade.**

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
<b>Período sazonal (F1)</b>	3	318893.11555	106297.70518	1.3412 ns
<b>Micronutriente (F2)</b>	4	5461668.27084	1365417.06771	17.2280 **
<b>Int. F1x F2</b>	12	1244473.64063	103706.13672	1.3085 ns
<b>Tratamentos</b>	19	7025035.02701	369738.68563	4.6651 **
<b>Resíduo</b>	20	1585116.01810	79255.80090	
<b>Total</b>	39	8610151.04511		

\*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \*significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ ); ns não significativo ( $p \geq .05$ )

A partir do teste de comparação de médias para o fator 2 (teores de micronutrientes), a média do elemento Mn difere das demais. Haag et al. (1976), obtiveram valores altos para Mn nas folhas, de eucalipto. Níveis altos de Mn nas plantas, segundo os autores estão associados a solos de acidez elevada. Silveira et al. (2000) relatam que a toxicidade mais encontrada na área florestal tem sido a de Mn, tanto em condições de viveiro como em jardim clonal e campo.

Os sintomas de deficiências nutricionais mais comuns nos plantios de eucalipto têm sido os de K, P e B. Algumas deficiências nutricionais podem afetar a

qualidade do produto final, a predisposição às doenças, pragas e estresse hídrico (SILVEIRA et al., 2000).

Outros autores mencionam valores obtidos ou adequados para os teores dos nutrientes. Para Gonçalves et al. (2000), por exemplo, em folhas de *Eucalyptus grandis*, com oito anos de idade, encontrou-se concentração média de 18,3 g kg<sup>-1</sup> de N; 0,6 de P; 9,7 de K; 4,3 de Ca; 2,8 de Mg; 22 mg kg<sup>-1</sup> de B; 7 de Cu; 160 de Fe; 530 de Mn e 23 de Zn.

Para Gonçalves (1995), os teores considerados adequados para as folhas de *Eucalyptus* sp. são descritos como de 13 a 18 g kg<sup>-1</sup> para N; de 0,9 a 1,3 g kg<sup>-1</sup> para P; de 9 a 13 g kg<sup>-1</sup> para K; de 6 a 10 g kg<sup>-1</sup> para Ca; de 3,5 a 5 g kg<sup>-1</sup> para Mg; e de 1,5 a 2 g kg<sup>-1</sup> para S. Os micronutrientes variam de 30 a 50 mg kg<sup>-1</sup> para B; de 35 a 50 para Zn; de 150 a 200 para F; de 400 a 600 para Mn e de 7 a 110 mg kg<sup>-1</sup> para Cu.

As recomendações a seguir são estruturadas por diversos autores citados por Bellote (1990). Segundo este, para folhas de *Eucalyptus grandis*, a quantidade considerada ótima para o elemento N é de 22,2 g kg<sup>-1</sup>; já um teor de 11,5 g kg<sup>-1</sup> ou menos, mostram sintomas de deficiência de nitrogênio (KAUL et al., 1968 e HAAG et al., 1961). Para o teor de fósforo, um índice inferior a 1,1 g kg<sup>-1</sup> na folha é considerado crítico; enquanto o ótimo está entre 1,5 e 1,8 g kg<sup>-1</sup> (SCHÖNAU e HERBERT, 1983; LACEY et al., 1966). O teor de potássio abaixo de 4 g kg<sup>-1</sup> gera deficiências; um valor suficiente é de 6,6 g kg<sup>-1</sup> (KAUL et al., 1968; BELLOTE, 1979). Porém, Bellote (1990) menciona que os intervalos a seguir, para os macronutrientes (g kg<sup>-1</sup>), abrangem as variações de todo o Brasil: N variando de 8,1 a 23,0; P oscilando de 0,7 a 1,3; K de 3,8 a 11,4; Ca de 3,8 a 15,1; Mg de 1,2 a 3,4 e S de 1,6 a 2,6.

Assim como os macronutrientes, também os micronutrientes mostram grande oscilação em seus níveis. Bellote (1990) cita os teores máximos e mínimos para os elementos (mg kg<sup>-1</sup>): para o B os teores são de 12 a 104; para Cu, os teores oscilam de 3 a 26; para o ferro, os teores variam de 62 a 491; para Mn, as oscilações são bem significativas, de 151 a 2.875; e para o Zinco de 2 até 39.

A título de comparação, Bellote (1979) observou em povoamentos de *E. grandis* com 2 e 7 anos, respectivamente, os seguintes teores de micronutrientes nas folhas: 336 mg kg<sup>-1</sup> e 400 mg kg<sup>-1</sup> de Mn; 183 mg kg<sup>-1</sup> e 182 mg kg<sup>-1</sup> de Fe; 15,5 mg kg<sup>-1</sup> e 12,5 mg kg<sup>-1</sup> de Zn e 7,8 mg kg<sup>-1</sup> e 5,2 mg kg<sup>-1</sup> de Cu.

Na África do Sul, em estudo desenvolvido por Schonau (1983), foram obtidas as seguintes variações de micronutrientes em povoamentos de *E. grandis*: 129 a 2864 mg kg<sup>-1</sup> de Mn; 62 a 251 mg kg<sup>-1</sup> de Fe, 14 a 31 mg kg<sup>-1</sup> de Zn e 3 a 26 mg kg<sup>-1</sup> de Cu, sendo que os teores ótimos para o desenvolvimento da espécie são: baixo para Mn, inferior a 100 mg kg<sup>-1</sup> para Fe, inferior a 20 mg kg<sup>-1</sup> para Zn e inferior a 18 mg kg<sup>-1</sup> para Cu.

#### 4.2 Conteúdo de nutrientes de folhas de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade

Na Tabela 10, é possível verificar os valores médios obtidos para os teores de macro e micronutrientes nas folhas de *Eucalyptus grandis* aos 20 meses. A tabela corresponde aos três blocos, e está estruturada de acordo com as estações climáticas.

Seguindo as concentrações dos autores acima, o elemento N apresentou valor inferior ao recomendado, todavia não se encontra na faixa de carência. O elemento P apresenta valor abaixo do teor recomendado e a área apresenta deficiência desse elemento. O mesmo ocorre para o elemento S. Os elementos K, Ca e Mg resultaram em valores dentro dos teores recomendados. Para os micronutrientes, o elemento B apresenta-se com teor deficiente para essa área; já os elementos Cu e Mn apresentam teores acima do recomendado. Os elementos Fe e Zn tiveram valores dentro do intervalo mencionado pelos autores.

**Tabela 10 – Médias dos teores de macronutrientes (g kg<sup>-1</sup>) e micronutrientes (mg kg<sup>-1</sup>) para *Eucalyptus grandis* aos 20 meses de idade.**

Tempos	Bloco	g Kg <sup>-1</sup>						mg kg <sup>-1</sup>				
		N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Outono	I	21,56	1,18	8,45	11,13	2,34	1,16	16,68	10,00	76,59	1616,86	19,68
	II	21,76	1,20	8,12	12,57	2,32	1,24	16,61	9,59	83,24	1515,83	17,35
	III	20,05	1,15	7,76	12,15	2,38	1,17	18,74	7,79	75,44	1682,69	16,11
Inverno	I	21,74	1,18	9,21	8,49	2,24	1,20	15,35	7,07	59,35	1247,54	17,71
	II	22,06	1,14	8,29	11,98	2,56	1,36	23,97	9,30	71,00	1425,31	16,64
	III	20,39	1,15	8,54	11,49	2,11	1,12	22,05	8,52	89,44	2026,41	16,30
Primavera	I	22,59	1,12	7,98	12,90	2,04	1,22	19,75	8,29	78,06	1642,52	17,75
	II	21,66	1,20	9,15	13,35	2,29	1,21	18,76	8,49	81,95	2040,05	17,95
	III	22,74	1,23	8,71	12,42	2,29	1,19	24,33	8,60	85,08	1886,01	16,72
Verão	I	21,91	1,22	8,32	10,24	2,05	1,14	16,48	8,39	71,58	1582,20	17,60
	II	22,57	1,11	8,01	13,69	2,22	1,49	22,21	9,37	70,57	1754,60	15,59
	III	22,78	1,15	8,64	14,80	2,57	1,30	24,23	8,07	75,37	1804,03	16,98

Na análise de variâncias (ANOVA – Tabela 11) para os macronutrientes foram obtidos resultados para os fatores isolados e também para a interação destes. Os resultados referentes ao preparo do solo (F1) não apresentaram diferenças significativas, tanto para ao nível de 1% como para o de 5% de probabilidade. As estações climáticas (F2) e suas repetições, apresentaram diferenças estatísticas significativas ao nível de 1% ( $p < .01$ ) de probabilidade.

**Tabela 11 - ANOVA para teores de macronutrientes, em *Eucalyptus grandis* com relação aos fatores: preparo de solo, período sazonal, macronutrientes e suas interações.**

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Preparo de solo (F1)	3	11.91249	3.97083	1.7188 ns
Período sazonal (F2)	3	93.55776	31.18592	13.4987 **
Macronutrientes (F3)	5	15889.47210	3177.89442	1375.5363 **
Int. F1xF2	9	21.86086	2.42898	1.0514 ns
Int. F1xF3	15	37.35931	2.49062	1.0781 ns
Int. F2xF3	15	526.84209	35.12281	15.2027 **
Int.F1x2x3	45	79.62554	1.76946	0.7659 ns
Tratamentos	95	16660.63015	175.37505	75.9103 **
Blocos	2	13.65273	6.82636	2.9548 ns
Resíduo	190	438.95601	2.31029	
<b>Total</b>	<b>287</b>	<b>17113.23889</b>		

\*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \*significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 = < p < .05$ ); ns não significativo ( $p \geq .05$ )

Entre as interações realizadas, foi constatada diferença significativa apenas para o par F2 x F3, ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ). Na comparação dos resultados mencionados acima, o teste de médias Tukey (Tabela 12), para os períodos sazonais, apontou diferenças significativas, o inverno foi a estação que diferiu das demais. O outono e a primavera apresentaram comportamentos nutricionais semelhantes e não diferem estatisticamente entre si. O mesmo ocorreu entre as estações primavera e verão.

**Tabela 12 - Resultado do teste de comparação de médias para *Eucalyptus grandis* considerando as quatro estações do ano e os macronutrientes.**

	Período sazonal		Macronutrientes g kg <sup>-1</sup>		
Outono	7,07	c	<b>N</b>	21,82	a
Inverno	8,65	a	<b>P</b>	1,17	e
Primavera	7,62	bc	<b>K</b>	8,43	c
Verão	7,88	b	<b>Ca</b>	11,89	b
			<b>Mg</b>	2,29	d
			<b>S</b>	1,23	e

Na avaliação das médias para o fator macronutrientes, os resultados apontaram diferenças significativas entre essas médias, as quais correspondem aos

nutrientes N, K, Ca, e Mg. Os elementos P e S não apresentaram diferenças significativas entre si, mas possuem médias distintas das demais.

Quando avaliadas as médias das interações (Tabela 13) relacionando cada elemento nos quatro períodos sazonais, é visto que o elemento nitrogênio apresentou diferença significativa em comparação com as demais médias no período do inverno. Outro elemento que apontou alterações na estação inverno foi o Ca, que diferiu no outono. Os demais elementos não apresentaram diferenças significativas nos períodos sazonais.

**Tabela 13 - Resultado do teste de comparação de médias para *Eucalyptus grandis*, considerando a interação entre as quatro estações do ano e os macronutrientes.**

Período sazonal	Macronutrientes g kg <sup>-1</sup>					
	N	P	K	Ca	Mg	S
<b>Outono</b>	19,56 bA	1,14 aC	9,10 aB	9,14 cB	2,14 aC	1,33 aC
<b>Inverno</b>	27,03 aA	1,22 aD	8,57 aC	11,43 bB	2,16 aD	1,51 aD
<b>Primavera</b>	19,65 bA	1,17 aD	8,19 aC	13,51 aB	2,20 aD	1,01 aD
<b>Verão</b>	21,03 bA	1,13 aD	7,86 aC	13,48 aB	2,69 aD	1,08 aD

\*Teste Tukey a 5% de probabilidade; Para colunas = Classificação c/letras minúsculas; Para linhas= Classificação c/letras maiúsculas

Quando avaliados os resultados da interação na linha, ou seja, como cada elemento se comporta em determinada estação climática, os resultados obtidos foram os seguintes: no outono, percebe-se que o elemento a ter diferença significativa apontado pelo teste de médias foi o nitrogênio; quando avaliada a estação inverno, os elementos N, K e Ca apresentaram médias diferindo entre si, o que também aconteceu para as estações primavera e verão.

Na Tabela 14, é apresentada a ANOVA para os micronutrientes em *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade. Obtiveram-se valores que apontam a não significância entre os valores do F1 (preparo do solo). Porém para estação climática (F2) apresentou resultado significativo para F a 5% de probabilidade, enquanto que o F3 (micronutrientes) apresentou valores para F significativos ao nível de 1% de probabilidade.

Do mesmo modo, quando analisada as interações entre os fatores 1 e 2, se avaliados em conjunto, não apresentam diferença significativa entre si; a interação entre F1 e F3 também não apresenta significância ao nível de 5% de probabilidade. Já na interação entre os fatores 2 e 3, existe diferença significativa entre eles, ao nível de 1% de probabilidade.

