

SECRETARIA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5407-PUD/051

ALTERAÇÕES NA REFLECTÂNCIA DE FOLHAS "ex situ":  
UMA ABORDAGEM METODOLÓGICA

Flávio Jorge Ponzoni  
Mário Takao Inoe(1)

(1) Escola Superior de Florestas  
Universidade Federal do Paraná

INPE  
São José dos Campos  
Abril de 1992

528.711.7

PONZONI, F.J.; INOE, M.T.

Alterações na reflectância de folhas  
"ex situ": uma abordagem metodologica. /  
F.J. Ponzoni; M.T. Inoe. -- São José dos  
Campos: INPE, 1992. 57p. -- (INPE-5407-  
PUD/051)

1. Reflectância espectral. 2. Compor-  
tamento espectral. 3. Vegetação.  
I. Título

### RESUMO

São apresentados os aspectos fundamentais da interação da radiação eletromagnética com folhas isoladas, bem como dos procedimentos convencionais adotados no estudo dessa interação. É descrito um experimento conduzido com folhas de Eucalipto e acículas de Araucária enfatizando as metodologias empregadas na coleta e registro da reflectância, considerando a extração desses materiais da planta.

CHANGES IN THE REFLECTANCE OF "ex situ" LEAVES:  
A METHODOLOGICAL APPROACH

ABSTRACT

The main aspects related to the interaction between the eletromagnetic radiation and detached leaves are presented. An experiment with Eucalipto and Araucaria detached leaves is described, including the description of the methodologies utilized in the collection and storage of the reflectance.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	v
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	1
2.1 - Conceitos radiométricos básicos.....	2
2.1.1 - Quantificando a radiação.....	2
2.1.2 - A radiação eletromagnética solar e sua interação com a vegetação.....	8
2.1.3 - Estrutura microscópica da folha.....	11
2.1.4 - Reflectância, absortância e transmitância de uma folha.....	12
2.1.4.1 - Região do visível.....	14
2.1.4.2 - Clorofila.....	15
2.1.4.3 - Carotenóides.....	17
2.1.4.4 - Xantofilas.....	17
2.1.4.5 - Região do infravermelho próximo (0,7 a 1,3um).....	20
2.1.4.6 - Região do infravermelho médio (1,3 a 2,6um).....	20
2.2 - Princípios gerais da instrumentação envolvida na coleta da REM.....	22
2.3 - A instrumentação utilizada na determinação da reflectância de folhas isoladas.....	24
3 DOS EXPERIMENTOS CONDUZIDOS .....	26
3.1 - Considerações gerais.....	26
3.2 - Material e métodos.....	26
3.2.1 - Radiômetro utilizado.....	26
3.2.2 - Local e condições adotadas na condução das medições espectrorradiométricas.....	27
3.2.3 - Delineamento estatístico.....	29
3.2.4 - Coleta, armazenamento e orientação das folhas de Eucalipto.....	29
3.2.5 - Coleta e orientação das folhas de Araucária.....	30
3.2.6 - Medições espectrorradiométricas.....	31
3.2.7 - Processamento dos dados.....	32
3.2.7.1 - Simulação das Bandas TM.....	32
3.3 - Resultados e discussões.....	32
3.3.1 - Eucalipto.....	32
3.3.1.1 - Análise de variância.....	34
3.3.2 - Araucária.....	39
3.3.2.1 - Análise de variância.....	41
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Conceito de densidade de fluxo radiante.....	3
2 - Conceito de ângulo sólido.....	4
3 - Intensidade radiante de uma fonte pontual.....	5
4 - Conceito de radiância.....	5
5 - Um esquema do procedimento de coleta da REM.....	10
6 - Seção transversal de uma folha mostrando os possíveis caminhos da luz incidente.....	13
7 - Curva de reflectância típica de uma folha verde.....	14
8 - Espectro de absorção de alguns pigmentos.....	15
9 - Espectro de absorção da clorofila em solução de acetona.....	16
10 - Espectro de absorção dos carotenóides.....	17
11 - Curva de reflectância de folhas de <u>Coleus sp.</u> ...	18
12 - Curva de reflectância de folhas de <u>Coleus sp.</u> ...	19
13 - A pigmentação nas propriedades espectrais de plantas	19
14 - Influência do conteúdo de umidade na reflectância de folhas de milho.....	21
15 - Estrutura funcional de um espectrofotômetro.....	22
16 - Esquema de um espectrofotômetro.....	23
17 - Esquema funcional de um espectrorradiômetro.....	24
18 - Microespectrofotômetro Lietz utilizado por Gausman..	25
19 - Configuração básica do radiômetro Spectron SE-590...	27
20 - Reflectância espectral de folhas de Eucalipto submetidas a diferentes períodos de armazenamento.....	33
21 - Reflectância espectral das folhas de Eucalipto x bandas TM por tempo de armazenamento.....	34
22 - Reflectância das acículas de Araucária provenientes de indivíduos que apresentavam diferentes níveis de danos.....	40
23 - Reflectância x bandas TM, por tratamento (nível de dano).....	41

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1 - Conceitos radiométricos.....	8
2 - Médias dos fatores de reflectância para cada tratamento para a banda TM1.....	35
3 - Médias dos fatores de reflectância para cada tratamento para a banda TM2.....	36
4 - Médias dos fatores de reflectância para cada tratamento para a banda TM3.....	37
5 - Análise de variância para as médias dos tratamentos para a banda TM1.....	37
6 - Análise de variância para as médias dos tratamentos para a banda TM2.....	38
7 - Análise de variância para as médias dos tratamentos para a banda TM3.....	39
8 - Médias dos fatores de reflectância para cada tratamento para a banda TM1.....	42
9 - Médias dos fatores de reflectância para cada tratamento para a banda TM2.....	43
10 - Médias dos fatores de reflectância para cada tratamento para a banda TM3.....	44
11 - Análise de variância para as médias dos tratamentos banda TM1.....	44
12 - Análise de variância para as médias dos tratamentos banda TM2.....	45
13 - Análise de variância para as médias dos tratamentos banda TM3.....	46

## 1 INTRODUÇÃO

A otimização do uso e análise de dados de sensoriamento remoto só é atingida através do conhecimento dos processos envolvidos na interação entre a radiação eletromagnética e os objetos sensoriados. Para tanto, esforços no sentido de melhor conhecer esta interação estão sendo conduzidos em todo o mundo.

Especificamente em estudos da vegetação, conduzidos a luz das técnicas de sensoriamento remoto, seus objetivos têm se concentrado na identificação de tipos de vegetação, na caracterização de seu estágio de desenvolvimento e/ou sanitário, na quantificação da fitomassa (expressa através de índices como o índice de Área Foliar), na determinação da extensão territorial ocupada por tipologias específicas e na caracterização arquitetônica de copas individuais e/ou de dosséis.

Alguns destes objetivos têm sido alcançados através do uso dos chamados Modelos de Reflectância de Dosséis, que são modelos matemáticos que promovem uma conexão lógica entre parâmetros biofísicos e a qualidade e intensidade da radiação refletida por dosséis. Muitos destes modelos consideram as propriedades espectrais de folhas, frutos, galhos, flores e demais elementos da vegetação, como parâmetros influenciadores da reflectância de dosséis. As propriedades espectrais representam as características de um dado objeto quanto a reflexão, transmissão e absorção da radiação eletromagnética nele incidente, e sua determinação envolve o uso de equipamentos e metodologias específicos.

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados de uma avaliação metodológica de aquisição de dados espectrorradiométricos que, transformados em dados de reflectância, permitiram detectar diferenças na reflectância de folhas arrancadas de Eucalyptus sp. (Eucalipto) submetidas a diferentes tempos de armazenamento, e de Araucaria angustifolia (Araucária) sujeitas a níveis diferentes de danos causados pelo ataque de um fungo em seu sistema radicular, o qual se manifesta em suas partes aéreas. Os resultados permitem ampliar o atual conhecimento dos fenômenos envolvidos no processo de coleta de dados dessa natureza, visando a definição adequada de metodologias a serem adotadas futuramente.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este Capítulo tem como objetivo fornecer algumas informações sobre conceitos radiométricos básicos e



apresentar uma breve revisão sobre a reflectância espectral de folhas isoladas.

## 2.1 - CONCEITOS RADIOMÉTRICOS BÁSICOS

A informação usada em sensoriamento remoto é derivada de medidas quantitativas das propriedades da radiação eletromagnética (REM) que chega até o sensor.

A nomenclatura a ser aqui apresentada é internacionalmente aceita, contudo não constitui um sistema rígido que não possa apresentar modificações de autores para autores, ou de país para país.

### 2.1.1 - QUANTIFICANDO A RADIAÇÃO

**ENERGIA RADIANTE:** é uma medida da capacidade da radiação realizar um trabalho físico, tal como mover objetos através da força, aquecer um objeto, ou causar alguma alteração no estado da matéria. A energia radiante causa no elemento detetor do sensor mudanças físicas específicas que são usadas na sua quantificação. O símbolo mais frequentemente usado para expressar a energia radiante é  $Q$  e sua unidade de medida é o Joule (J).

**FLUXO RADIANTE :** é definido como o tempo requerido pela energia para percorrer um dado espaço. É geralmente representado pelo símbolo  $\Phi$  e é expresso em Joules/segundo (J/s).

**DENSIDADE DE FLUXO RADIANTE :** é frequente a necessidade de se conhecer a quantidade de fluxo radiante por unidade de área quando este é interceptado por uma superfície. O fluxo radiante interceptado dividido pela área da superfície em questão é a densidade média do fluxo radiante. Cada pequena fração da superfície plana pode ser visualizada como interceptando uma igualmente pequena fração do fluxo; a densidade de fluxo em cada uma destas frações da superfície plana é a quantidade de fluxo interceptado pela fração da superfície, dividido pela área dessa fração. Quando estas frações são tomadas infinitesimalmente pequenas, esta razão pode ser considerada como a densidade de fluxo radiante sobre cada ponto da superfície plana.