**Tabela 14 - Análise da variância para um experimento fatorial para os teores de micronutrientes em *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade.**

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Preparo de solo (F1)	3	221547.49659	73849.16553	1.6188 ns
Período sazonal (F2)	3	474623.09696	158207.69899	3.4681 *
Micronutrientes (F3)	4	101596895.7314	25399223.9329	556.7741 **
Int. F1xF2	9	300815.58516	33423.95391	0.7327 ns
Int. F1xF3	12	844647.83905	70387.31992	1.5430 ns
Int. F2xF3	12	1954776.67649	162898.05637	3.5709 **
Int.F1x2x3	36	1186698.54561	32963.84849	0.7226 ns
Tratamentos	79	106580004.9713	1349113.98698	29.5738 **
Blocos	2	298444.99251	149222.49626	3.2711 *
Resíduo	158	7207729.99869	45618.54430	
<b>Total</b>	<b>239</b>	<b>114086179.9625</b>		

\*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \*significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ ); ns não significativo ( $p \geq .05$ )

A partir dos resultados citados na Tabela 14, foi efetuado o teste de Tukey (Tabela 15) para verificar entre as médias, se uma ou mais estavam significativamente diferentes. Quando avaliada a média dos blocos, observa-se que o bloco 1 e o bloco 2 não apresentam diferença significativa entre si; os blocos 2 e 3 também apresentam valores médios semelhantes sem apontar diferenças significativas.

**Tabela 15 - Resultado do teste de comparação de médias para a área 2 considerando as quatro estações do ano e os micronutrientes.**

Período sazonal			Micronutrientes mg kg <sup>-1</sup>		
<b>Outono</b>	343,24	ab	<b>B</b>	19,88	b
<b>Inverno</b>	381,19	ab	<b>Cu</b>	8,62	b
<b>Primavera</b>	408,29	a	<b>Fe</b>	76,47	b
<b>Verão</b>	289,82	b	<b>Mn</b>	1656,01	a
			<b>Zn</b>	17,20	b

Ainda na Tabela 15, quando analisado o fator período sazonal isoladamente, as médias das estações climáticas outono, inverno e primavera apresentam semelhanças, diferindo apenas das do verão. Contudo, o verão apresenta média semelhante à do outono e a do inverno, diferindo apenas da primavera. Para o fator 3, a média que diferiu estatisticamente foi do elemento Manganês. Os demais elementos apresentam médias semelhantes entre si.

Ao avaliar as interações entre os fatores 2 e 3, observou-se que o único nutriente a apresentar diferença dos demais foi o manganês, o qual diferiu na estação do verão e teve médias semelhantes nas estações outono e inverno, inverno e primavera. Ao analisar as interações dos nutrientes na mesma estação climática, foram obtidos valores semelhantes para todos os elementos.

Observa-se que para as duas áreas, os teores de nitrogênio são bem superiores. Segundo Malavolta (1985), isso se deve ao fato deste elemento participar da maioria das reações de metabolismo de componentes (aminoácidos, proteínas, amidas, vitaminas, entre outros), as quais têm seu sítio de ocorrência principal nas folhas, em virtude da ocorrência da fotossíntese.

Há exemplo do nitrogênio, segundo Brun (2004), o fósforo tem ampla mobilidade dentro da planta e, com isso, ele tende a se concentrar nos órgãos mais novos, no caso deste estudo, as folhas. Schonau e Herbert (1982, apud VALERI et al., 1993) consideram que o teor de P das folhas de  $1,7 \text{ gKg}^{-1}$  seja adequado para o desenvolvimento das plantas de *E. grandis*, com idades variando de 6 a 36 meses. No estudo de Valeri et al. (1993), os resultados de P próximos a  $1,2 \text{ gKg}^{-1}$  seriam insuficientes para a espécie.

Segundo Belotte (1990), entre os teores de macronutrientes, o P é o que apresenta a maior variação, nas diferentes épocas consideradas. No período de alta umidade no solo (verão/outono), encontramos 60% mais P nas folhas do que o encontrado no período de baixa umidade no solo (inverno/primavera). Os demais nutrientes mostram comportamento semelhante: 34% para o K; 20% para o Mg; 15% para o Ca e 9% para o N.

No interior paulista, variações sazonais significativas nos teores de nutrientes em uma mesma árvore foram observadas por Reissmann et al. (1976), nas quais os níveis de N e P mostraram um padrão de oscilação nas amostras coletadas entre o verão e o inverno. Para a mesma região, a estação que apresentou comportamento diferenciado foi o inverno, as demais estações não apresentaram variações. Trabalhos desenvolvidos até então em regiões próximas ao Estado de São Paulo permitem recomendar que sejam coletadas amostras, de árvores dominantes, de folhas recém maduras do meio da copa, durante o verão (BELLOTE e SILVA, 2000).

#### **4.3 Comportamento espectral em povoamento de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade nas quatro estações do ano**

Para avaliar o comportamento espectral, foram coletadas um total de 3.600 folhas, sendo 900 folhas em cada período sazonal. A Figura 6 ilustra a resposta espectral média para as folhas de *Eucalyptus grandis* para as quatro estações do ano.

Quando foram tomadas as leituras, as folhas verdes ainda estavam realizando fotossíntese, com isso, produziu-se uma curva espectral característica de vegetação sadia, com bandas de absorção devidas à clorofila nas regiões do azul e do vermelho (próximo de 5% de reflectância em 450 nm e 4,6% em 650 nm, respectivamente), além de um pico de reflectância no verde (8,6% em 550 nm). Na região do infravermelho próximo IVP (em 900 nm), aproximadamente 47% do fluxo radiante incidente foi refletido pela folha.

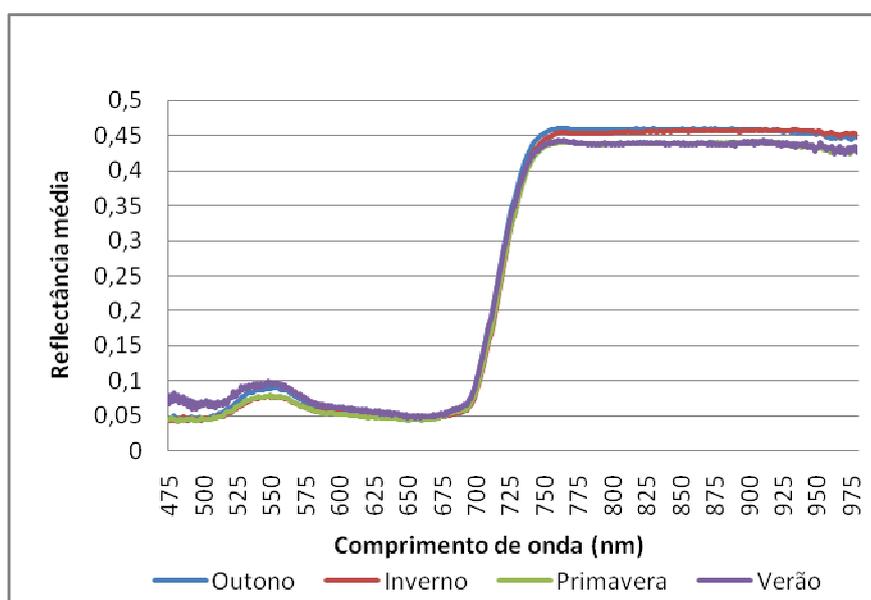


Figura 6 - Ilustração da resposta espectral média para as quatro estações do ano.

Jensen (2009), em estudo com folhas de *Liquidambar styraciflua* L., obteve para as folhas verdes saudias reflectância de 6% no comprimento de onda 450 nm e 5% em 650 nm abrangendo assim a região do azul e do vermelho, além de um pico no verde de 11% em 550 nm e na região do IVP (900 nm) com aproximadamente 76%.

#### 4.3.1 Resultados das interações entre as variáveis estações do ano, preparos de solo e as 12 bandas do espectro eletromagnético

Mediante o arranjo em que as informações foram submetidas, obtiveram-se resultados significativos ao nível de 1% de probabilidade para os fatores 1 (período sazonal), 2 (preparo de solo), 3 (bandas) e ainda para a interação entre os fatores 1 e 3 (Tabela 16). Para a interação entre os fatores 1 e 2, o nível de significância foi de

95%. Já para a interação entre 2 e 3 e, ainda, para a interação entre os três fatores, os resultados obtidos não são significativos.

**Tabela 16 - Análise da variância para os cruzamentos de reflectâncias correspondentes às diferentes estações do ano, aos preparos de solo e às doze bandas em análise em *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade.**

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Período sazonal (F1)	3	0.02836	0.00945	97.3922 **
Preparo de solo (F2)	3	0.00155	0.00052	5.3247 **
Bandas (F3)	11	17.86492	1.62408	16731.8096 **
Int. F1xF2	9	0.00194	0.00022	2.2248 *
Int. F1xF3	33	0.02197	0.00067	6.8583 **
Int. F2xF3	33	0.00339	0.00010	1.0595 ns
Int. F1x2x3	99	0.00293	0.00003	0.3054 ns
Tratamentos	191	17.92507	0.09385	966.8566 **
Resíduo	384	0.03727	0.00010	
<b>Total</b>	<b>575</b>	<b>17.96235</b>		

\*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \*significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ ); ns não significativo ( $p \geq .05$ )

A partir dos resultados obtidos na tabela 16, realizou-se comparações das médias através do teste de Tukey (Tabela 17), para assim, confirmar a existência de médias diferindo entre si.

Ao observar os períodos sazonais, vê-se que a estação verão apresenta a maior média e difere das demais, seguida por outono e inverno, que possuem comportamentos semelhantes entre si e pela primavera que, possui uma média menor e difere significativamente.

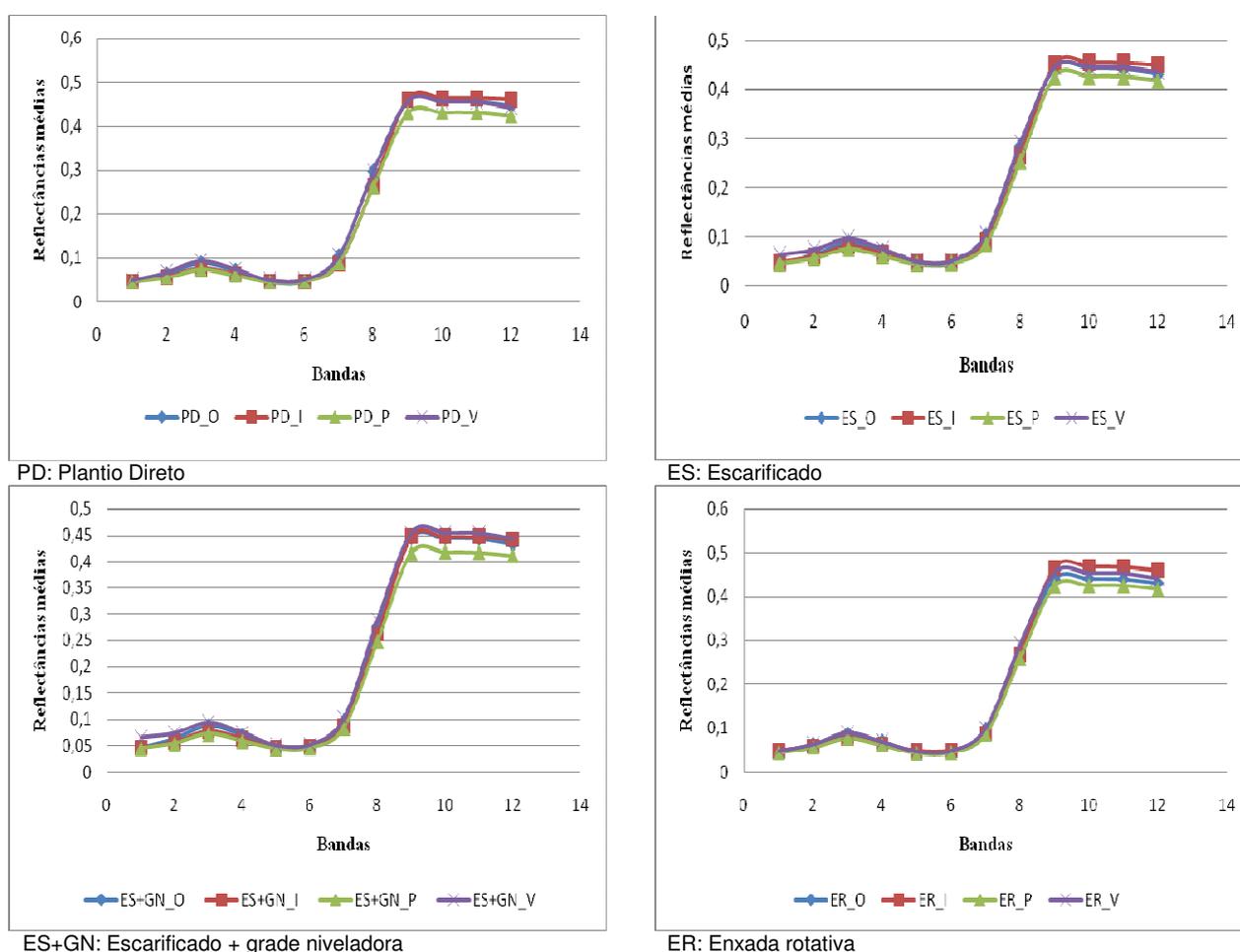
**Tabela 17 - Teste de Tukey para as médias de reflectâncias das folhas de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade.**

Período sazonal	Reflectância	Bandas	Reflectância
<b>Outono</b>	0,21020 b	<b>1</b>	0,04900 g
<b>Inverno</b>	0,21057 b	<b>2</b>	0,06189 f
<b>Primavera</b>	0,19674 c	<b>3</b>	0,08359 e
<b>Verão</b>	0,21568 a	<b>4</b>	0,06710 f
<b>Preparo de solo</b>	<b>Reflectância</b>	<b>5</b>	0,04708 g
<b>PD</b>	0,21065 a	<b>6</b>	0,04851 g
<b>ES</b>	0,20843 ab	<b>7</b>	0,09460 d
<b>ES+GN</b>	0,20603 b	<b>8</b>	0,27433 c
<b>ER</b>	0,20807 ab	<b>9</b>	0,44510 a
		<b>10</b>	0,44627 a
		<b>11</b>	0,44527 a
		<b>12</b>	0,43680 b

Onde: PD – plantio direto; ES – escarificação; ES+GN – escarificação mais grade niveladora; ER – enxada rotativa. \*Teste Tukey a 5% de probabilidade; Para colunas= Classificação c/letras minúsculas; Para linhas= Classificação c/letras maiúsculas

O fator preparo de solo apresenta médias semelhantes, sendo que nenhuma das médias difere estatisticamente das demais. Observa-se que o preparo plantio direto e escarificado mais grade niveladora apresentam diferenciados.

Ao avaliar as médias das doze bandas, verifica-se que as bandas 12, 8, 7 e 3 apresentam médias diferindo das demais. As informações apresentadas na ANOVA podem ser visualizadas na Figura 7, onde ficam em evidência as variações do comportamento espectral médio em cada banda nas quatro estações do ano, para os diferentes preparos de solo.



**Figura 7 – Variações do comportamento espectral médio para cada banda nas quatro estações do ano para cada preparo de solo em povoamento de *Eucalyptus grandis*.**

Onde: O - outono; I - inverno; P - primavera; V - verão.

O processo de geração de alimento via fotossíntese determina como uma folha ou um dossel vegetal de fato aparece radiometricamente em imagens de sensoriamento remoto. Folhas saudáveis necessitam de três coisas para gerar alimento: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e irradiância ( $E_\lambda$ ) medida em  $\text{W m}^{-2}$ , explica o pesquisador Jensen (2009). Essa mesma abordagem é relatada por Novo (1992),

Moreira (2005). Ponzoni e Shimabukuro (2007) mencionam que a estrutura celular é bastante variável. As variações ocorrem entre espécies diferentes e até mesmo entre folhas de uma mesma espécie, dependendo das condições ambientais durante o crescimento. Farabee (1997), descreve que a fotossíntese ocorre dentro da folha verde típica, em dois tipos de células produtoras de alimentos – as células do mesófilo dos parênquimas paliçádico e lacunoso. Cada molécula absorve ou reflete seus comprimentos de onda luminosos específicos. As moléculas de uma planta verde típica que absorvem preferencialmente comprimentos de onda da região espectral do visível (350 ou 700 nm) são denominados pigmentos. A clorofila *a* e a clorofila *b* são os mais importantes pigmentos vegetais absorvedores da luz azul e luz vermelha: a clorofila *a* nos comprimentos de onda 430 e 660 nm, e a clorofila *b*, em 450 a 650 nm.

Ponzoni e Shimabukuro (2007) salientam ainda que a água existente no interior das células ou em algumas lacunas intercelulares seria responsável por grande parte da absorção da radiação, ou seja, quanto maior a quantidade de água no interior da estrutura foliar, menor será a quantidade da radiação refletida.

De uma forma objetiva, Ponzoni e Shimabukuro (2007) descrevem que o processo de interação entre a radiação eletromagnética referente ao espectro óptico e uma folha é dependente de fatores químicos (pigmentos fotossintetizantes e água) e estruturais (organização dos tecidos da folha) e pode ser analisado sob os pontos de vista da absorção, da transmissão e da reflexão da radiação. A análise conjunta desses três fenômenos compõe aquilo que denominamos como estudo do *comportamento espectral da vegetação*, que envolve principalmente o estudo dos fatores influentes na reflexão da radiação por folhas isoladas e por dosséis vegetais.

A teoria descrita por Willstatter e Stoll (1918, apud PONZONI, 2001) pode explicar uma série de fenômenos que ocorrem na vegetação quando se considera a região do visível. Um exemplo desses fenômenos é a diferença nas reflectâncias espectrais das faces dorsal e ventral das folhas. Na face dorsal da maioria das folhas, encontra-se o mesófilo esponjoso e essa face é geralmente mais reflectiva do que a ventral. Essa distinção é mais evidente na região do visível, já que na região do infravermelho próximo, a reflectância é aproximadamente igual para ambas as faces.

Dessa forma, fica mais fácil para esclarecer os resultados obtidos nos dois testes realizados. A banda três (3 – verde 2) apresenta o pico na banda do verde (ou

no ponto de máxima reflectância), no espectro visível, com centro de classe em 550 nm. Esse fenômeno está fortemente relacionado ao total de clorofila (SCHEPERS et al., 1996).

Já a banda sete (7 – vermelho borda 1) é a região onde ocorre a absorção de clorofila pós-máxima (ou de mínima reflectância) sendo 700 nm o centro da banda. Esse é o ponto de mudança repentina na reflectância de absorção do vermelho próximo-máximo ao início do aumento significativo na reflectância ao longo do limite (borda) do vermelho. Nessa região do vermelho, é encontrado o pico mais sensível ao stress da planta, segundo Carter (1993).

A banda oito (8 – vermelho borda 2) é o ponto crítico em torno do limite do vermelho, em que há uma mudança máxima na inclinação do espectro de reflectância pela variação no comprimento de onda entre 350 e 1050 nm. Região sensível às variações temporais no crescimento e na condição de colheita, apresentando como resultado o deslocamento para o limite do vermelho. É sensível ao stress da vegetação e fornece a informação adicional sobre o status de clorofila e do nitrogênio das plantas (CLEVERS, 1996; SHAW et al., 1998; ELVIDGE e CHEN, 1995).

A banda doze (12 – NIR sensível à umidade) é o centro de depressão da curva sensível à umidade no NIR. A parte da depressão varia de 940 a 1040 nm, e tem tipicamente a reflectância mínima em torno de 975 nm (ou ponto do “mergulho máximo” na parte da depressão dessa curva). É a faixa sensível à umidade da planta (PEÑUELAS et al., 1995, THENKABAIL et al., 2000, THENKABAIL et al., 1994). Nessa região, são praticáveis as medidas diretas do vapor de água e sobre os dosséis da vegetação (RICHEY et al., 1989).

Ao avaliar as interações geradas, observa-se que, ao interagir os quatro preparos de solo com as estações do ano, obtêm-se os seguintes resultados (Tabela 18): no plantio direto e no preparo com escarificação, difere a reflectância média na estação primavera; para o preparo de solo escarificação mais grade niveladora, foram obtidas duas médias diferindo uma da outra e das demais nas estações verão e primavera; já para o preparo de solo enxada rotativa, a média apontou diferenças para as estações outono e primavera. Quando avaliadas as interações dentro de cada estação, observa-se que as médias são muito semelhantes.

**Tabela 18 - Teste de comparação de médias de reflectância considerando a interação entre as quatro estações do ano e os preparos de solo.**

Estações	Diferentes preparos de solo			
	PD	ES	ES+GN	ER
<b>Outono</b>	0,2154 aA	0,2097 bAB	0,2083 bB	0,2074 bB
<b>Inverno</b>	0,2115 aAB	0,2107 abAB	0,2063 bB	0,2138 aA
<b>Primavera</b>	0,1993 bA	0,1976 cAB	0,1927 cB	0,1973 cAB
<b>Verão</b>	0,2164 aA	0,2157 aA	0,2168 aA	0,2138 aA

Onde: PD – plantio direto; ES – escarificação; ES+GN – escarificação mais grade niveladora; ER – enxada rotativa.

Analisadas as bandas e as estações do ano em conjunto, obtiveram-se os seguintes resultados (Tabela 19): as bandas 9, 10, 11 e 12 apresentam médias diferindo das demais na estação primavera; a banda 12 ainda apresenta a média da estação inverno em destaque; outra banda que apresenta valor da média diferindo das demais é a de número 3.

**Tabela 19 - Resultado do teste de comparação de médias de reflectância considerando a interação entre as quatro estações do ano e as bandas.**

Estações	Bandas											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Outono</b>	0,0461 bE	0,0634 abD	0,0881 abC	0,0703 abD	0,0467 aE	0,0481 aE	0,1006 aC	0,2839 aB	0,4469 aA	0,4469 bA	0,4456 bA	0,4357 bA
<b>Inverno</b>	0,0477 abE	0,0585 bDE	0,0781 bcC	0,0640 abD	0,0478 aE	0,0490 aE	0,0887 bC	0,2653 bB	0,4566 aA	0,4596 aA	0,4583 aA	0,4532 aA
<b>Primavera</b>	0,0454 bE	0,0558 bDE	0,0749 cC	0,0604 bD	0,0445 aE	0,0461 aE	0,0862 bC	0,2559 bB	0,4241 bA	0,4254 cA	0,4248 cA	0,4172 cA
<b>Verão</b>	0,0567 aE	0,0699 aD	0,0934 aC	0,0736 aD	0,0494 aE	0,0509 aE	0,1030 aC	0,2922 aB	0,4527 aA	0,4531 abA	0,4523 abA	0,4412 bA

\*Teste Tukey a 5% de probabilidade; Para colunas= Classificação c/letras minúsculas; Para linhas= Classificação c/letras maiúsculas.

#### 4.3.2 Avaliações da reflectância para os períodos sazonais, posições de coleta das folhas e para as 12 bandas do espectro eletromagnético – plantio direto

Para esta análise, selecionou-se o preparo de solo tipo plantio direto, que na avaliação de médias pelo teste Tukey (Tabela 17), apresentou a maior média. Foram obtidos os resultados da análise da variância para os teores de reflectância para os fatores: períodos sazonais (F1), posição de coleta das folhas (F2) e para as doze regiões (bandas) do espectro (F3). Os três fatores em análise foram significativos ao nível de 1% de probabilidade. Obtiveram-se os mesmos resultados para as interações entre os fatores 1 com 2 e 1 com 3. Para as interações F2 x F3 e entre os três fatores os resultados não foram significativos, como pode ser visto na Tabela 20.

**Tabela 20 - ANOVA para o comportamento espectral correspondente aos diferentes períodos sazonais, posição de coleta das folhas e 12 bandas em *Eucalyptus grandis*.**

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
<b>Período sazonal (F1)</b>	3	0.04391	0.01464	12.5791 **
<b>Posição de coleta (F2)</b>	4	0.02946	0.00736	6.3286 **
<b>Bandas (F3)</b>	11	23.67984	2.15271	1849.9431 **
<b>Int. F1xF2</b>	12	0.09199	0.00767	6.5875 **
<b>Int. F1xF3</b>	33	0.06745	0.00204	1.7565 **
<b>Int. F2xF3</b>	44	0.02183	0.00050	0.4264 ns
<b>Int. F1x2x3</b>	132	0.06789	0.00051	0.4420 ns
<b>Tratamentos</b>	239	24.00237	0.10043	86.3035 **
<b>Resíduo</b>	480	0.55856	0.00116	
<b>Total</b>	719	24.56093		

\*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \*significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 = < p < .05$ ); ns não significativo ( $p \geq .05$ )

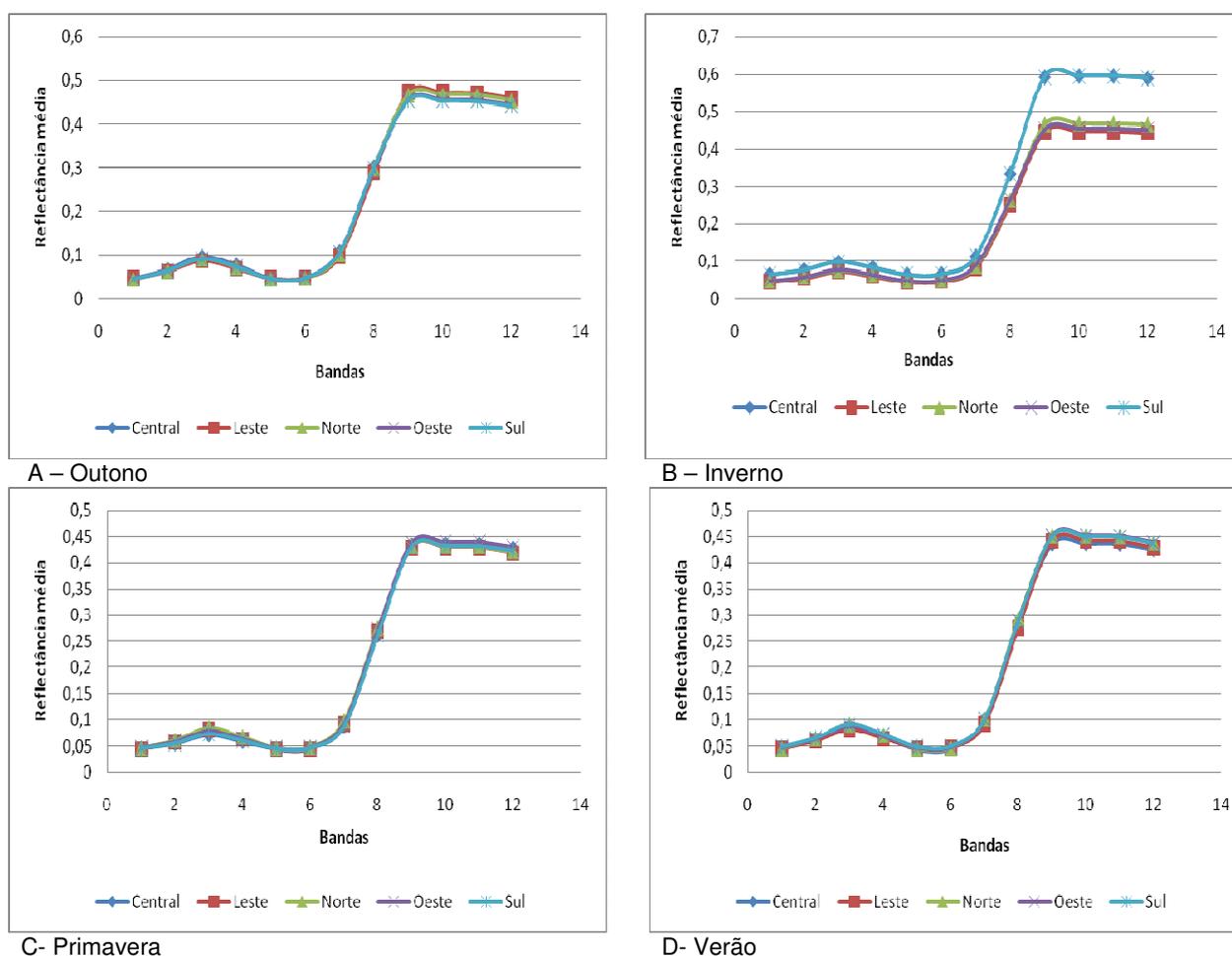
A partir dos resultados mencionados na Tabela 20, foram obtidas as comparações das médias (Tabela 21). Ao observarem-se os períodos sazonais, vê-se que, para o preparo de solo plantio direto, não há uma estação específica para analisar os dados de reflectância, pois as médias comportam-se de maneira semelhantes entre si. Quando avaliadas as médias das cinco posições de coleta das folhas dentro das parcelas, a posição central apresentou média diferindo das demais. No fator bandas, a média que diferiu das demais estatisticamente foi a banda de número oito (8).