A densidade de fluxo radiante, no caso de um fluxo incidente sobre uma superfície plana, é chamada Irradiância, e é representada pelo símbolo  $E$  e expressa em Watt/m<sup>2</sup> (W/m<sup>2</sup>). É importante notar que a direção do fluxo não foi especificada até o momento; ou seja, não foi considerado até agora de que direção procede o fluxo dentro da hemisfera sobreposta à superfície plana. A Figura

1 ilustra o conceito de densidade de fluxo radiante.

A Irradiância sobre uma superfície pode ser diferente de um ponto para outro ponto. Se ela for constante, então o fluxo interceptado é dado por:

$$\Phi = E \cdot A$$

onde: A=área da superfície.

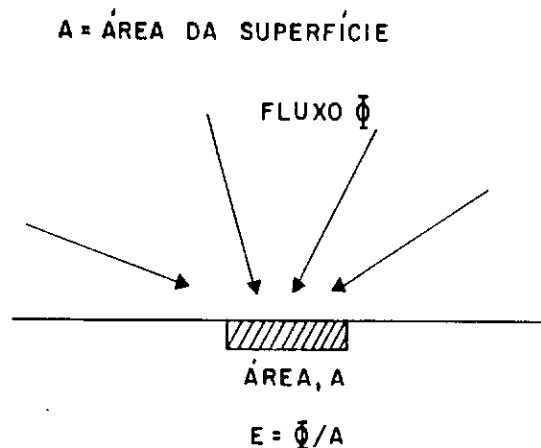


Fig. 1 - Conceito de densidade de fluxo radiante.

FONTE: Suits(1983)

Enquanto a Irradiância se refere a densidade de fluxo radiante que chega até uma superfície, essa mesma densidade que deixa uma dada superfície é chamada Emitância, a qual é representada pelo símbolo  $M$  e é expressa nas mesmas unidades da irradiância ( $W/m^2$ ). Aqui também a direção tomada pelo fluxo ao deixar um dado ponto da superfície não é especificada.

**MEDIDAS ANGULARES :** como mencionado anteriormente, a direção tomada pelo fluxo radiante não foi considerada; contudo ela constitui um dos pontos fundamentais em sensoriamento remoto. Antes de aprofundar a discussão sobre ela, faz-se necessário um breve comentário sobre as grandezas angulares mais importantes para o problema em questão.

São dois os sistemas de medidas angulares tradicionalmente usados: graus e radianos. Um grau é um ângulo subtendido por um arco de um círculo tendo  $1/360$  de circunferência. O radiano é um ângulo subtendido por um arco de um círculo que tem seu perímetro igual a seu raio. O ângulo subtendido por um arco de comprimento  $L$ , num círculo de raio  $r$  é dado por  $L/r$  radianos.

O conceito de ângulo sólido é outro conceito importante para as duas medidas quantitativas de fluxo radiante (E e M). O sistema de medida angular mais comumente usado pela literatura na apresentação deste conceito é o radiano. A Figura 2 ilustra o conceito de ângulo sólido.

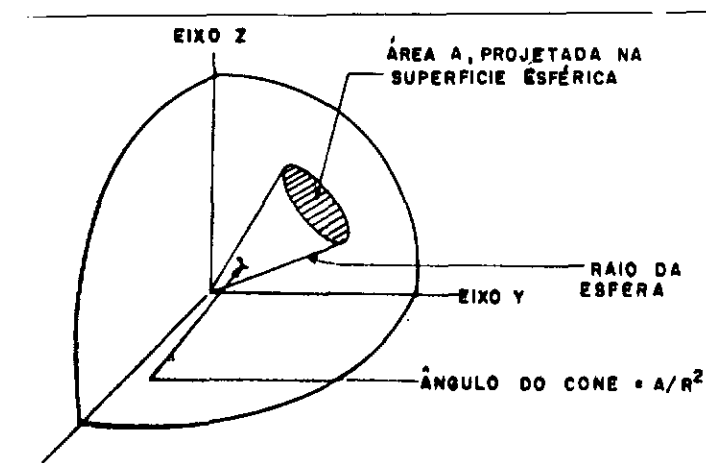


Fig. 2 - Conceito de ângulo sólido.

FONTE: Suits(1983)

O ângulo de um cone formado por uma parte de uma superfície esférica de área A é igual a essa área A, dividido pelo quadrado do raio da esfera. A unidade deste ângulo é dada pelo esferorradiano (sr). Desde que a área da superfície de uma esfera é dada por  $4\pi R^2$ , existem 4 esferorradianos de ângulo sólido numa esfera.

**INTENSIDADE RADIANTE** : a intensidade radiante de uma fonte numa dada direção é o fluxo radiante por unidade de ângulo sólido que deixa essa fonte nessa direção. O símbolo mais frequentemente usado para representar a intensidade radiante é I e é expressa em Watt/esferorradianos (W/sr). Se uma fonte é isotrópica, ou seja, radia igualmente em todas as direções, então a intensidade radiante dessa fonte que emite um fluxo é:

$$I = \Phi / 4\pi \text{ W/sr}$$

O termo intensidade radiante só se aplica a uma fonte pontual, assim como mostrado na Figura 3. O termo fonte pontual significa que as dimensões físicas não interferem na discussão.

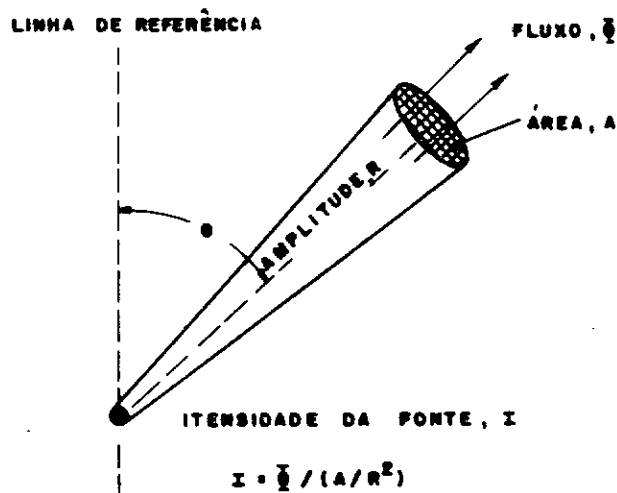


Fig. 3 - Intensidade radiante de uma fonte pontual.

FONTE: Suits(1983)

RADIÂNCIA : é definida como o fluxo radiante por unidade de ângulo sólido que deixa uma fonte numa dada direção por unidade de área projetada da fonte nessa ou naquela direção. A Figura 4 ilustra o conceito de Radiância.

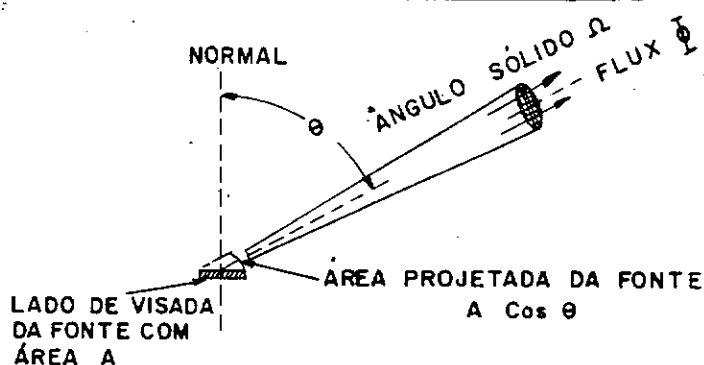


Fig. 4 - Conceito de radiância.

FONTE: Suits(1983)

O símbolo normalmente utilizado para expressar a Radiância é  $L$  e sua unidade de medida é Watt/m<sup>2</sup>.esfereorradiano (W/m<sup>2</sup>.sr). O conceito de Radiância corresponde ao conceito de brilho. Muitos aspectos em sensoriamento remoto se

relacionam com o fluxo radiante que deixa extensas áreas na direção do sensor. Consequentemente o conceito de Radiância é frequentemente usado.

A área projetada numa direção que faz um ângulo com a normal de uma fração de uma área plana  $A$  é dada por  $A \cdot \cos \theta$ . Se essa fração plana de área for tão pequena a ponto de ser considerada uma fonte pontual, a intensidade radiante dessa fração na direção é :

$$I=L.A.\cos\theta$$

A fonte plana na qual a radiância  $L$  não varia como uma função do ângulo de visada é chamada fonte Lambertiana. Um pedaço de papel branco quando iluminado pela luz difusa do céu é uma boa aproximação de uma fonte Lambertiana, uma vez que a percepção visual de seu brilho não varia com a variação do ângulo de observação.

QUANTIDADES ESPECTRAIS : na apresentação das grandezas  $Q, \Phi, M, I$  e  $L$ , a energia foi tratada de forma global; contudo o fluxo radiante é composto por diversos comprimentos de onda. Em sensoriamento remoto é comum considerar as chamadas bandas espectrais no tratamento da radiação eletromagnética. Desta forma faz-se importante definir a banda espectral considerada na quantificação de cada uma das grandezas apresentadas. Se se desejasse comparar o fluxo radiante de todos os componentes com comprimentos de onda compreendidos na faixa ou banda de 0,4um a 0,7 um com o fluxo radiante de todos os componentes com comprimentos de onda compreendidos na faixa de 0,7um a 1,1um, então o símbolo deveria ser acompanhado da banda ou faixa selecionada [  $\Phi(0,4$  a  $0,7\text{um})$  e  $\Phi(0,7$  a  $1,1\text{um})$ ]. Uma alternativa para simplificar essa representação é atribuir números para cada uma destas bandas. Assim a banda 1 poderia ser definida de 0,4 a 0,7um e a banda 2 de 0,7 a 1,1um. A representação simplificada ficaria:  $\Phi_1$  e  $\Phi_2$ , respectivamente.

O fluxo radiante não se distribui igualmente ao longo do espectro eletromagnético e a maneira como ele se distribui é chamada distribuição espectral. A distribuição espectral do fluxo radiante é determinada medindo-se o fluxo radiante em estreitos intervalos de comprimento de onda. Se estes intervalos forem tomado infinitesimalmente pequenos, surge o conceito de fluxo radiante espectral, que é representado pelo símbolo  $\Phi_\lambda$  e é expresso por Watt/unidade de comprimento de onda ( $W/\lambda$ ). Os valores do fluxo radiante espectral para todos os comprimentos de onda especificam a distribuição espectral do fluxo radiante.

O mesmo conceito pode ser aplicado às demais quantidades radiométricas. Assim:

$Q_\lambda$  = energia radiante espectral;  
 $E_\lambda$  = Irradiância espectral;  
 $M_\lambda$  = Exitância espectral;  
 $I_\lambda$  = Intensidade radiante espectral;  
 $L_\lambda$  = Radiância espectral.

REFLECTÂNCIA, TRANSMITÂNCIA E ABSORTÂNCIA HEMISFÉRICAS: estas constituem as três principais razões entre quantidades radiométricas. A reflectância hemisférica, representada por  $\rho$ , é definida pela razão entre a Exitância refletida por um material plano e a Irradiância que chega até esse material. Assim:

$$\rho = M \text{ refletida} / E$$

A transmitância hemisférica representada por,  $\tau$  é definida pela razão entre a Exitância que deixa o lado oposto de um material plano pela Irradiância.

$$\tau = M \text{ transmitida} / E$$

A absortância hemisférica, representada por  $a$  é definida pela relação :

$$a = 1 - \rho + \tau$$

Estas definições implicam que a energia radiante deve ser conservada. O fluxo incidente retorna pela reflexão, é transmitido ou é transformado em alguma outra forma de energia. As correspondentes quantidades hemisféricas espectrais podem ser definidas com o uso da Exitância espectral e Irradiância espectral, tal que a reflectância hemisférica espectral ( $\rho_\lambda$ ) fica então:

$$\rho_\lambda = M \text{ reflec.} / E_\lambda$$

A transmitância hemisférica espectral ( $\tau_\lambda$ );

$$\tau_\lambda = M \text{ trans.} / E_\lambda$$

E finalmente a absortância hemisférica espectral;

$$a_\lambda = 1 - \rho_\lambda + \tau_\lambda$$

A Tabela 1 apresenta um resumo dos conceitos radiométricos apresentados.

Tabela 1 - Conceitos radiométricos

Energia radiante	Q	Joules	Capacidade da radiação produzir trabalho.
Fluxo radiante	$\bar{\Phi}$	Watts, W	Tempo de fluxo de energia.
Irradiância	E	W/m <sup>2</sup>	Fluxo radiante incidente por unidade de área.
Exitância	M	W/m <sup>2</sup>	Fluxo radiante que deixa uma superfície.
Intensidade radiante	I	W/sr	Fluxo radiante que deixa uma fonte pontual por unidade de ângulo sólido.
Radiância	L	W/sr.m <sup>2</sup>	Intensidade radiante por unidade de área numa específica direção.
Reflectância hemisférica	$\rho$	adimens.	reflet./ incid.
Transmitância hemisférica	$\tau$	adimens.	trans./ incid.
Absortância hemisférica	$\alpha$	adimens.	absor./ incid.

### 2.1.2-A RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA SOLAR E SUA INTERAÇÃO COM A VEGETAÇÃO

Além de fornecer a energia que é absorvida pelos vários componentes da superfície terrestre, o Sol fornece ainda a REM que é refletida por essa superfície. A maioria dos sistemas de coleta remota de dados colocados a bordo de aeronaves e satélites registra essa REM refletida.

O principal parâmetro considerado na região do visível do espectro eletromagnético, responsável pelas mudanças na intensidade da REM oriunda de vários tipos de superfícies é a reflectância, ou seja, a razão entre a REM recebida ou incidente pela REM refletida ( $\rho$ ). Este parâmetro é influenciado por inúmeras variáveis e condições e apresenta variações em regiões particulares

do espectro eletromagnético. A escolha de um tipo e uso de um sensor é amplamente dependente dessa variação apresentada pela reflectância.

Apesar da reflectância hemisférica ter sido definida anteriormente num sentido amplo, é necessária a extensão de seu conceito para torná-lo aplicável à vários problemas que envolvem o sensoriamento remoto.

As superfícies terrestres, em algumas regiões do espectro eletromagnético, apresentam grandes variações em suas propriedades refletidas, mesmo quando a energia por elas refletida é observada ou medida independentemente da intervenção da atmosfera existente entre a superfície e o sensor. Variações na reflectância das superfícies terrestres se devem a dependência da reflectância em relação ao comprimento de onda, ângulos de incidência e visada e as propriedades físicas e elétricas destas superfícies. Dentro deste contexto, tem-se a reflectância de coberturas vegetais (dosséis) que o produto da interação da radiação eletromagnética e os diversos elementos que as compõem, bem como dos demais fatores mencionados.

A Figura 5 ilustra as origens da radiação eletromagnética dentro de um contexto agrícola, que pode ser registrada por sensores colocados a bordo de aeronaves e satélites.

A radiação solar atinge objetos existentes na superfície terrestre, assim como um pé de laranja, por exemplo. As propriedades espectrais dessa planta determinam a quantidade de radiação a ser refletida ao espalhada numa direção específica. A radiação refletida é atenuada pela atmosfera, mas resíduos dessa radiação tornam-se disponíveis para o sensor.

Existem duas formas da distribuição direcional da radiação refletida:

- a) a reflexão difusa ou Lambertiana, na qual a radiação incidente é espalhada uniformemente em todas as direções (em todo um hemisfério);
- b) a reflexão especular, na qual a radiação incidente é refletida ao longo de um plano definido pela normal à superfície e o raio incidente.

A reflectância de uma planta verde sob condições naturais é uma resposta integrada oriunda de suas estruturas reprodutivas, solo, folhas, ramos, poeira e uma



série inumerável de outros fatores, muitos dos quais originados das folhas. A reflectância das copas de plantas pode ser melhor interpretada se as propriedades espectrais das folhas forem entendidas.

Uma folha típica é extremamente heterogênea. Medidas espectrais de uma folha devem ser consideradas como produtos da interação da radiação eletromagnética com cêras, células, celulose, ligninas, gorduras, proteínas, óleos, açúcares e outras substâncias. Medidas conduzidas em laboratório na determinação de constantes óticas de folhas podem ser usadas em modelos matemáticos destinados a prever a reflectância de copas; em muitos casos porém, essa reflectância é melhor determinada experimentalmente.

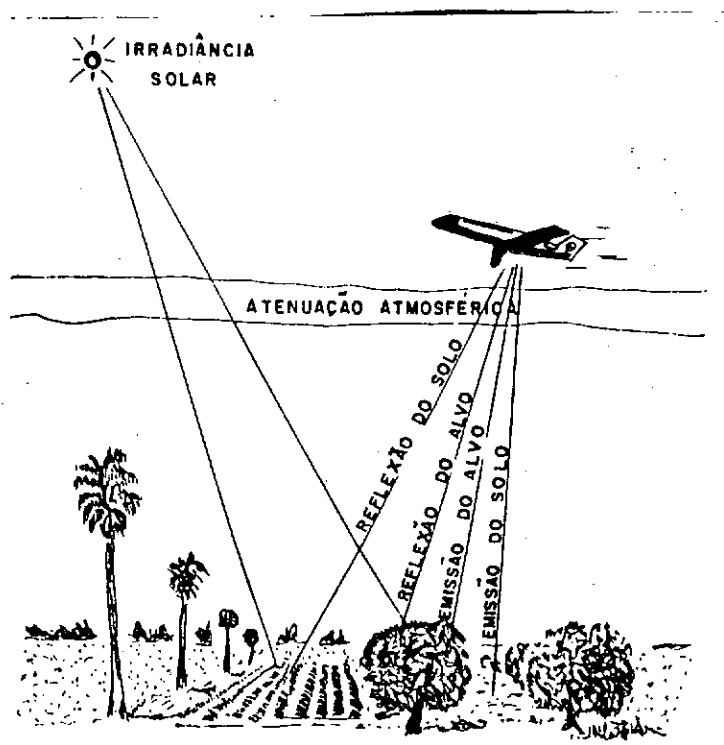


Fig. 5 - Um esquema do procedimento de coleta da REM.

FONTE: Suits(1983)

Goel(1988) apresenta as bases conceituais da física da interação da radiação solar com as copas. Segundo este autor as folhas constituem um dos componentes da vegetação a ser considerado na proposição de modelos de reflectância de copas.

O estudo da interação da radiação eletromagnética com a vegetação é conduzido através da análise das propriedades espectrais da vegetação. Estas propriedades são descritas pelas reflectância, transmitância e absortância hemisféricas. Estes coeficientes dependem da composição, morfologia, estrutura interna, estado de maturidade e temperatura da planta; comprimento de onda, condições de umidade, etc. Serão discutidos os fatores que influenciam estes coeficientes sobre um aspecto microscópico (uma única folha). Tem sido dada ênfase à reflectância, uma vez que este coeficiente assume uma maior importância sob o ponto de vista do sensoriamento remoto. As discussões serão principalmente concentradas nos coeficientes hemisféricos porque poucos experimentos têm sido conduzidos nos demais (direcional e bidirecional). Para analisar as propriedades espectrais de uma folha se faz necessário o entendimento de sua estrutura e dos processos básicos de fotossíntese e respiração (Kumar, 1972).