**Tabela 21 - Teste de Tukey para as médias de reflectâncias das folhas de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade, no preparo de solo plantio direto.**

Período sazonal	Reflectância	Bandas	Reflectância
<b>Outono</b>	0,21771 ab	<b>1</b>	0,04700 f
<b>Inverno</b>	0,22236 a	<b>2</b>	0,06167 ef
<b>Primavera</b>	0,20189 c	<b>3</b>	0,08463 cd
<b>Verão</b>	0,20972 bc	<b>4</b>	0,06796 de
<b>Preparo de solo</b>	<b>Reflectância</b>	<b>5</b>	0,04714 f
<b>PD</b>	0,21065 a	<b>6</b>	0,04856 ef
<b>ES</b>	0,20843 ab	<b>7</b>	0,09694 c
<b>ES+GN</b>	0,20603 b	<b>8</b>	0,28194 b
<b>ER</b>	0,20807 ab	<b>9</b>	0,45650 a
		<b>10</b>	0,45770 a
		<b>11</b>	0,45703 a
		<b>12</b>	0,44795 a

\*Teste Tukey a 5% de probabilidade; Para colunas= Classificação c/letras minúsculas; Para linhas= Classificação c/letras maiúsculas

Conforme as informações apresentadas na ANOVA, visualizadas na Figura 8, ficam evidentes as variações do comportamento espectral entre as bandas nas quatro estações do ano, para as diferentes posições de coleta do material vegetativo, dentro das parcelas com preparo de solo plantio direto.



**Figura 8 - Variações do comportamento espectral médio em cada banda nas quatro estações do ano para as diferentes posições de coleta do material vegetativo dentro das parcelas.**

Quando analisadas as interações entre os fatores 1 e 2 (Tabela 22), observa-se que as médias indicam que em solos preparados com a técnica plantio direto, as folhas devem ser coletadas na posição central do povoamento, para a estação inverno. Os valores de reflectância para as demais posições de coleta das folhas não sofrem a interferência das estações do ano.

**Tabela 22 - Comparação de médias considerando a interação entre os períodos sazonais e as posições cardeais de coleta do material vegetativo de *Eucalyptus grandis*.**

Período sazonal	Posição de coleta				
	Central	Leste	Norte	Oeste	Sul
<b>Outono</b>	0,2213 bA	0,2190 aA	0,2152 aA	0,2183 aA	0,2148 aA
<b>Inverno</b>	0,2730 aA	0,2040 aB	0,2093 aB	0,2140 aB	0,2115 aB
<b>Primavera</b>	0,2006 cA	0,2005 aA	0,2038 aA	0,2051 aA	0,1993 aA
<b>Verão</b>	0,2062 bcA	0,2052 aA	0,2126 aA	0,2121 aA	0,2126 aA

Ao avaliar a interação (Tabela 23) entre os fatores períodos sazonais e bandas espectrais, observa-se que a banda 8 (vermelho borda II) difere

significativamente nas quatro estações, indicando assim, que, para esta banda, as coletas podem ser realizadas em qualquer período do ano, desde que o preparo de solo seja plantio direto.

**Tabela 23 - Resultado do teste de comparação de médias considerando os períodos sazonais e as bandas do espectro eletromagnético de *Eucalyptus grandis*.**

Estações	Bandas											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Outono</b>	0,0458 aD	0,0644 aCD	0,0916 aC	0,0728 aCD	0,0466 aD	0,0478 aD	0,1035 aC	0,2968 aB	0,4638 abA	0,4643 abA	0,4631 abA	0,4520 abA
<b>Inverno</b>	0,0502 aD	0,0609 aCD	0,0805 aCD	0,0665 aCD	0,0504 aD	0,0517 aD	0,0925 aC	0,2765 aB	0,4837 aA	0,4864 aA	0,4865 aA	0,4824 aA
<b>Primavera</b>	0,0460 aD	0,0578 aCD	0,0783 aCD	0,0631 aCD	0,0455 aD	0,0472 aD	0,0924 aC	0,2679 aB	0,4327 bA	0,4340 bA	0,4335 bA	0,4243 bA
<b>Verão</b>	0,0461 aE	0,0636 aCDE	0,0881 aCD	0,0694 aCDE	0,0460 aE	0,0475 aDE	0,0992 aC	0,2866 aB	0,4458 bA	0,4461 bA	0,4450 bA	0,4331 bA

#### 4.3.3 Análise de Componentes Principais - ACP

Na Tabela 24, pode ser observado que os valores dos autovetores apresentam variação bem significativa da primeira variável para as demais. O primeiro eixo da ACP, banda de número 8, explicou 68,33% da variância dos dados; o segundo eixo, representado pela banda 12, explica 21,24% das reflectâncias, e a banda 11 no terceiro eixo, explica 8,53%. Moita e Moita (1999) explicam que as n-variáveis originais geram, através de suas combinações lineares, n-componentes principais, cuja característica, além da ortogonalidade, é que são obtidos em ordem decrescente de máxima variância.

**Tabela 24 – Análise de componentes principais das reflectâncias de 3 bandas selecionadas de 12 bandas, apresentam variância acumulada que abrangem comprimentos de onda variando de 475 a 980nm do espectro eletromagnético.**

Variáveis e variâncias			
Variável	Média	Desvio Padrão	Variância
<b>Banda 8</b>	0,2743	0,0158	0,0003
<b>Banda 12</b>	0,4368	0,0146	0,0002
<b>Banda 11</b>	0,4453	0,0145	0,0002
Autovalores			
Variável	Autovalor	Variância explicada %	Variância acumulada
<b>Banda 8</b>	8,1997	68,3308	68,3308
<b>Banda 12</b>	2,5491	21,2423	89,5730
<b>Banda 11</b>	1,0240	8,5334	98,1064

Autovalor é o valor que representa a contribuição relativa de cada componente para explicar a variação total dos dados. Existe um autovalor para

cada componente. Matematicamente, o processo de extrair mais eixos pode ir até o número de eixos ou componentes igualar-se ao número de variáveis, porém, os eixos posteriores vão contribuir cada vez menos para explicar os dados (KENT e COKER, 1992). Assim, os autovalores aparecem na ACP em ordem decrescente de contribuição.

A banda oito (8 – vermelho borda 2), que explicou 68,33% dos dados de reflectância, está ligada ao stress da vegetação, fornece informações sobre o status de clorofila e do nitrogênio das plantas. Salienta-se que as análises químicas de material vegetativo desta área indicaram que o teor do elemento nitrogênio é estatisticamente superior aos demais macronutrientes, o que possivelmente tenha contribuído para que a banda 8 responda pela maior parte da reflectância.

Certos comprimentos de onda da radiação são mais afetados pela absorção do que pelo espalhamento. Isso é particularmente verdade para o infravermelho e para os comprimentos de onda menores do que a luz visível (JENSEN, 2009). A partir desta citação é possível compreender a contribuição significativa das bandas 11 e 12 na ACP.

Numa folha verde sadia típica, a reflectância no infravermelho próximo aumenta muito na região entre 700 e 1200 nm. Uma folha verde sadia refletia aproximadamente 76% da energia incidente no infravermelho próximo (em 900 nm). As folhas verdes sadias absorvem energia radiante muito eficiente nas porções do azul e do vermelho, que são regiões espectrais necessárias para a fotossíntese. Porém, imediatamente após a banda de absorção do vermelho causada pela clorofila, a transmitância e a reflectância das folhas vegetais aumentam, fazendo com que a absorptância caia a valores baixos. Se as plantas absorvessem esta energia com a mesma eficiência que acontece no visível, elas poderiam esquentar muito e, desta forma, as proteínas poderiam ser danificadas. Assim, as plantas desenvolveram uma adaptação, de tal forma que elas não usam esta grande quantidade de energia do infravermelho próximo, simplesmente refletindo-a ou transmitindo-a para as camadas inferiores de folhas ou para o solo (JENSEN, 2009).

Na região do infravermelho próximo, a vegetação verde sadia é geralmente caracterizada por uma alta reflectância (40 – 60%), alta transmitância (40 – 60%) e relativamente baixa absorptância (5 – 10%). Existe uma banda de absorção causada pelo vapor d'água localizada em 920 – 980 nm. Conseqüentemente, a região espectral ótima para o sensoriamento no infravermelho próximo é indicada como sendo em 740 – 900 nm, cita Tucker (1978 apud JENSEN, 2009).

Os autores Jensen (2009) e Meneses e Madeira Netto (2001) citam as principais razões pelas quais os dosséis de plantas saudáveis refletem tanto no infravermelho próximo:

- a folha reflete de 40 a 60% da energia do infravermelho próximo incidente devido ao mesófilo esponjoso, e;
- os restantes 45 – 50% da energia penetram na folha e podem ser refletidos uma vez mais pelas folhas abaixo.

Jensen (2009) esclarece que a água é um bom absorvedor de energia no infravermelho médio, de tal forma que quanto maior a turgidez das folhas, menores as reflectâncias no infravermelho médio. Inversamente, à medida que o conteúdo de umidade das folhas diminui, a reflectância no infravermelho médio aumenta substancialmente. À medida que a água da planta nos espaços de ar intercelular diminui, a energia do infravermelho médio incidente nas folhas é mais intensamente espalhada pelas interfaces das paredes intercelulares, resultando em maiores índices de reflectância no infravermelho médio.

#### **4.4 Estimativa de teores de macro e micronutrientes em folhas de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade, por espectrorradiometria em laboratório**

A partir dos valores de reflectância geral para os dados das estações do ano, processadas no aplicativo “R” foram obtidas as reflectâncias médias para cada estação: de 0,2176785 para o outono; 0,2171421 para inverno; 0,2013284 para primavera e 0,2095684 para o verão.

O teste de normalidade Shapiro-Wilksons (W) utilizado para verificar a normalidade dos dados apontou um valor de 0,9034. Para os grupos avaliados, o valor calculado de W é superior ao valor tabelado (p-value), portanto, aceita-se a normalidade das observações de reflectância nas diferentes regiões espectrais consideradas para as diferentes estações do ano. Esse valor pode ser confirmado pela teoria de Royston (1995) que explica que o p-valor é um valor aproximado para o teste; e que para ser adequado, o p-valor < 0,1.

Na Tabela 26, são demonstrados os resultados obtidos para análise de variância (ANOVA), relacionadas às diferentes estações do ano e comprimentos de onda.

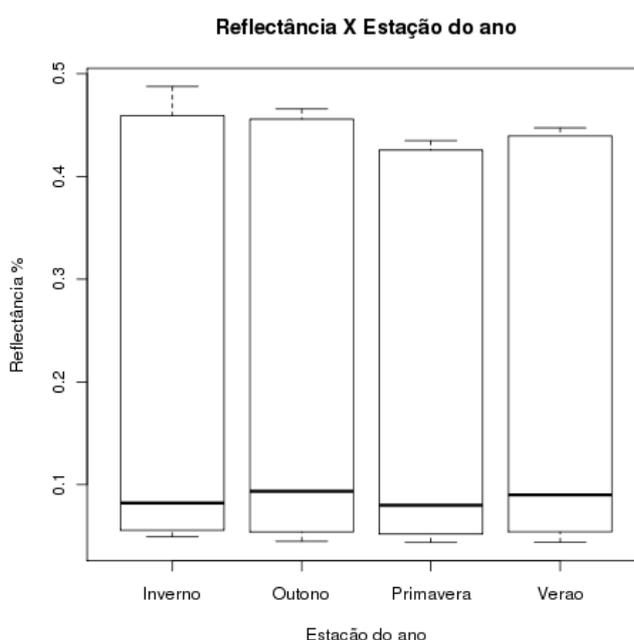
**Tabela 25 - Análise da variância para as interações das reflectâncias médias correspondentes às diferentes estações do ano e comprimentos de onda (nm).**

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F value	Pr(>F)
Estação Ano	3	0.0255	0.0085	1.4946	0.2150
Comp. Onda	1	15.3726	15.3726	2701.6295	<2e-16 ***
EstacaoAnoXCompOnda	3	0.0208	0.0069	1.2203	0.3015
Resíduo	568	3.2320	0.0057		

Onde: 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0,01 '\*\*' 0,05 '\*' 0,1 '.' 1

A Tabela 25 mostra que as diferenças de reflectância entre os níveis de comprimento de onda são altamente significativas em nível de 99,9%. Porém, as leituras de reflectância para as estações do ano não apontaram diferenças significativas.

Na Figura 9 observam-se os valores das reflectâncias médias para as diferentes estações do ano, e deve ser entendida da seguinte forma: a linha horizontal inferior é o menor valor encontrado nos dados; a linha horizontal superior é o maior valor observado nos dados; a linha horizontal em negrito indica o valor médio da variável Y; a caixa definida entre as linhas horizontais em torno do valor médio significa respectivamente 25% dos dados e 75% dos dados (1º quartil e 3º quartil). Quanto maior a distância entre estas linhas, maior a variabilidade dos dados.



**Figura 9 – Gráfico do tipo *Boxplot* indicando as interações entre estações do ano, comprimento de onda e reflectância.**

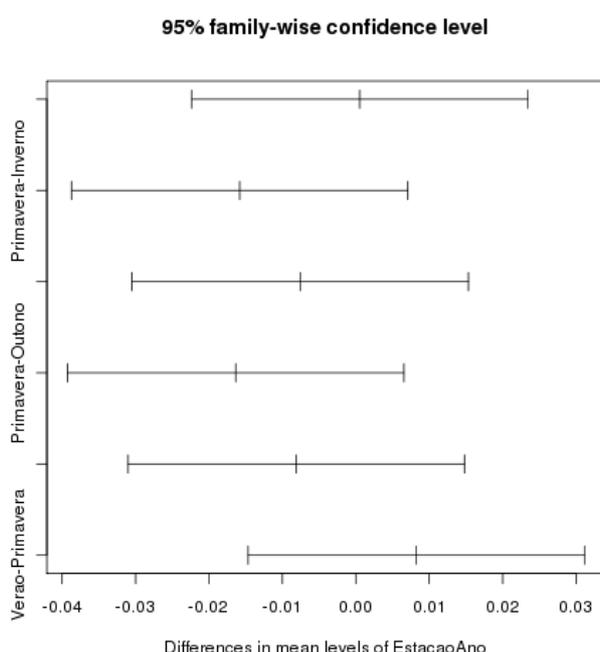
Segundo Storck et al. (2006), o teste de Tukey pode ser utilizado para comparar todo e qualquer contraste entre duas médias de tratamentos. Através deste teste a 95% de probabilidade, foi possível verificar entre quais estações do ano ocorrem as diferenças significativas detectadas na ANOVA. O teste de Tukey, sequencia as médias por ordem de importância ou influência sobre o resultado da variância, onde as diferenças significativas são aquelas cujo valor da diferença entre o limite inferior e superior é positivo.

Na Tabela 26, observa-se que os pares outono-inverno; e verão-primavera diferem estatisticamente entre si. Os demais pares não apresentam diferença significativa.

**Tabela 26 - Teste de Tukey a 95% de probabilidade, para as médias das reflectâncias nas diferentes estações do ano.**

Interações	Diferença	Limite inferior	Limite superior	$r^2_{aj}$
<b>Outono-Inverno</b>	0,0005363725 a	-0,02236971	0,023442455	0,9999211
<b>Primavera-Inverno</b>	-0,0158137778 b	-0,03871986	0,007092305	0,2845828
<b>Verão-Inverno</b>	-0,0075737002 b	-0,03047978	0,015332382	0,8294542
<b>Primavera-Outono</b>	-0,0163501503 b	-0,03925623	0,006555932	0,2560417
<b>Verão-Outono</b>	-0,0081100727 b	-0,03101616	0,014796010	0,7983116
<b>Verão-Primavera</b>	0,0082400776 a	-0,01466600	0,031146160	0,7904424

Os resultados mencionados anteriormente podem ser visualizados na Figura 10, através das barras, em que estas são formadas pelas diferenças entre o limite inferior e o limite superior dos dados.



**Figura 10 – Teste Tukey a 95% de probabilidade, para as diferentes estações do ano.**

Após o teste de Tukey, procedeu-se a análise dos resíduos. A análise de resíduos segundo, Storck et al. (2006), avalia a qualidade da análise dos experimentos. Essa análise verifica se as pressuposições do modelo matemático estão sendo satisfeitas. Schneider (1998), explica que o resíduo é a diferença entre o que é observado e o que é estimado pela equação de regressão, isto é, o quanto a equação de regressão não é capaz de explicar. Se o modelo estiver corretamente ajustado, os resíduos devem seguir uma distribuição normal com média igual a zero.

Na Figura 11 (a), são apresentados os resultados gráficos da análise de qualidade do modelo geral, onde as variáveis dependentes são os nutrientes e as independentes são as estações do ano, reflectância e comprimentos de onda. A primeira interação entre os resíduos e os valores ajustados (residuals vs fitted), nesta situação, apontam que os resíduos não se distribuem aleatoriamente em torno da média zero, de modo que o modelo de regressão linear não é adequado. O segundo gráfico apresenta a distribuição Normal (Normal Q-Q). Melo (2010), explica que o ideal para a normal dos resíduos deve: não ter padrão aparente, ter homogeneidade de variâncias, a maioria dos valores serem próximos de zero e não apresentar valores *outlyer*. Schneider (1998) menciona que um “outlyer” surge de um ponto de desvio bem maior que os restantes em valores absolutos e, muitas vezes, está localizado em 3 ou 4 desvios padrão. Este indica um dado atípico entre os valores observados do problema analisado. Sendo assim, para este modelo, os dados não seguem uma distribuição normal. O quarto gráfico (Residuals vs Leverage) combina o resíduo padronizado com a medida de alavancagem (leverage). Assim sendo, os valores não são adequados quando a alavancagem é próxima de zero e o resíduo semi-studentizado.

Na Figura 11 (b) visualiza-se o gráfico da normal da probabilidade dos resíduos, o qual não tem padrão aparente e a maioria dos valores não se encontram próximos de zero. Observa-se na distribuição dos pontos a existência de “caudas” tanto no início como no fim das informações, concluindo-se então que os dados não têm distribuição normal.

A Figura 11 (c) demonstra que os resíduos não são independentes, pois eles não estão distribuídos aleatoriamente em torno de zero.

A Distância de Cook, por sua vez, é uma estatística que serve para determinar o quanto anormal é uma observação específica da série, levando em consideração não somente as variáveis explicativas (os macro e micronutrientes),

mas também seus resíduos. Com ela, é possível ver quais nutrientes são mais influentes (“aberrantes”) na amostra, como demonstrado por Gonçalves (2005, apud TAVARES, 2009). Segundo Crusco et al (2005), “este método avalia a influência do “iésimo” caso sobre os demais casos, analisando a diferença entre os outros casos”. Melo (2010) informa que, para a Distância de Cook, valores menores que 0,2 são de baixa influência; maiores que 0,2 e menores que 0,5 a influência é moderada; e valores maiores que 0,5 possuem grande influência.

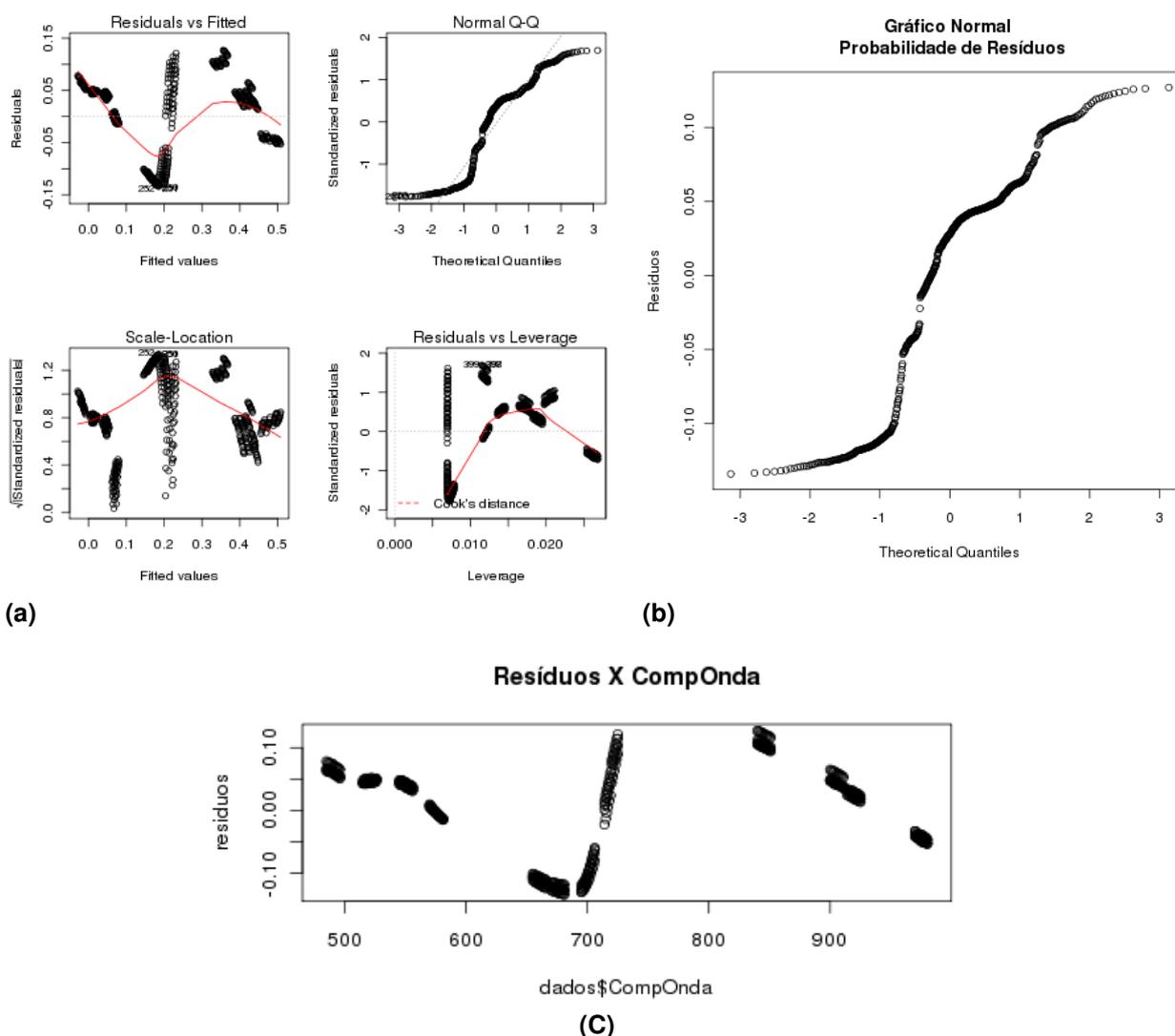


Figura 11 – Análise de resíduos segundo o método de distancias de Cook (1977), (a); gráfico normal com a probabilidade de resíduos (b); resíduos versus os comprimentos de onda (c).

As análises da variância e de resíduos também foram geradas para os modelos onde as variáveis dependentes são os macro e micronutrientes e as independentes são as estações do ano, reflectância e comprimentos de onda, as

tabelas que contêm os dados das ANOVA podem ser visualizadas nos Anexos 2 e 3. De forma geral, o comportamento individual para cada nutriente de ambos os grupos de nutrientes apresenta diferenças significativas entre as estações do ano. Já para os diferentes comprimentos de onda, para as reflectâncias e para a interação destes, não apresentaram diferenças significativas.

Na análise de resíduos (Anexos 4 e 5) para os macro e micronutrientes, foram observadas os seguintes aspectos: a primeira interação entre os resíduos e os valores ajustados (residuals vs fitted), apontam que os resíduos não se distribuem aleatoriamente em torno da média zero, assim o modelo de regressão linear não é adequado, o que pode ser confirmado na segunda interação das informações “distribuição Normal (Normal Q-Q)”.

Na Tabela 27, são apresentados os coeficientes de determinação para as equações geradas no pacote estatístico “R”. As equações foram gerados considerando os macro e micronutrientes como variáveis dependentes e as independentes as estações do ano, reflectância e comprimentos de onda. Em virtude do volume considerável de variáveis independentes (comprimento de onda interagindo com as diferentes estações do ano) selecionadas para cada equação.

**Tabela 27 – Coeficientes de determinação para as equações geradas pelo método de regressão, no pacote estatístico “R”, sendo cada elemento dependente em função da reflectância, estação do ano e interação com comprimentos de onda.**

Nutriente	R <sup>2</sup> aj.	F
N	0,7835	4,644
P	0,2194	1,283
K	-0,1136	0,8973
Ca	0,6553	2,914
Mg	0,6439	2,821
S	0,8405	6,307
B	0,9508	20,47
Cu	0,6685	3,031
Mn	0,5819	2,402
Fe	0,8423	6,378
Zn	0,9104	11,23

Onde: R= reflectância; N= nitrogênio; P= fósforo; K= potássio; Ca= cálcio; Mg= magnésio; S= enxofre; B= boro; Cu= cobre; Mn= manganês; Fe= ferro; Z= zinco.

A partir dos dados apresentados na Tabela 27, observa-se que para os elementos P e K os valores dos coeficientes de correlação ajustados são baixos, logo, os valores de F não são significativos. Os demais valores de R<sup>2</sup>aj. apresentam valores variando de moderados a altos. Isso pode ter ocorrido devido à mobilidade

de alguns elementos nas plantas, a fatores do ecossistema local, ao manejo da cultura ou a fatores não observados neste estudo.

Para as espécies lenhosas, a determinação dos macro e micronutrientes por análise foliar em sensoriamento remoto encontra-se em processo de desenvolvimento inicial (FERWERDA e SKIDMORE, 2007).