### 2.1.3-ESTRUTURA MICROSCÓPICA DA FOLHA

Uma folha típica é constituída por três tecidos básicos: ela é coberta por uma camada de células protetoras epidérmicas, a qual muitas vezes desenvolve uma fina e relativamente impermeável superfície externa. Abaixo da epiderme encontra-se o mesófilo fotossintético, o qual por sua vez, frequentemente é subdividido numa camada ou camadas de células paliçádicas alongadas, arranjadas perpendicularmente à superfície da folha. As células do parênquima são ocupadas por seiva e protoplasma. Ainda no mesófilo estão os espaços intercelulares cheios de ar, cujo acesso para o meio externo é feito através dos estômatos. Esta rede de passagens de ar constitui a via de acesso na qual o CO<sub>2</sub> alcança as células fotossintéticas e na qual o O<sub>2</sub> liberado na fotossíntese retorna à atmosfera externa. Uma terceira característica estrutural da folha é o tecido vascular. A rede de tecidos condutivos não serve somente para suprir a folha com água e nutrientes do solo, mas também constitui a passagem pela qual fluem os produtos da fotossíntese, da folha em direção às demais partes da planta. As estruturas das células das folhas são muito variáveis, dependendo da espécie e das condições ambientais.

A estrutura celular da folha é grande quando comparada com os comprimentos de onda da luz. As dimensões típicas das células paliçádicas, do parênquima espososo e células epidérmicas são: 15µm x 15µm x 60µm, 18µm x 15µm x 20µm e 18µm x 15µm x 20µm, respectivamente. A fina camada impermeável tem uma

espessura muito variável, oscilando entre 3µm a 5µm. Clements(1904), apud Kumar(1972), apresentou uma excelente discussão sobre as dimensões físicas e relações da estrutura foliar. Os cloroplastos suspensos no protoplasma tem geralmente 5µm a 8µm de diâmetro e cerca de 1µm de comprimento. Cerca de 50 cloroplastos podem estar presentes em cada célula do parênquima. Dentro dos cloroplastos estão os grana, dentro dos quais encontra-se a clorofila. Os grana podem ter 0,5µm de comprimento e 0,05µm de diâmetro.

Os constituintes da folha que são considerados os mais importantes sob ponto de vista da interação com a radiação são: celulose, solutos (íons, moléculas), espaços intercelulares e pigmentos existentes dentro dos cloroplastos.

#### 2.1.4-REFLECTÂNCIA, ABSORTÂNCIA E TRANSMITÂNCIA DE UMA FÓLHA

As propriedades espectrais de uma folha são função da composição, morfologia e estrutura interna. Desde que as características da folha são geneticamente controladas, existirão portanto diferenças em suas propriedades espectrais. Como a cor e composição da folha são também função da idade, suas propriedades espectrais deverão variar com a idade, dentro de um mesmo grupo genético.

A Figura 6 ilustra os possíveis caminhos da luz ou radiação incidente sobre uma folha.

Uma pequena quantidade de luz é refletida das células da camada superficial; a maior parte é transmitida para o mesófilo esponjoso, onde os raios incidem frequentemente nas paredes celulares, sendo refletidos se os ângulos de incidência forem suficientemente grandes. Esta reflexão múltipla é essencialmente um processo aleatório no qual os raios mudam de direção dentro da folha. Dado o grande número de paredes celulares dentro da folha, alguns raios são refletidos de volta para a fonte de luz ou energia enquanto outros são transmitidos através da folha. Geralmente a transmitância é maior do que a reflectância para folhas menos espessas, mas o inverso acontece com folhas mais espessas.

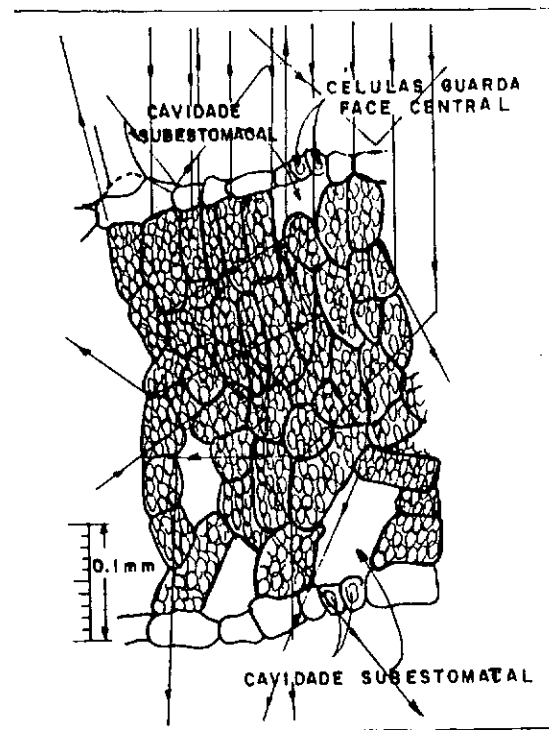


Fig. 6 - Seção transversal de uma folha mostrando os possíveis caminhos da luz incidente.

FONTE: Gates(1971)

A curva de reflectância característica de uma folha verde é mostrada na Figura 7. Os comprimentos de onda relativos ao ultravioleta não foram considerados porque uma grande quantidade dessa energia é espalhada e a vegetação não faz uso desta.

A análise da Figura 7 indica que a região compreendida de 0,4 a 2,6 $\mu$ m pode ser dividida em três áreas:

- a) região do visível (0,4 a 0,7 $\mu$ m);
- b) região do infravermelho próximo (0,7 a 1,3 $\mu$ m);
- c) região do infravermelho médio (1,3 a 2,6 $\mu$ m).

A curva da transmitância típica de uma folha é similar e tem aproximadamente a mesma magnitude da curva de reflectância típica, exceto para folhas pubescentes, lustrosas e muito finas. Isto porque tanto a reflectância quanto a transmitância são espalhadas pelas mesmas bordaduras internas.

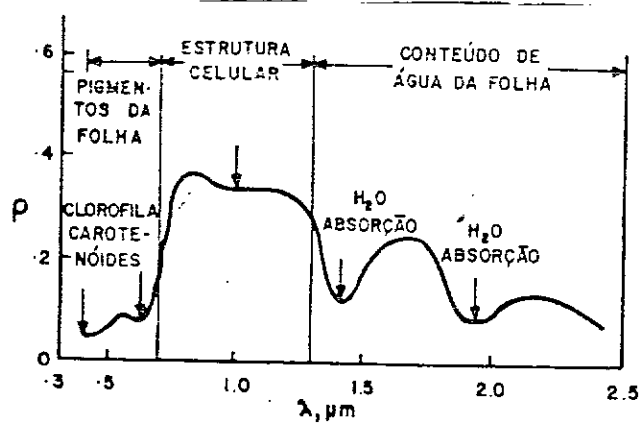


Fig. 7 - Curva de reflectância típica de uma folha verde.

FONTE: Novo(1989)

#### 2.1.4.1-REGIÃO DO VISÍVEL

Nesta região os pigmentos dominam a resposta espectral das folhas. Os pigmentos geralmente encontrados nos cloroplastos são: clorofila (65%), carotenos (6%), e xantofilas (29%); apesar da porcentagem de distribuição ser muito variável.

A radiação incidente é absorvida ou espalhada pela folha, após interagir com a estrutura foliar. A clorofila absorve seletivamente essa radiação, ou seja, somente determinados comprimentos de onda são selecionados, sendo que parte dessa radiação é convertida em calor ou fluorescência, e parte é convertida fotoquimicamente em energia estocada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese. O espectro de absorção da clorofila "a", clorofila "b",  $\alpha$ -caroteno, xantofila e água líquida está mostrado na Figura 8.

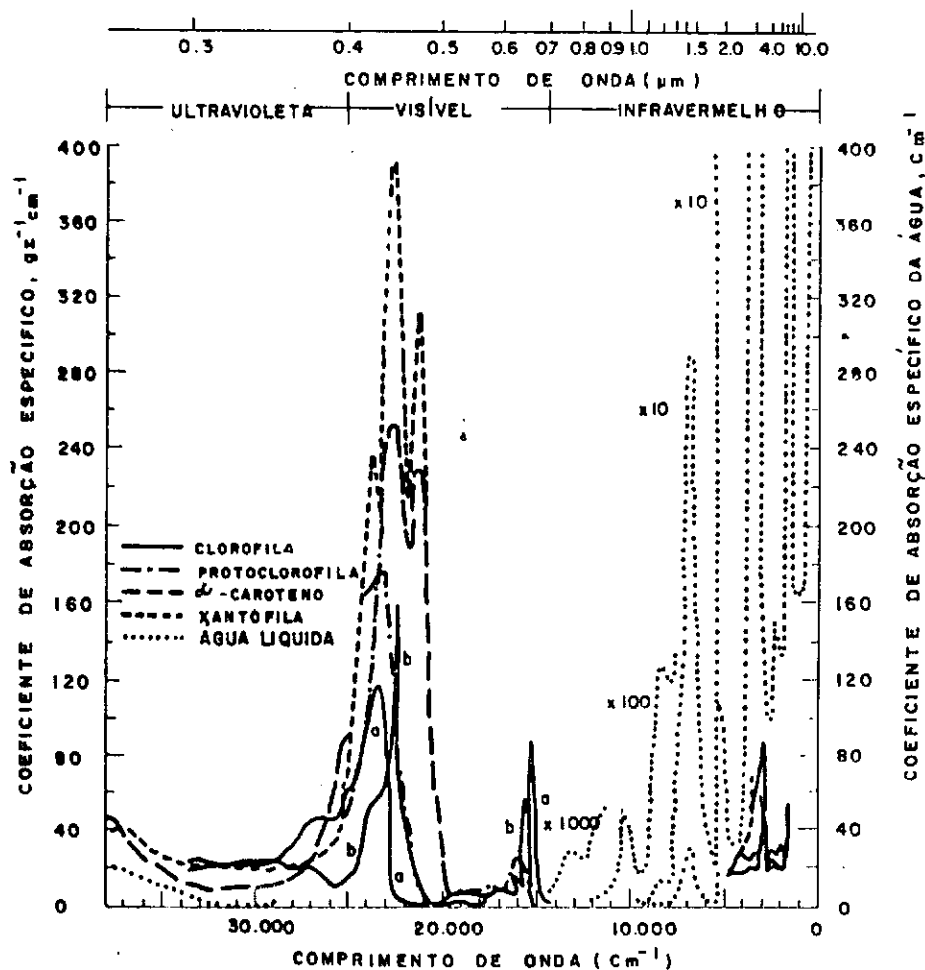


Fig. 8 - Espectro de absorção de alguns pigmentos.