Muitas espécies de árvores desempenham um papel importante na conservação de ecossistemas e na agricultura (quebra-vento, recuperação de áreas degradadas, controle de erosão, entre outros). Como exemplo, cita-se a produção de azeitonas na Espanha, que é fortemente dependente de nitrogênio, fósforo e potássio. Estudos têm demonstrado que uma economia de mais de 80% nos fertilizantes pode ser alcançada se a variação espacial dos níveis de nutrientes for determinada antes de planejar os programas de fertilização (LOPEZ-GRANADOS et al., 2004). Na savana, o conhecimento dos níveis de nutrientes em árvores e arbustos pode ajudar a entender a distribuição espacial e a migração de herbívoros (KLOK e CHOWN, 1999).

Ferwerda e Skidmore (2007), avaliando os teores nutricionais de macronutrientes de três espécies florestais (*Calluna vulgaris* L.; *Salix cinera* L.; *Olea europaea* L.) e uma espécie arbustiva (*Cholophospermum mopane*), por espectrorradiometria, concluíram que seus modelos podem ser capazes de prever as diferenças na composição química entre as espécies, de forma satisfatória. Também concluíram que na maioria dos casos não é possível prever sutis diferenças na composição química dentro das espécies individuais.

Já para imagens multiespectrais, encontram-se vários estudos que foram desenvolvidos gerando modelos para prever a composição da vegetação, no nível do dossel em vegetação, em campo. Alguns desses estudos têm mostrado que é possível obter precisão elevada (por exemplo, a clorofila) com um coeficiente de determinação de 0,8 (HABOUDANE et al., 2002). Outros trabalhos na área no entanto, têm conseguido resultados apenas moderadamente precisos, como por exemplo, a previsão de nitrogênio com precisão de  $r^2$  de 0,56 (GONG et al., 2002).

## 5 CONCLUSÕES

O povoamento de *Eucalyptus grandis* com 44 meses de idade, apresenta deficiência dos elementos P, S e B; os elementos Cu e Mn apresentam teores elevados; e o elemento N é o único que apresenta diferença significativa; entre as estações climáticas não existem diferenças significativas.

O povoamento de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade, apresenta teor deficiente de P, S e B; os teores de K, Ca, Mg, Fe e Zn encontram-se dentro dos limites recomendados; Cu e Mn apresentam novamente teores de toxicidade elevados. Para as estações climáticas, apenas a estação inverno apresentou comportamento diferenciado das demais estações.

Quando abordada a temática dos diferentes preparos de solo para os macro e micronutrientes, foram obtidos valores não significativos, indicando, assim, que não existem variações nutricionais decorrentes nos diferentes preparos de solo para a área experimental.

Quando avaliados os dados correspondentes à reflectância de folhas de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade, conclui-se:

- Que as estações verão e primavera, interferem na reflectância de maneira estatisticamente distinta quando comparadas com as demais estações.
- Que o material vegetativo pode ser coletado em qualquer preparo de solo, pois as médias apresentam comportamentos semelhantes.
- Que ao avaliar as bandas espectrais que melhor expressam o comportamento da vegetação, os melhores resultados ocorrem para as bandas 12 (NIR sensível à umidade), 8 (vermelho borda 2), 7 (vermelho borda 1) e 3 (verde 2).
- Que ao testar as posições cardeais (Leste, Oeste, Norte, Sul) mais a posição central do tratamento com preparo de solo plantio direto: 1) as árvores na posição central da parcela apresentaram resposta espectral diferindo das demais posições cardeais; 2) as coletas de material vegetativo devem ser realizadas separando a parte central do povoamento da bordadura; 3) a banda que melhor caracterizou a resposta espectral dessa vegetação foi a de número oito (8 - vermelho borda 2).

A análise de componentes principais indicou as bandas 8, 11 e 12, como responsáveis por um total de 98,10% dos valores de reflectância em estudo.

Embora a maioria dos estudos tenha seu foco no uso de sensoriamento remoto hiperespectral para a detecção de clorofila, nitrogênio ou cobertura foliar, buscou-se gerar um modelo que expresse a interação entre o comportamento de algumas faixas de comprimentos de onda do espectro eletromagnético com os macro e micronutrientes encontrados nas folhas de *Eucalyptus grandis* com 20 meses de idade. Conclui-se que, ao gerar modelos considerando os elementos como variáveis dependentes da reflectância, estação do ano interagindo com comprimentos de onda, os elementos P e K apresentaram os valores dos coeficientes de correlação ajustados baixos e os valores de  $r^2_{aj}$  dos demais elementos variaram de moderados a altos.

## **6 RECOMENDAÇÕES FINAIS**

Como forma de expressar melhor as interações da reflectância com os elementos nutricionais, recomenda-se que sejam realizados estudos que aborde as diferentes posições de coleta das folhas nos galhos, de forma a abranger material vegetativo com idades fisiologicamente diferenciadas.

Avaliar nutricionalmente espécies florestais através de material vegetativo e associar a espectrorradiometria realizada em laboratório, ligada a imagens de alta resolução, para então obter estimativas nutricionais constantes dos povoamentos e acompanhar a produção.

Buscar parceria das empresas ligadas a pólos florestais e a geoprocessamento para impulsionar as pesquisas nesta área, para que futuramente os povoamentos florestais possam ser manejados através de silvicultura de precisão, baseada em imagens de alta resolução espectral.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÃO, P.U.R.; GIANLUPPI, D.; AZOLIN, M.A.D. **Levantamento semi-detalhado dos solos da estação experimental de silvicultura de Santa Maria**. Porto Alegre: [s.n], 1988. (Publicações IPRNR, n.21).
- BELLOTE. A.F.J. **Concentração, acumulação e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) em função da idade**. Piracicaba, 1979. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP, Piracicaba, 1979.
- BELLOTE, A.F.J. et al. **Extração e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden em função da idade: 1 - Macronutrientes**. IPEF, Piracicaba 20(6):1-23. 1980. p.45.
- BELLOTE, A.E.J. **Nährelementversorgung und Wuchsleistung von gedüngten *Eucalyptus grandis*-Plantagen im Cerrado von São Paulo (Brasilien)**. Freiburg im Breisgau. 1990. p. 159
- BELLOTE. A.F.J.; SILVA, H.D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais, 2000. p. 105-133.
- BINKLEY, D. **Forest nutrition management**. New York: A Wiley-Interscience/John Wiley, 1986. 290 p.
- BLACKBURN, G.A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. **Remote Sensing of Environment.**, v. 66, n. 3, p. 273–285. 1998.
- BRUN, E.J. **Matéria orgânica do solo em plantios de *Pinus taeda* e *P. elliottii* em duas regiões do Rio Grande do Sul – RS**. 2008. 118 f. **Dissertação** (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004.
- CANAVESI, V.; KIRCHNER, F.F. Quantificação de macronutrientes em florestas ombrófila mista Montana utilizando dados de campo e dados obtidos a partir de imagens do satélite Ikonos II. **Floresta**, Curitiba, v. 35, p. 451-464. set./dez. 2005.
- CARNEIRO, J.G.A. **Produção e controle de qualidade de mudas florestais**. Curitiba: UFPR/FUPEF, 1995. 451p.
- CARTER, G.A. Responses of Leaf Spectral Reflectance to Plant Stress. **American Journal of Botany**, New York, v.80 n.3, p. 2310 – 243, 1994.
- CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. Madrid: Ediciones Rialp, 1990. 453p.

CLEVERS, J. G.; Van Leeuwen, H. Combining use of optical and microwave remote sensing data for crop growth monitoring. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 56, n. 1, p. 42-51, 1996.

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

CRUSCO, N. A.; FREITAS, C. C.; RENNO, C. D.; EPIPHANIO, J. C. N.; ANJOS, C. S. Análise de regressão linear múltipla para simulação da banda do SWIR com outras bandas espectrais. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...**, Goiânia: editor, 2005. p. 891-898.

DE HOOG, R.J. et al. **Site-nutrition-growth relationships of *Araucária angustifolia* (Bert.) O. Ktze. In southern Brazil**. 181. 161f, (Inaugural-dissertation) – Fraiburg, 1981.

EBBERS, M.J.H.; WALLIS, I.R.; DURY, S.; FLOYA, R.; FOLEY, W.J.. Spectrometric prediction of secondary metabolites and nitrogen in fresh Eucalyptus foliage: towards remote sensing of the nutritional quality of foliage for leaf-eating marsupials. **Australian Journal of Botany**. v. 50, n. 6, p. 761–768. 2002.

ELVIDGE, C.D.; CHEN, Z. Comparison of broad and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 54, p. 38-48, 1995.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA - Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas**. Londrina: Editora Planta, 2006. 403p.

FERWERDA, J. G., SKIDMORE, A. K. Can nutrient status of four woody plant species be predicted using field spectrometry? **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.62, p.406 –414. 2007.

FLINN, E.W., BREN, L.J., HOPMANS, P. Soluble nutrient inputs from rain and outputs in stream water from small forested catchments. **Australian Forestry**, v. 42 n. 1, p. 39-49, 1979.

GATES, D.M. et al. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, Massachusetts, 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.1725-34, 1985.

GONG, P.R., HEALD, R.C. Analysis of in situ hyperspectral data for nutrient estimation of giant sequoia. **International Journal of Remote Sensing**. v. 23, n. 9, 1827-1850, 2002.

GONÇALVES, J.L.M. Recomendação de adubação para eucalyptus, pinus e espécies típicas da Mata Atlântica. **Documentos Florestais**, Piracicaba, n. 15, p. 1-23, 1995.

GONÇALVES, J.L.M. et al. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e nutrição das árvores. In.: GONÇALVES, L.M. E BENEDETTI, V. (Eds.). Piracicaba: **IPEF**, 2000. p. 3-57.

HAAG, H. P. et al. análise foliar em cinco espécies de eucaliptos. **IPEF**, Piracicaba, n. 13, p. 99-116, 1976.

HAAG, H. P. et al. - 1961 - Composição química de *Eucalyptus alba* Reinw e *Eucalyptus grandis* (Mill) Marden: resultados preliminares. In: **CONFERÊNCIA MUNDIAL DO EUCALIPTO**; 2. 1961, São Paulo – Anais... São Paulo: Editora, 1961, p. 1329-34.

HABOUDANE, D. et al. Integrated narrow-band vegetation índices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 81, n. 2-3, p. 416-426, 2002.

HERRMANN, M.L. de P.; ROSA, R. de. O Relevo. In: IBGE. **Geografia do Brasil**: região sul. Rio de Janeiro, 1990. p. 55-84.

HOOPE, J.M. **Biomassa e nutrientes em platanus x acerifolia (Aiton) Willd. Estabelecido no município de Dom Feliciano – RS**. 2003. 143p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução José Carlos Neves Epiphânio (coordenador)... [et al.]. – São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 598p.

JOHNSON, L.F. Nitrogen influence on fresh-leaf NIR spectra. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 78, n. 3, p. 314–320, 2001.

KAUL, P. F. T. Geologia. In: IBGE. **Geografia do Brasil**: região sul. Rio de Janeiro: 1990. p. 29-54.

KENT, M.; COKER, P. Vegetation description and analysis. **Baffins Lane**: John Wiley & Sons, 1992. 363 p.

KLOK, C.J.; CHOWN, S.L. Assessing the benefits of aggregation: thermal biology and water relations of anomalous emperor moth caterpillars. **Functional Ecology**, v. 13, n. 3, p.417-427. 1999.

KRAMER, P. J.; KOSLOWSKI, T. **Fisiologia das árvores**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1972. 745 p.

LACEY, C.J., LEAF, A.L., TALLI, A.R. Growth and nutrients uptake by Flooded Gum (*E. grandis*) seedling subjected to various phosphorus supplies. *Aust. For.* 30 (3). 1966. p.212-222.

LAMB, D. Variations in the foliar concentrations of macro and micro elements in a Fast-Growing tropical Eucalypt. **Plant and Soil**. v. 45, p. 477-492, 1976.

LEITE, P.F.; KLEIN, R.M. Vegetação. In: IBGE. **Geografia do Brasil: região sul**. Rio de Janeiro, 1990. p. 113 - 150.

LILIENTHAL, H. et al. Utilisation of hyperspectral data for the evaluation of the spatial variability of the nitrogen status of wheat. *Agriculture. Aspects of Applied Biology*, v. 60, p. 189-194, 2000.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and interpretation**. 3. ed. New York: J. Wiley, 1994. 750 p.

LOPEZ-GRANADOS, F. et al. Leaf nutrient spatial variability and site-specific fertilization maps within olive (*olea europaea* L.) orchards. **European Journal of agronomy**, v. 21, n. 2, p. 209-222. 2004.

LORENZI, H. et al. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum. 2003. p. 368.

MADEIRA, A.C. et al. Avaliação do estado de nutrição de plantas jovens de *Eucalyptus glóbulus* por análise foliar e espectrorradiométrica. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 32, n 1, p. 13-26, jan. 2009.

MALAVOLTA, E., et al. Nota sobre deficiência e toxidez de Boro em espécies cultivadas do gênero *Eucalyptus*. **Revista Agricultura**, Piracicaba 53(4). p. 243-247. 1978.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980. 251 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARCHIORI, J.N.C. **Dendrologia das angiospermas: myrtales**. Santa Maria: UFSM, 1997.304p.

MELO, A.S. **Introdução aos modelos lineares na ecologia**. Material didático. Acesso em: 12 de fevereiro 2010. Disponível em: [www.ecologia.urgs.br](http://www.ecologia.urgs.br). p.44.

MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J.S. **Sensoriamento remoto: refletância dos alvos naturais**. Brasília: UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 262 p.

MENESES, P. R. Fundamentos de radiometria óptica espectral. In.: MENESES, R.; MADEIRA NETTO, J.S. **Sensoriamento remoto**: refletância dos alvos naturais. Brasília: UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p.15 - 40.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. MCT. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em 01 de outubro de 2009.

MIYAZAWA, M. et al. Análises químicas de tecido vegetal. In: SILVA, F.C. (Org.) **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicações para Transferência de tecnologia, 1999. cap. 4, p.171-224.

MORAES, E.C. **Fundamentos do sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 2002. 22 p.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicações**. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 320 p.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 73 p.

MULLER, I. **Forma de tronco e sortimentos de Madeira para *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden., manejado em alto fuste, na região Sudeste do estado do Rio Grande do Sul**. 2004. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004.

NOVO, E.M.L. de M. **Sensoriamento remoto**: princípios e aplicações. 2. ed. São Paulo: E. Blücher, 2002. 307 p.

NOVO, E.M.L. de M.; PONZONI F.J. **Introdução ao sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 2001. 68 p.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988. 434 p.

PACHECO, A.P. Sensoriamento remoto na faixa espectral do infravermelho termal. **Revista Geodésia Online**. Florianópolis. n.2. 2001. Disponível em: <http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/2001/02/AP2.htm>.

PALLARDY, S. **Physiology of wody plants**. San Diego: Academic Press, 2008. 454 p.

PEÑUELAS, J. et al. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status.-Int. **J. Remote Sens**. v.14, p.1887-1905, 1993.

PEREIRA, A. R. et al. Concentração e distribuição de nutrientes em *Eucalyptus grandis* em função da idade, cultivado na Região do Cerrado. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 59, p. 27-37, 1984.

PONZONI, F.J. Comportamento espectral da vegetação. In.: MENESES, R.; MADEIRA NETTO, J.S. **Sensoriamento remoto**: refletância dos alvos naturais. Brasília: UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p.157-199

PONZONI, F.J. et al. Comparação entre o fator de reflectancia bidirecional de um dossel de mudas de *Eucalyptus grandis* e o fator de reflectancia direcional hemisférico de suas folhas isoladas. **Revista Cerne**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 59-68, 2002.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São Jose dos Campos, SP: Parêntese, 2007. 127 p.

PREVEDELLO, J. **Preparo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. em argissolo**. 2008. 86 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

RAMEZOV, N.P. The method of studying the biological cycle of elements in forests. **Pochvovedenic**, v. 1, p.71 – 79, 1959.

REISSMANN, C.B.; WISNEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de Pinus sp. In.: GONÇALVES, L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. P. 135-166.

RICHEY, J.E.; NOBRE, C.; DESER, C. - Amazon River discharge and climate variability: 1903 to 1985. **Science**, New York, v. 256, p.101-103. 1989.

ROCHA, C.H.B. **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar**. Juiz de Fora: Ed. Do Autor, 2000. 220 p.

ROYSTON, P. Remark AS R94: a remark on Algorithm AS 181: the W test for normality. **Applied Statistics**, v. 44, p. 547–551. 1995.

SANTOS, A.M. **Análise de regressão** – aula2. Departamento de Saúde pública – UFMA. Acesso em: 12 de fevereiro de 2010. Disponível em: [www.pgsc.ufma.br/arquivos/aula2.pdf](http://www.pgsc.ufma.br/arquivos/aula2.pdf)

SBS. Sociedade Brasileira de Silvicultura. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/>> Acesso em: 12 nov. 2009.

SCHENONE, A.R. **Varição genética em progênies de polinização aberta de *Eucalyptus dunnii* Maiden**. 2000. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2000.

SCHONAU, A.P.G. Fertilization in South African Forestry. **South African forestry Journal**, Pretoria, v.125, p.1-19, 1983.

SCHEPERS, J.S. et al. Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. **J. Plant Physiol**, v.148, p. 523-529, 1996.

SCHNEIDER, P.R. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. 2. ed. Santa Maria: UFSM, CEPE, 1998, 236 p.

SCHUMACHER, M.V. et al. Biomassa e distribuição de nutrientes em um povoamento de *Pinus taeda* em Cambará do Sul, RS. In.: SIMPOSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL, 2. **Anais...** Viçosa: UFV, 2002. 652p.

SHAW, P. et al. Localization and processing from a polycistronic precursor of novel snoRNAs in maize. **J Cell Sci**, v.111, p.2121-8, 1998.

SILVA, E.L.S.; PONZONI, F.J. Comparação entre a reflectância hemisférica de folhas e a reflectância bidirecional de um dossel. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 19, n. 4, p. 466-478, 1995.

SILVA, J.C. Eucalipto: a madeira do futuro. **Revista da Madeira**, Curitiba edição especial, 114 p. 2001.

SILVA, R. M. **Introdução ao geoprocessamento**: conceitos, técnicas e aplicações. Novo Hamburgo: Feevale, 2007. 176 p.

SILVEIRA, R.L.V.A. ET. al. Avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*: diagnose visual, foliar e suas interpretações. In.: GONÇALVES, L.M.; BENEDETTI, V. (Eds). **Nutrição e fertilidade florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 79-104.

SIMOES, J.W.; COUTO, H.T.Z.; KAJIYA,S. Tolerância da *Araucária angustifólia* a teores crescentes de alumínio. São Paulo: **IPEF**, Piracicaba, n.6, p. 93-102, 1973.

SOUZA, C.L, RIBEIRO M.C; PONZONI F. J. Influência do tempo e do tipo de armazenamento na reflectância espectral de folhas de *Eucalyptus grandis* "ex-situ". **Revista Árvore**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 255-265, 1996.

STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C. Spectron SE-590 – manual de referencia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, e 1993, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1993. p. 2-12.

STORCK, L., et al. **Experimentação Vegetal**. 2ª ed. Santa Maria: Editora UFSM, Santa Maria, 2006. 198 p.

STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, RS: Emater/RS; UFRGS, 2002. 107 p.

SWITZER,G.L.; NELSON, L. E. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems:the first twenty yars. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 36, p. 143-147, 1972.

SZEKIELDA, K. **Satellite monitoring of the earth**. New York: J. Wiley, 1988. 326 p.

TAVARES, J.M. O que acontece com o município vizinho interessa? Um estudo de econometria espacial aplicado a Santa Catarina (1998-2002). **Textos de Economia**, Florianópolis, v. 12, n. 1, p. 38-57, jan./jun. 2009.

TEDESCO, M.J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2ed. Porto Alegre: Departamento de solos, UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico, 5).

THENKABAIL, P.S. et al. Thematic Mapper vegetation indices for determining soybean and corn growth parameters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 60, n. 4, p. 437- 442, 1994.

THENKABAIL, P.S.; SMITH, R.B.; DE-PAUW, E. Hyperspectral vegetation indices for determining agricultural crop characteristics. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 71, p.158-182, 2000.

TREVISAN, R. **Efeito da intensidade de desbaste nas características dendrométricas e tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. 2006. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2006.

TSAI, F.; PHILPOT W. Derivative Analysis of Hyperspectral Data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 66, p. 41–51, 1998.

VALERI, S.V.; AGUIAR, I.B.; CORRADINI, L. Composição química foliar e crescimento volumétrico de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden a aplicação de fósforo e calcário dolomítico. **IPEF**, Piracicaba, n. 26, p. 63-75, jan./dez.1993.

WATZLAWICK, L.F; KIRCHMER, F.F. Estimativas de biomassa e carbono utilizando imagens de satélite de alta resolução. In: Fixação de carbono: atualizações, projetos e pesquisas. Curitiba, 2004. **Anais...** p. 133-151.

WAUGH, G. Sawing of young, fast-grown eucalypts. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA E ENCONTRO SOBRE TECNOLOGIA APROPRIADAS DE DESDOBRO, SECAGEM E UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO, 1., 1998, Belo Horizonte, **Anais...** SIF, 1998. p. 68-81.

WEST, P.W. **Growing plantation forests**. Germany: Springer, 2006.

WINK, C. **Estoque de carbono em plantações de *Eucalyptus* sp. implantados em campos nativos**. 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

WITSCHORECK, R. **Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul – RS**. 2008. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

ZANINI, A.F. **Caracterização de alvos com imagens do sensor multiespectral aerotransportado eps-a 31t apoiados por dados de espectralradiometria**. 2008. 97 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1 – Tabela de interpretação espectroradiométrica entre os comprimentos de onda 490 a 985 nm

N° da Banda	Nome	Centro de $\lambda$ (nm)	Largura da $\lambda$ (nm)	Descrição ou significado
1	Azul	490	30	Razão mínima de reflectância de cobertura de solo para faixas azul e verde. Sensível à perda de clorofila, de maturação, senescência, e de efeitos de superfície do solo (Thenkabail et al. 1999). Muito sensível às taxas senescência e é geralmente um excelente estimador do rendimento de grãos. Também sensível aos pigmentos carotenóides (Blackburn, 1998; Tucker, 1977). O uso da banda azul entretanto, é questionável devido aos efeitos atmosféricos e ao pequeno contraste na reflectância do solo e da vegetação.
2	Verde I	520	15	Alteração positiva na reflectância com a variação no comprimento de onda deste espectro visível atingindo a máxima reflectância em torno do comprimento do verde. O plot da derivada de primeira ordem do espectro poderá mostrar a cobertura (por exemplo, Thenkabail et al. 1999, Elvidge e Chen, 1995). Nichol et al. (2000) encontraram para essa banda, sensibilidade para conteúdo de pigmento.
3	Verde II	550	25	Pico na banda do verde (ou ponto de máxima reflectância) no espectro visível. Está fortemente relacionado ao total de clorofila (Schepers et al. 1996).
4	Verde III	575	15	A alteração negativa na reflectância pela variação no comprimento de onda do espectro visível é máxima em torno desta faixa do verde. O plot da derivada de primeira ordem do espectro mostrará a cobertura (por exemplo, Thenkabail et al. 1999, Elvidge e Chen, 1995). Sensível ao índice de pigmento (Nichol et al. 2000).
5	Vermelho I	660	20	Pré-máxima de absorção de clorofila (ou mínimo da reflectância 1). A absorção na faixa do Vermelho (600-700 nm) varia significativamente devido às mudanças nos fatores tais como biomassa, o LAI, a superfície de solo exposto, os tipos de cultivares, a estrutura do dossel, o teor de nitrogênio, a umidade, e o stress nas plantas (Elvidge e Chen, 1995; Carter, 1997; Blackburn, 1998).
6	Vermelho II	675	15	Máximo de absorção da Clorofila em qualquer ponto da escala 350 à 1050 nm do espectro (ou de mínima reflectância). O maior contraste da cobertura de solo está em torno do centro desta faixa para a maioria de coberturas em fase de crescimento. (Thenkabail et al. 2000). Fortes correlações com clorofila A e clorofila B (Blackburn 1998 e 1999).
7	Vermelho Borda I	700	5	Absorção de clorofila pós-máxima (ou de mínima reflectância 2). Este é um ponto de mudança repentina na reflectância de absorção do vermelho próximo-máximo ao início do aumento significativo na reflectância ao longo do limite (borda) do vermelho. Encontrado o mais sensível ao stress de planta e foi encontrado a faixa VERMELHA mais sensível por Carter (1994)
8	Vermelho Borda II	720	15	Ponto crítico em torno do limite do vermelho em que há uma mudança máxima na inclinação do espectro de reflectância pela variação no comprimento de onda entre 350 e 1050 nm. O plot da derivada de primeira ordem mostrará a coleta do espectro (por exemplo, Thenkabail et al. 1999, Elvidge e Chen, 1995). Sensível às variações temporais no crescimento e na condição de colheita, resulta no deslocamento para o limite do vermelho. É sensível ao stress da fegetação e, fornece a informação adicional sobre o status de clorofila e do nitrogênio das plantas (Clevers, 1999, Shaw et al. 1998, Elvidge e Chen, 1995)
9	NIR	845	120	Centro da "curva do NIR". Para muitas coletas, uma faixa-larga ou uma faixa estreita, fornecerão o mesmo resultado devido à reflectância uniforme próxima durante toda a curva de NIR. Em tais exemplos, outras faixas ao longo da curva de NIR serão redundantes devido à informação similar neste comprimento de banda. Possui relação forte com clorofila total (Schepers et al. 1996).
10	NIR Pico I	905	15	Região de pico ou de máxima reflectância do espectro de NIR para determinados tipos e/ou estágios do crescimento da vegetação ou das culturas. As culturas tais como o algodão e o milho ou quando estas estiverem sob o stress ou senescência ocorrerá mudança significativa na reflectância ao longo da curva "ombro NIR" (740-940 nm). (Thenkabail et al. 2000, Thenkabail et al. 1999). Útil para determinar o índice de umidade da cultura (Peñuelas et al. 1993).
11	NIR Pico II	920	15	Região de pico de máxima da reflectância do espectro de NIR para determinados outros tipos e/ou estágios do crescimento da vegetação ou das culturas. As culturas tais como o algodão e o milho ou ainda quando estiverem sob o stress ou senescência, ocorrerá mudança significativa na reflectância ao longo da curva "ombro NIR" (740-940 nm). (Thenkabail et al. 2000, Thenkabail et al. 1999).
12	NIR sensível a umidade	975	10	Centro de depressão da curva sensível a umidade no NIR. A parte da depressão varia em 940 a 1040 nm, e tem tipicamente a reflectância mínima em torno de 975 nm (ou ponto do "mergulho máximo" na parte da depressão desta curva). Faixa sensível de umidade da planta (Peñuelas et al. 1995, Thenkabail et al. 2000). São praticáveis as medidas diretas do vapor de água e sobre os dosséis da vegetação. (Richey et al. 1989)

**Compilação:**

**Rudiney Soares Pereira**  
Novembro de 2007

**Universidade Federal de Santa Maria**  
**Centro de Ciências Rurais**  
**Departamento de Engenharia Rural**  
**Sensoriamento Remoto – Espectroradiometria**