FONTE: Kumar(1972)

#### 2.1.4.2-CLOROFILA

A clorofila, o pigmento verde das plantas, é o pigmento ativo mais importante no processo fotossintético (Devlin, 1975).

Uma das principais propriedades da clorofila é sua habilidade de absorver energia em determinados comprimentos de onda. Essa absorção é tão completa que a análise da energia refletida ou transmitida pela clorofila permite a constatação de regiões escuras. Desde que o espectro de absorção varia com a concentração, este deve ser determinado para uma amplitude de concentrações. O espectro de absorção mostrado na Figura 9 se refere a uma solução de clorofila em acetona. As regiões escuras se referem as faixas de absorção, que como

pode ser observado nesta Figura 9, se apresentam nos intervalos compreendidos entre aproximadamente 650nm a 680nm (vermelho) e 400nm a 510nm (violeta e azul). A faixa compreendida entre 510nm e 610nm (verde) constitui uma região de pouca absorção.

Nota-se que os pigmentos predominantes absorvem na mesma região, entre 445nm no azul, mas somente a clorofila absorve no vermelho (645nm). As plantas contendo folhas são moderadamente transparentes no verde (540nm).

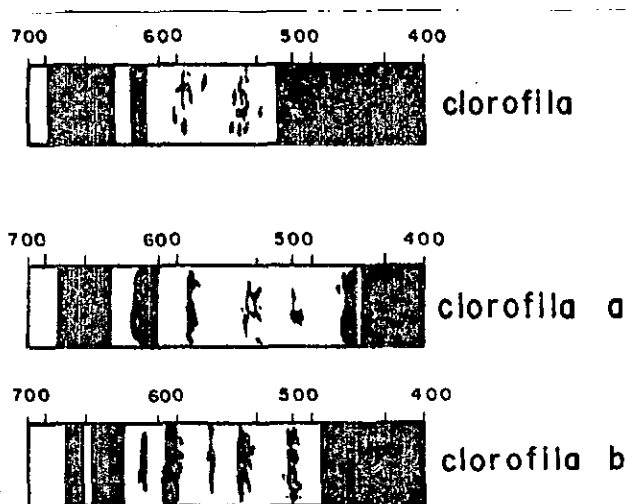


Fig. 9 - Espectro de absorção da clorofila em solução de acetona.

FONTE: Miller(1959)

Kumar(1972) apresentou uma breve revisão sobre o espectro de absorção da clorofila, através da descrição dos resultados alcançados por diversos autores. Alguns dos trabalhos descritos se referem a análise de diferenças entre o espectro de absorção da clorofila presente em cloroplastos em suspensão e de folhas intactas. Os resultados apontaram para um máximo de absorção entre 0,67 a 0,68 $\mu$ m, e um mínimo em 0,55 $\mu$ m. Porém os picos de absorção foram mais pronunciados para os cloroplastos suspensos do que em folhas intactas. Este resultado parece contradizer a afirmação que o espalhamento da REM no interior da folha aumenta a oportunidade de absorção relativa aos comprimentos de onda da região do visível, contudo o que dever ser levado em consideração aqui é que na folha intacta essa oportunidade também ocorre para a REM referente aos comprimentos de onda da região do verde, acarretando um menor pronunciamento relativo dos picos de absorção, apesar da absorção total nesta região ser maior.

Outros estudos permitiram concluir que a absorção da energia radiante na região de 0,55 $\mu$ m a 0,67 $\mu$ m

aumenta proporcionalmente com o aumento do conteúdo de clorofila.

#### 2.1.4.3-CAROTENÓIDES

Os carotenóides são pigmentos amarelos, laranja ou vermelhos presentes em todas as folhas verdes, assim como em outras folhas não verdes. Quimicamente falando, os carotenóides são tetraterpenos contendo 40 átomos de carbono arranjados em oito isoprenos como resíduos. Os carotenóides são de interesse na relação das mudanças de cor, as quais ocorrem em frutas, flores e folhas. Num fruto de tomate verde, por exemplo, existe muita clorofila e pouco caroteno. Durante o amadurecimento do fruto, a clorofila decresce rapidamente em quantidade, enquanto que os carotenóides são produzidos com rapidez. No desenvolvimento da cor de muitas flores amarelas, a formação de carotenóides está também envolvida. A coloração das folhas no outono se deve muito mais ao desaparecimento da clorofila e ao conseqüente desmascaramento dos pigmentos amarelos normalmente existentes nas folhas. Estes pigmentos podem, contudo, ser subsequentemente convertidos em vermelho através de uma desconhecida degradação dos carotenóides. A Figura 10 ilustra o espectro de absorção dos carotenóides.

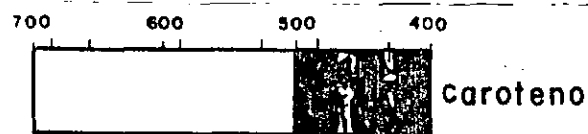


Fig. 10 - Espectro de absorção dos carotenóides.

FONTE: Miller(1959)

#### 2.1.4.4-XANTOFILAS

Estes componentes possuem átomos de oxigênio como grupos hidroxilas ou cetônicos. O principal componente das xantofilas de muitas folhas é o "lutiem", um caroteno contendo um único OH, ou hidroxila em cada anel terminal.

As curvas de reflectância para folhas de Coleus com diferentes pigmentações está mostrada nas Figuras 11 e 12, para ilustrar os efeitos da pigmentação na reflectância espectral.

A análise da Figura 12 permite concluir que a folha branca de Coleus sem qualquer pigmentação aparente, teve um alto nível de reflectância na região



compreendida entre 0,5 a 0,9 $\mu$ m. A folha dominada por clorofila mostrou a curva característica para uma folha verde (Figura 6). Uma folha vermelha teve uma baixa reflectância nas porções do espectro eletromagnético correspondentes ao azul e verde, então um aumento significativo no vermelho. Uma folha roxa ("reddish-purple") teve uma reflectância relativa baixa na região do visível e um forte aumento na região do infravermelho, coincidente ao comportamento de uma folha verde típica. A Figura 12 mostra que a reflectância espectral de uma folha nos comprimentos de onda relativos ao infravermelho é quase independente da pigmentação.

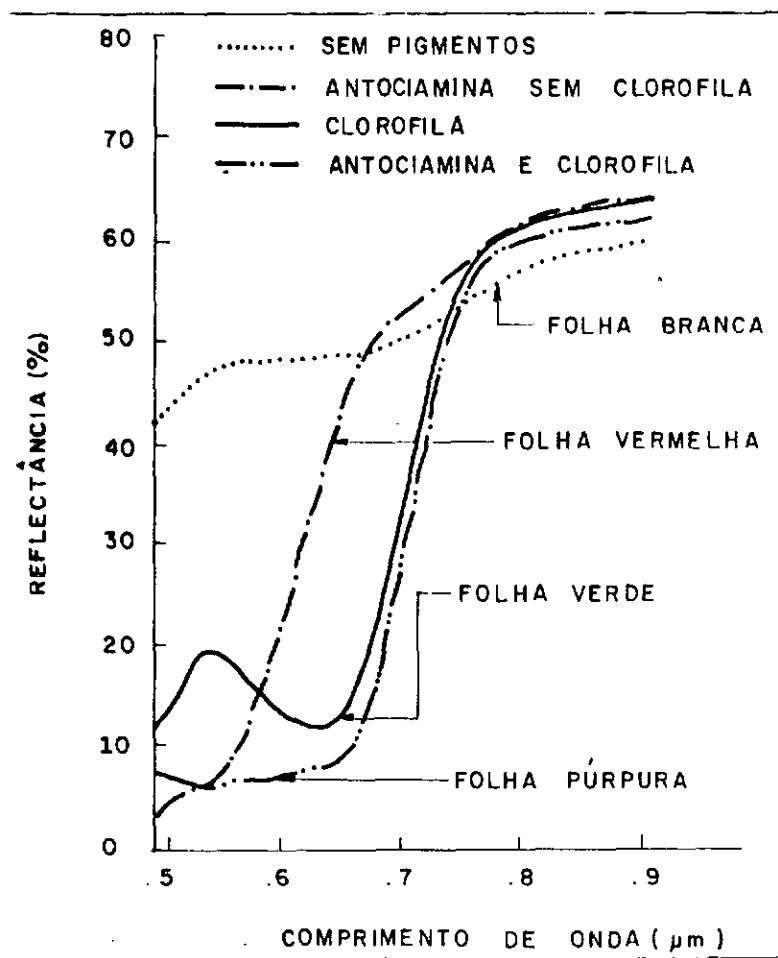


Fig. 11 - Curva de reflectância de folhas de Coleus.