## ANEXO 2 – Análise da variância para os macro nutrientes – Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre

### Análise da variância para nitrogênio

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F value	Pr(>F)
Reflectância	1	1.4	1.41	0.3237	0.5696
Estação Ano	3	5286.0	1762.00	404.2734	<2e-16 ***
Comp. Onda	1	0.0	0.00	4.44e-07	0.9995
EstacaoAnoXCompOnda	3	0.3	0.00	0.0218	0.9956
Resíduo	567	2471.2	4.36		

Onde: 0 \*\*\*\* 0,001 \*\*\* 0,01 \*\* 0,05 ' , 0,1 ' ' 1

### Análise da variância para Fósforo

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F value	Pr(>F)
Reflectância	1	0,000	0,000001	0,0001	0,9905
Estação Ano	3	0,6910	0,230339	26,1255	7,685x10 <sup>-16</sup>
Comp. Onda	1	0,0000	0,000007	0,0008	0,9779
EstacaoAnoXCompOnda	3	0,0004	0,000119	0,0135	0,9979
Resíduo	567	4,9990	0,008817		

Onde: 0 \*\*\*\* 0,001 \*\*\* 0,01 \*\* 0,05 ' , 0,1 ' ' 1

### Análise da variância para Potássio

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F value	Pr(>F)
Reflectância	1	0.13	0.128	0.1864	0.6661
Estação Ano	3	135.14	45.046	65.3700	<2e-16 ***
Comp. Onda	1	0.00	0.000	0.0002	0.9876
EstacaoAnoXCompOnda	3	0.03	0.011	0.0162	0.9972
Resíduo	567	390.72	0.689		

Onde: 0 \*\*\*\* 0,001 \*\*\* 0,01 \*\* 0,05 ' , 0,1 ' ' 1

### Análise da variância para Ca – Cálcio

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F value	Pr(>F)
Reflectância	1	0.6	0.59	0.0861	0.6661
Estação Ano	3	2170.8	723.60	104.8746	<2e-16 ***
Comp. Onda	1	0.02	0.017	0.0241	0.8768
EstacaoAnoXCompOnda	3	0.04	0.15	0.0215	0.9957
Resíduo	567	3912.1	6.90		

Onde: 0 \*\*\*\* 0,001 \*\*\* 0,01 \*\* 0,05 ' , 0,1 ' ' 1

### Análise da variância Mg – Magnésio

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F value	Pr(>F)
Reflectância	1	0.000	0.0002	0.0026	0.9597
Estação Ano	3	29.792	9.9308	117.2456	<2e-16 ***
Comp. Onda	1	0.000	0.0005	0.0055	0.9410
EstacaoAnoXCompOnda	3	0.001	0.0005	0.0059	0.9994
Resíduo	567	48.025	0.0847		

Onde: 0 \*\*\*\* 0,001 \*\*\* 0,01 \*\* 0,05 ' , 0,1 ' ' 1

**Análise da variância S – Enxofre**

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F value</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Reflectância	1	0.0298	0.0298	0.7615	0.3832
Estação Ano	3	22.9930	7.6643	195.9669	<2e-16 ***
Comp. Onda	1	0.0000	0.0000	0.0012	0.9726
EstacaoAnoXCompOnda	3	0.0004	0.0001	0.0033	0.9997
Resíduo	567	22.1756	0.0391		

Onde: 0 '\*\*\*' 0,001 '\*\*' 0,01 '\*' 0,05 ',' 0,1 ' ' 1

## Anexo 3 – Análise da variância para os micro nutrientes – B Cu Fe Mn Zn

### Análise da variância B – Boro

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F value	Pr(>F)
Reflectância	1	4.6	4.6	0.2018	0.6534
Estação Ano	3	13589.1	4529.7	199.1765	<2e-16 ***
Comp. Onda	1	0.2	0.2	0.0089	0.9247
EstacaoAnoXCompOnda	3	0.4	0.1	0.0055	0.9994
Resíduo	567	12894.8	22.7		

Onde: 0 \*\*\*\* 0,001 \*\*\* 0,01 \*\* 0,05 ‘,’ 0,1 ‘ ’ 1

### Análise da variância Cu - Cobre

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F value	Pr(>F)
Reflectância	1	0.03	0.03	0.0204	0.8864
Estação Ano	3	1596.08	532.03	313.1948	<2e-16 ***
Comp. Onda	1	0.00	0.00	0.0018	0.9664
EstacaoAnoXCompOnda	3	0.03	0.01	0.0063	0.9993
Resíduo	567	963.17	1.70		

Onde: 0 \*\*\*\* 0,001 \*\*\* 0,01 \*\* 0,05 ‘,’ 0,1 ‘ ’ 1

### Análise da variância Fe – Ferro

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F value	Pr(>F)
Reflectância	1	11	11	0.0680	0.7944
Estação Ano	3	116717	38906	242.6305	<2e-16 ***
Comp. Onda	1	0	0	4.886e-07	0.9994
EstacaoAnoXCompOnda	3	3	1	0.0059	0.9994
Resíduo	567	90918	160		

Onde: 0 \*\*\*\* 0,001 \*\*\* 0,01 \*\* 0,05 ‘,’ 0,1 ‘ ’ 1

### Análise da variância Mn – Manganês

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F value	Pr(>F)
Reflectância	1	75	75	0.0004	0.9846
Estação Ano	3	37125823	12375274	61.5853	<2e-16 ***
Comp. Onda	1	1442	1442	0.0072	0.9325
EstacaoAnoXCompOnda	3	4794	1598	0.008	0.9990
Resíduo	567	113936041	200945		

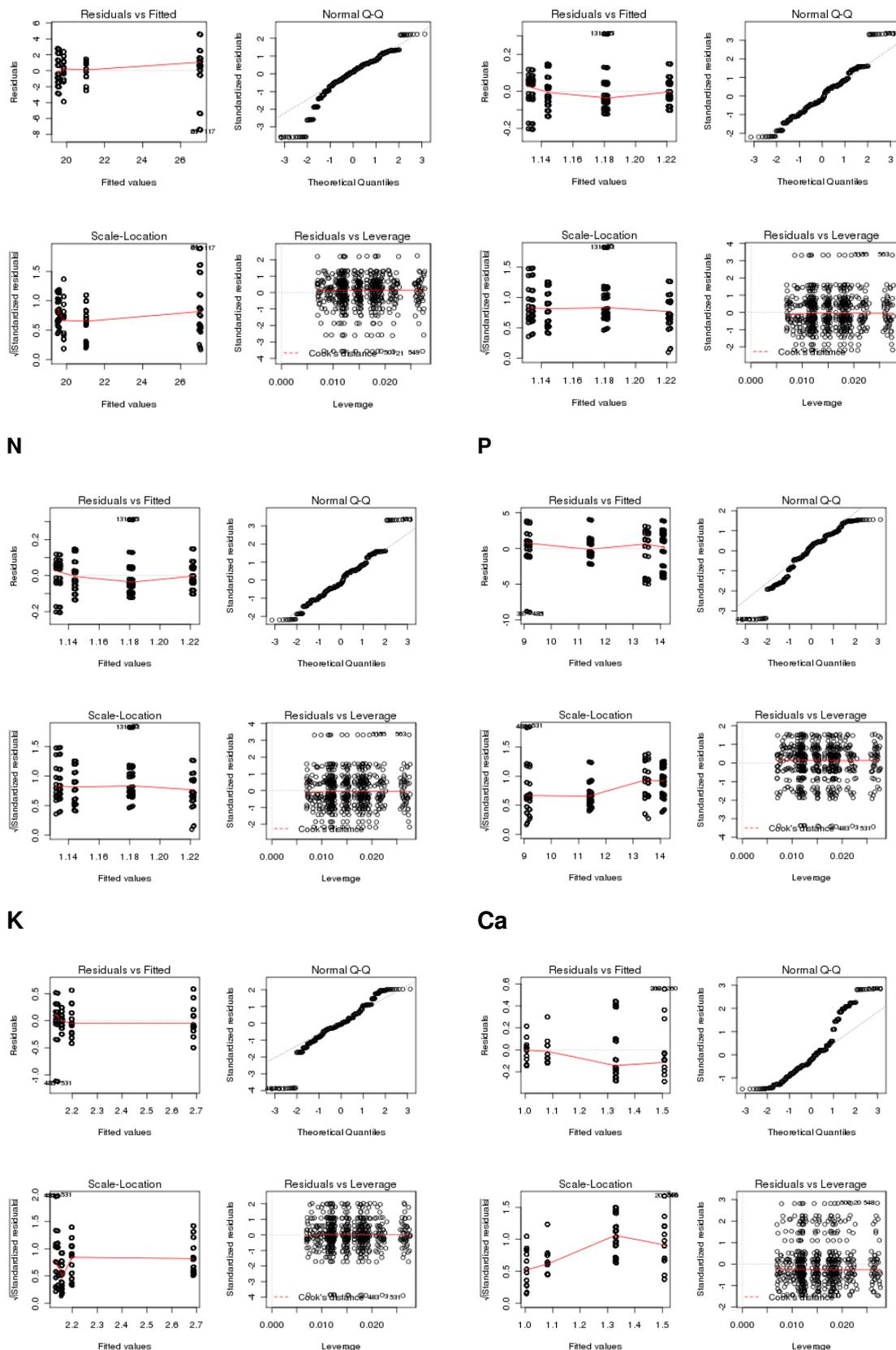
Onde: 0 \*\*\*\* 0,001 \*\*\* 0,01 \*\* 0,05 ‘,’ 0,1 ‘ ’ 1

### Análise da variância Zn – Zinco

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F value	Pr(>F)
Reflectância	1	0.04	0.037	0.0114	0.9149
Estação Ano	3	704.51	234.838	72.8452	<2e-16 ***
Comp. Onda	1	0.01	0.011	0.0033	0.9539
EstacaoAnoXCompOnda	3	0.04	0.012	0.0038	0.9997
Resíduo	567	1827.89	3.224		

Onde: 0 \*\*\*\* 0,001 \*\*\* 0,01 \*\* 0,05 ‘,’ 0,1 ‘ ’ 1

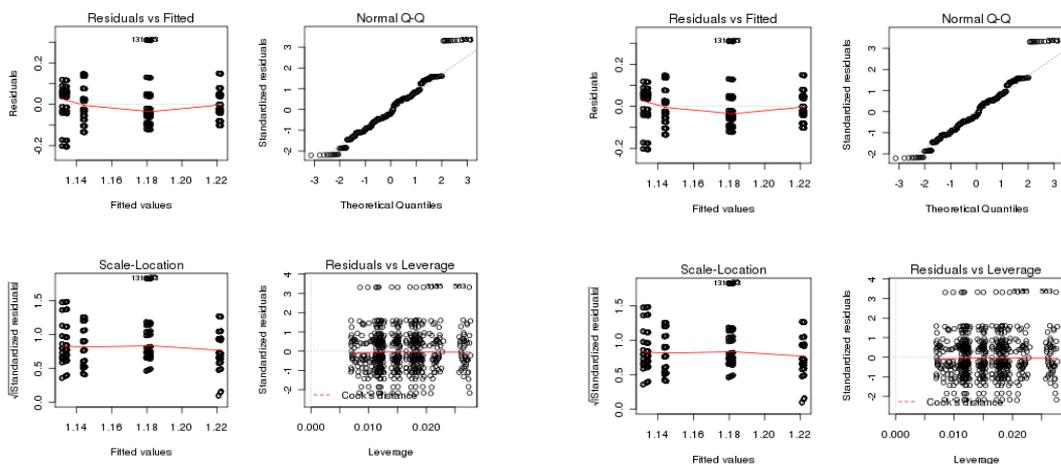
## Anexo 4 – Análise de resíduos para os macro nutrientes – Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre



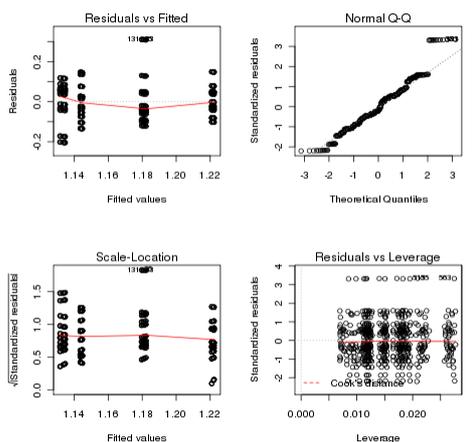
Mg

S

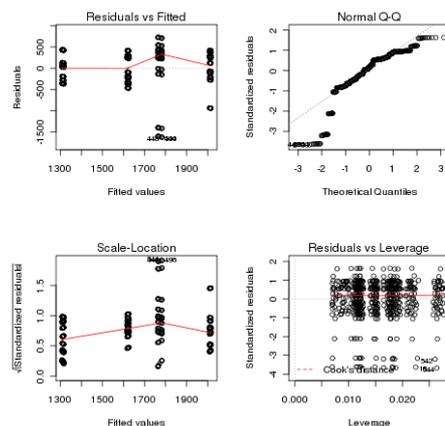
## Anexo 5 – Análise de resíduos micro nutrientes – Boro, Cobre, Ferro, Manganês, Zinco



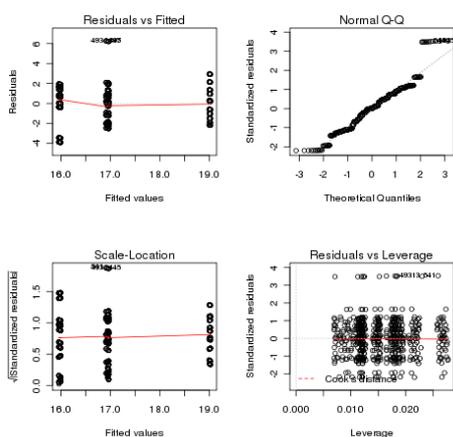
**Cu**



**Fe**



**Mn**



**Zn**

**Zn**