FONTE: Kumar (1972)

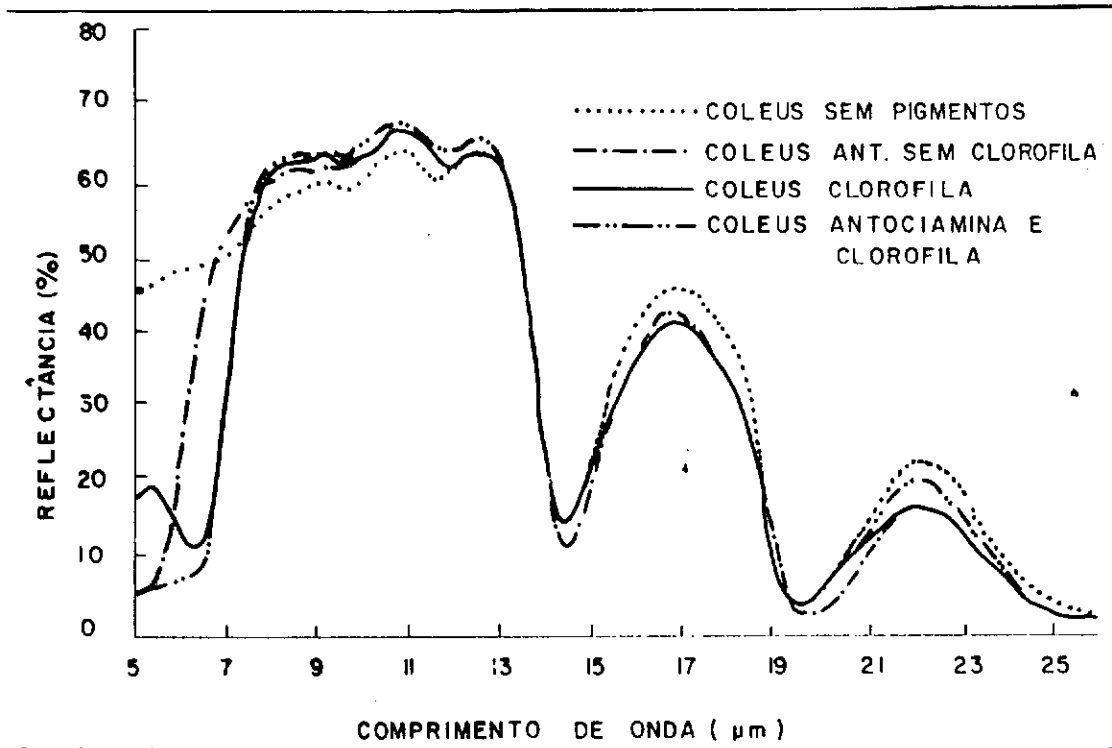


Fig. 12 - Curva de reflectância de folhas de Coleus.

FONTE: Kumar(1972)

Indicação adicional sobre a influência da pigmentação sobre as propriedades espectrais de plantas está mostrada na Figura 13.

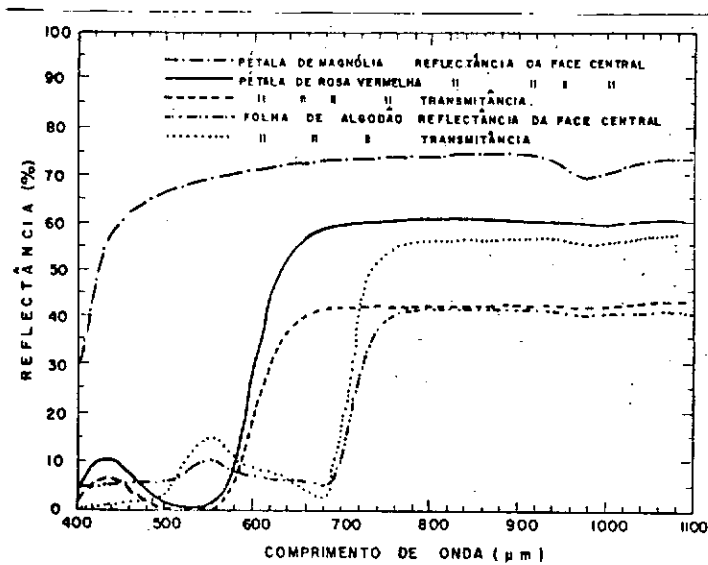


Fig.13 - A pigmentação nas propriedades espectrais de plantas.

FONTE: Kumar(1972)

A pigmentação de uma rosa vermelha é causada por carotenos e mostra uma forte absorção na região do verde. A rosa vermelha não é um vermelho puro, desde que um pequeno componente azul aparece nas curvas de reflectância e transmitância. No florescimento da Magnólia, há a falta de muitos pigmentos e a absorção ocorre no final do azul, e aparece com coloração branca aos nossos olhos.

#### 2.1.4.5-REGIÃO DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (0,7 A 1,3um)

Nesta região existe uma pequena absorção e considerável espalhamento interno pela folha, como mencionado por Dinger(1941), Obatan(1941,1944), Billings e Morris(1951) e Gates e Tantraporn (1952) , apud Kumar(1972).A absorção da água é geralmente baixa nessa região e sua influência na reflectância da folha é menor.A reflectância espectral é quase constante nessa região (vide Figura 6).

Gates(1971) menciona que a reflectância espectral de folhas nessa região do espectro eletromagnético é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos a folha, como disponibilidade de água por exemplo, pode causar alterações na relação água-ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância de uma folha nesta região.

#### 2.1.4.6-REGIÃO DO INFRAVERMELHO MÉDIO (1,3 A 2,6um)

A absorção da água líquida predomina na resposta espectral das plantas nesta região.A reflectância das folhas no infravermelho,em torno de 2,0um é geralmente pequena,sendo menor do que 10% para um ângulo de incidência de 65 e menor do que 5% para um ângulo de incidência de 20,dada a forte absorção da água. A água absorve na região de 1,3 a 2,0um. As faixas ou bandas de absorção da água são: 1,1, 1,45, 1,95, 2,7 e 6,3um. A influência do conteúdo de umidade na reflectância média de um grupo de folhas de milho está apresentada na Figura 14.Verifica-se que somente um pequeno decréscimo na reflectância é observado na primeira faixa de absorção da água para amostras de folhas de 0 a 40% de conteúdo de umidade.A primeira faixa de absorção da água se torna bastante evidente para amostras contendo 40 a 54% de umidade,e a forma geral da curva na região de 1,3 a 2,6um é relativa às folhas suculentas. As curvas de 54 a 66% e 66 a 100% de umidade são geralmente similares. Na região na qual a umidade não exerce influência, existe uma consistente diferença de 3 a 4% na reflectância. Examinando uma seção transversal de uma folha poderá ser constatado que essa diferença não se deve à absorção da água, mas sim às alterações estruturais que ocorrem

na folha quando perdem umidade. Carlson et al.(1971) encontraram uma relação significativa entre o conteúdo de água na folha e a resposta espectral em quatro amplos intervalos de comprimento de onda na região de 0,8 a 2,6 $\mu$ m. Muitos autores têm correlacionado coeficientes de absorção com o conteúdo de água na folha na região de 1,35 a 2,5 $\mu$ m.

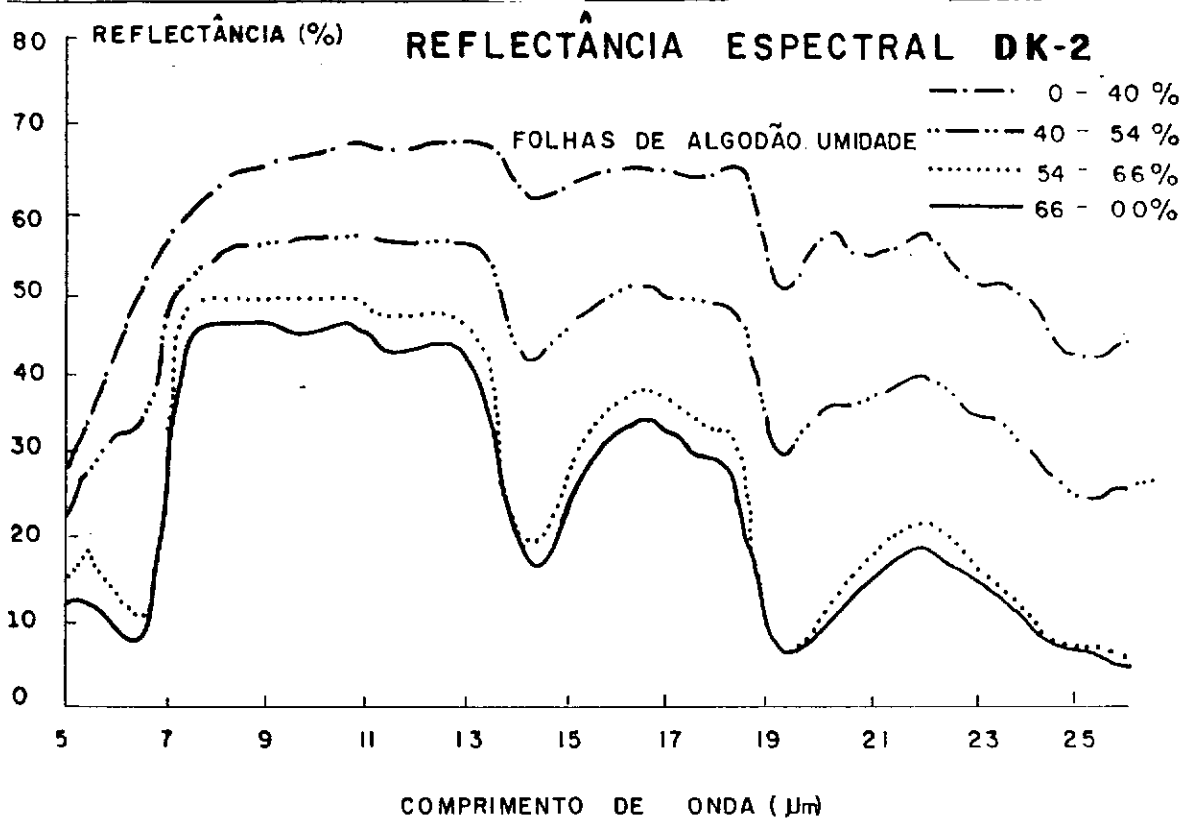


Fig.14 - Influência do conteúdo de umidade na reflectância de folhas de milho.

FONTE: Kumar(1972)

Pouca experimentação tem sido feita na determinação das características de espalhamento bidirecional de uma folha, dadas as dificuldades experimentais envolvidas. Breece e Holmes (1971) mediram as funções de distribuições da reflexão e transmissão bidirecionais para as folhas "in vivo" de soja e milho, para 19 bandas estreitas compreendidas entre 0,375 a 1 $\mu$ m. As funções de distribuição de reflexão medidas com incidência oblíqua, mostraram consideráveis contribuições especulares em comprimentos de onda de forte absorção, enquanto as funções de distribuição de transmissão mostraram uma forma próxima à Lambertiana para todos os comprimentos de onda considerados.

## 2.2-PRINCÍPIOS GERAIS DE INSTRUMENTAÇÃO ENVOLVIDA NA COLETA DA REM

Swain e Davis(1978) apresentam informações detalhadas sobre a instrumentação utilizada na coleta e registro da REM. Segundo estes autores, a radiação entra num instrumento através de uma abertura e segue um extensivo processamento ótico e eletrônico. Os instrumentos que são mais frequentemente usados tanto em condições de laboratório, quanto de campo são os chamados espectrômetros. Estes aparelhos originaram-se dos monocrômetros, que são instrumentos que analisam a radiação policromática em seus componentes espectrais individuais. Um espectrômetro nada mais é do que um monocrômetro ajustável. A Figura 15 ilustra esquematicamente a estrutura funcional de um espectrômetro.

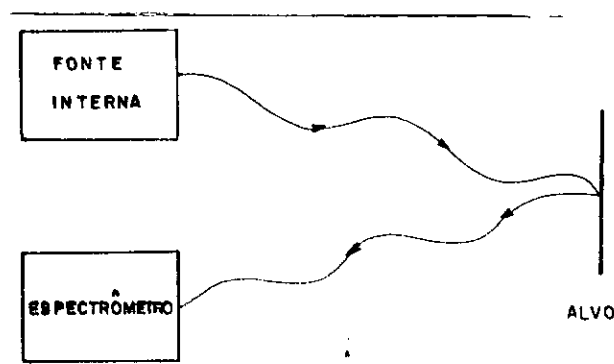


Fig. 15 - Estrutura funcional de um espectrômetro.

FONTE: Swain e Davis(1978)

A radiação policromática entra através de uma abertura do instrumento. Esta abertura é usada para controlar a intensidade de entrada de radiação e, em alguns casos, para controlar o tamanho da área a ser visualizada instantaneamente (elemento de resolução). A seguir a radiação é colimada ou focalizada através de elementos óticos que podem ser reflexivos, refrativos ou uma combinação de ambos. A velocidade ótica efetiva do sistema e o elemento de resolução são determinados pelo sistema ótico de colimação ou de focalização. Em alguns instrumentos a radiação atravessa um sistema de processamento ótico, semelhante a um "chopper", onde o sinal ótico é formado. Este sinal passa então através de uma porção dispersiva do sistema, assim como um filtro de interferência, um prisma ou qualquer outro componente ótico no qual as características de transmissão e reflexão são uma função do comprimento de onda da radiação incidente. É nesta porção do instrumento que a radiação incidente é dividida em seus componentes espectrais. Usualmente a radiação é então focalizada

sobre uma abertura de saída, após a qual a radiação incide sobre um ou mais detetores e é convertida num sinal elétrico que é amplificado, processado de várias formas, sendo finalmente registrado. obviamente os espectrômetros apresentam várias formas, dependendo dos usos para os quais se destinam, contudo, todos apresentam estes componentes básicos ilustrados na Figura 15.

O espectrômetro descrito é um componente básico de um número grande de instrumentos usados na coleta e registro da REM. Por exemplo, um espectrofotômetro, ilustrado na Figura 16, é um instrumento que contém um espectrômetro assim como uma fonte interna de iluminação ou de radiação, que é capaz de gerar radiação tanto na região do visível quanto na região do infravermelho.

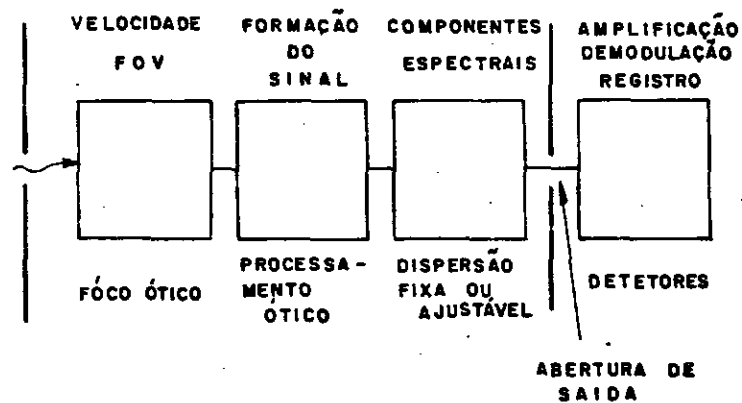


Fig. 16 - Esquema de um espectrofotômetro

FONTE: Swain e Davis (1978)

O instrumento é concebido de tal forma que essa radiação internamente gerada é focalizada sobre um dado alvo de interesse. Neste caso o espectrômetro contido no espectrofotômetro é usado para medir a radiação proveniente deste alvo iluminado. Comumente a fonte interna de radiação ilumina uma referência de forma que as características do alvo possam ser expressas em termos das características dessa referência.

Um instrumento que não contém uma fonte interna de radiação, dependente portanto de uma fonte externa (natural ou artificial) é chamado espectrorradiômetro. Este instrumento é usado para examinar alvos localizados em ambientes naturais de forma que as medidas espectrais podem ser realizadas sob condições naturais. A Figura 17 mostra um diagrama funcional de um espectrorradiômetro.

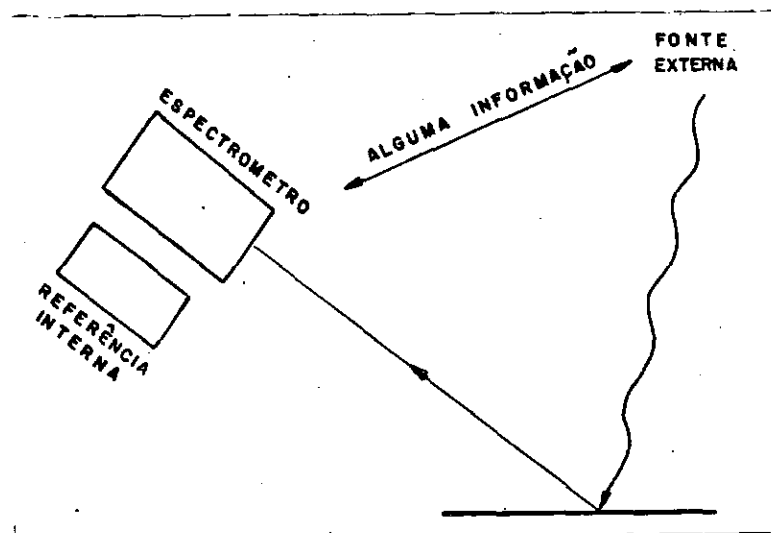


Fig. 17 - Esquema funcional de um espectrorradiômetro

FONTE: Swain e Davis(1978)

Estes instrumentos são os mais usados em trabalhos de campo, principalmente em trabalhos agrônômicos e geológicos. Por este motivo os fabricantes destes equipamentos apresentam com frequência novos modelos na tentativa de facilitar as operações de transporte e manuseio. A escolha de um destes modelos está intimamente relacionada a natureza das medidas a serem efetuadas, incluindo as características do alvo de interesse e da disponibilidade de equipamentos para o processamento dos dados gerados.

### 2.3-A INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA NA DETERMINAÇÃO DA REFLECTÂNCIA DE FOLHAS ISOLADAS

Dos trabalhos que envolvem a quantificação das propriedades espectrais de folhas, nenhum deles descreve pormenorizadamente as metodologias adotadas nesse procedimento. A ênfase destes trabalhos é nos resultados das medições e nas características das folhas das espécies consideradas. Contudo um aspecto importante, comum a quase todos estes trabalhos, é o uso de espectrofotômetros na determinação e quantificação das propriedades espectrais de folhas. É o caso de Gausman(1974) que conduziu estudos específicos com um microespectrômetro no sentido de testar hipóteses relacionadas as discontinuidades de índices de refração causadas pelas interfaces de paredes celulares e espaços intercelulares cheios de ar, considerando a região do infravermelho. A Figura 18 ilustra o microespectrofotômetro Leitz utilizado pelo autor em seus experimentos.

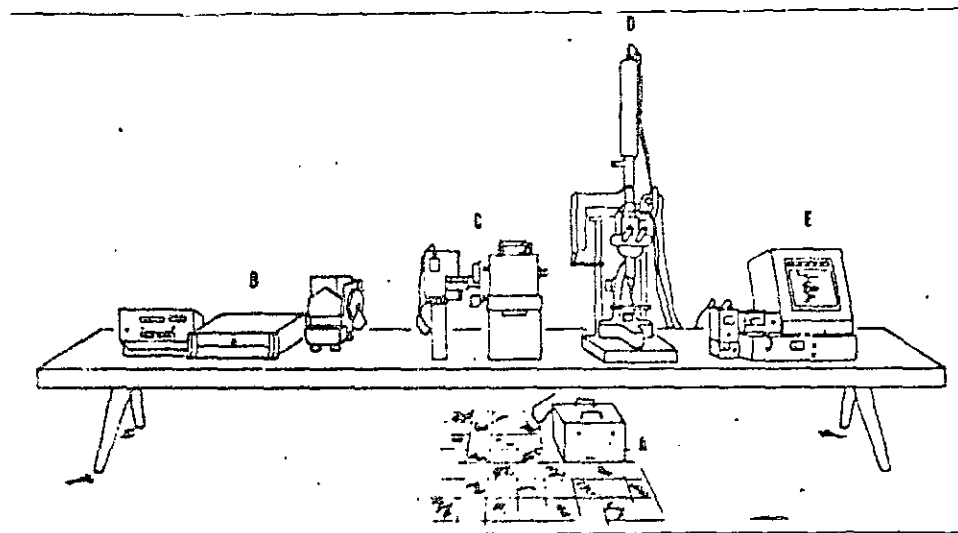


Fig. 18 - Microespectrofotômetro Lietz utilizado por Gausman.

FONTE: Gausman(1974)

A luz refletida é registrada num filme infravermelho branco e preto ou sobre um papel especial. Os componentes indicados na Figura 19 são:

- A==>fonte de energia para a fonte luminosa;
- B==>representa a instrumentação responsável pela perfuração do papel para a introdução dos dados registrados em um computador;
- C==>representa o "berço" da fonte luminosa (lâmpada) e também o monocromator;
- D==>microscópio dotado de um tubo fotomúltiplo e uma câmera tipo baioneta;
- E==>fonte de energia do tubo fotomúltiplo e um registrador de dados em papel.

A luz provinda do monocromator, mostrado em C, é enviada através de um sistema de condução de luz, até o microscópio indicado em D e incide sobre a folha. A luz é então refletida pela folha em direção à câmera e o tubo fotomultiplicador. A saída deste tubo é registrada no dispositivo mostrado em E.

Na literatura existem muitos trabalhos relacionados a determinação do comportamento espectral de folhas e ao estudo da influência de alguns fatores endógenos e exógenos nessa determinação que limitam-se a apresentação sucinta das metodologias empregadas e dos resultados alcançados, sem contudo tecerem maiores detalhes sobre as condições de coleta de dados e seu processamento. Dentre estes trabalhos destacam-se os de Gausman et al. (1969), que



utilizaram um espectrofotômetro modelo DK-2A no estudo das reflectância e transmitância espectrais dos lados ventral e dorsal de folhas de algodão; de Lilleseater (1982) que estudou a influência do fundo ("background") nas medições de reflectância de folhas individuais usando um espectrofotômetro Zeiss PMQ II; de Gates et al.(1965) que apresentaram um estudo sobre o comportamento espectral de plantas no qual foram consideradas folhas e galhos; de Gausman et al.(1973) que estudaram o mesófilo de folhas de vinte espécies vegetais agrônomicas e seus parâmetros óticos e geométricos; de Thomas et al.(1971) que valeram-se de medidas de reflectância de folhas individuais para estimar o conteúdo de água e de Daughtry e Biehl(1984) que estudaram as alterações das propriedades espectrais de folhas extraídas submetidas a diversas condições de armazenamento.

### 3 DOS EXPERIMENTOS CONDUZIDOS

#### 3.1-CONSIDERAÇÕES GERAIS

Foram conduzidos dois experimentos com o objetivo de :

a) detectar possíveis diferenças entre a reflectância espectral de folhas extraídas de um indivíduo de Eucalipto, submetidas a diferentes períodos de armazenamento e de folhas extraídas de indivíduos de Araucária que apresentavam diferentes níveis de danos causados por um fungo que ataca o sistema radicular e;

b)avaliar as metodologias empregadas na coleta de dados radiométricos.

O primeiro experimento envolveu o uso da folhas de Eucalipto e o segundo ,as folhas de Araucária, cujos danos mencionados variam de intensidade segundo seu estágio de desenvolvimento. No estágio seu estágio inicial foi observado que as raízes já estavam mortas e no entanto a copa apresentava-se verde, com uma tonalidade levemente descorada (fosca). Em estágios mais avançados a clorose ocorre no sentido da parte baixa da copa para seu ápice e no sentido do fuste para a porção terminal dos galhos.

#### 3.2 - MATERIAL E MÉTODOS

##### 3.2.1-RADIÔMETRO UTILIZADO

Em ambos os experimentos foi usado o radiômetro Spectron SE-590,da Spectron Eng.Company que possui 256 bandas espectrais que se estendem de 0,4um até 1,1um, com resolução espectral de 0,03um. Este equipamento possui como configuração básica uma unidade controladora

e uma unidade de coleta de dados. Na primeira estão inseridos a fonte alimentadora de energia, bateria, gravador de fita ("tape record") e um microprocessador que permite, através de botões de comando ("key board"), a manipulação dos dados coletados, formatando-os nas formas mais convenientes; o registro destes dados em fita magnética ou sua visualização gráfica direta através de um osciloscópio que pode ser acoplado a essa unidade que também funciona como acionador do equipamento, ou seja, constitui a interface entre o equipamento e o usuário. Na unidade de coleta de dados estão os dispositivos óticos, mecânicos e eletrônicos responsáveis pela detecção e transformação da energia proveniente do objeto visualizado por esta. São possíveis três ângulos de abertura: 5, 10 e 15; os quais são conseguidos através da simples troca do sistema ótico, facilitada pela ação de parafusos fixadores. Estes ângulos definem, para uma certa distância adotada entre o objeto de interesse e a unidade de coleta, a área a ser visualizada (elemento de resolução espacial). A varredura espectral se dá automaticamente pela ação de comandos específicos da unidade controladora e o tempo consumido nesta operação pode ser considerado instantâneo. Os dados coletados ficam disponíveis em uma memória virtual e são passíveis de registro em fita magnética para posterior processamento em microcomputador. A Figura 19 ilustra a configuração deste equipamento.

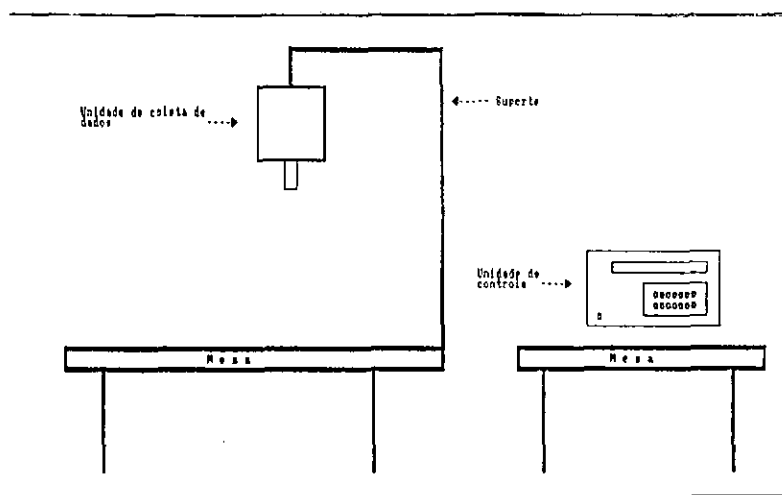


Fig. 19 - Configuração básica do radiômetro Spectron SE-590

### 3.2.2-LOCAL E CONDIÇÕES ADOTADAS NA CONDUÇÃO DAS MEDIDAS ESPECTRORRADIOMÉTRICAS

As medidas espectrorradiométricas foram conduzidas nas chamadas condições de laboratório, onde tenta-se controlar as influências indesejáveis das

variáveis ambientais sobre tais medições. Durante as medições, esta sala é mantida totalmente escura e uma fonte luminosa artificial é usada para a iluminação dos objetos sobre os quais serão realizadas as medições. Esta fonte é constituída comumente por uma lâmpada de halogênio de aproximadamente 250 watts, acondicionada em um projetor de slides adaptado em suportes específicos. Ângulos de iluminação e visada distintos podem ser conseguidos pela ação de suportes e estruturas especialmente concebidas para atender essa finalidade.

O primeiro experimento (folhas de Eucalipto) foi conduzido nas dependências do Centro de Treinamento da New Holland, situado na Fazenda Canguiri de propriedade da Universidade Federal do Paraná (UFPr). Esta fazenda dista a aproximadamente 15 Km da cidade de Curitiba e foi escolhida para a condução deste experimento por possuir indivíduos desse Gênero em abundância e de fácil acesso, e ainda por se tratar de área passível de condução de experimentos agro-silviculturais.

Foi escolhida uma sala que permitisse seu total escurecimento. Uma mesa medindo aproximadamente 1,0x 1,5m, foi usada como plataforma para suportar o equipamento (radiômetro) e as amostras a serem medidas. Como fonte luminosa foi usado um projetor comum de slides que foi disposto sobre uma escada metálica de armar, de forma a ser posicionado a aproximadamente 80cm acima do plano da mesa. Este projetor foi posicionado de forma a iluminar o plano da mesa num ângulo de 45°. A lâmpada deste projetor de slides era de 150watts.

A unidade coletora do radiômetro foi fixa em uma armação de uma luminária de lentes que foi adaptada para tal. Como resultado esta unidade pode ser mantida fixa de forma a visar verticalmente as amostras a serem medidas. O ângulo de abertura adotado no experimento foi de 10° e, uma vez que a unidade coletora foi mantida a 50cm acima do plano da mesa, a área visualizada por esta unidade foi de aproximadamente 15cm (elemento de resolução espacial no terreno).

O mesmo procedimento foi adotado na condução do experimento referente as folhas extraídas de Araucaria quanto aos critérios de controle das variáveis ambientais, contudo este experimento foi conduzido nas dependências da indústria de madeiras Giacomet-Marodim, localizada no município de Quedas do Iguaçu (Pr). Da mesma forma como aconteceu na Fazenda Canguiri, um laboratório foi montado numa sala cedida pela empresa, segundo os mesmos moldes do anterior.

### 3.2.3-DELINEAMENTO ESTATÍSTICO

O delineamento estatístico considerado em ambos os experimentos foi o inteiramente casualizado e a diferença entre médias dos tratamentos foi detectada através do teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Gomes, 1963).

Por tratamentos compreendem-se os períodos de armazenamento entre a coleta das folhas e sua efetiva medição radiométrica, para o caso do experimento conduzido com as folhas de Eucalipto, e os diferentes níveis de danos apresentados pelos indivíduos de Araucária. Dadas as limitações de espaço disponível em fita magnética para o registro dos dados provenientes das medições, foram possíveis realizar 10 repetições por tratamento.

### 3.2.4-COLETA, ARMAZENAMENTO E ORIENTAÇÃO DAS FOLHAS DE EUCALIPTO

O experimento envolvendo as folhas extraídas de Eucalipto foi concebido de forma a detectar possíveis diferenças no fator de reflectância destas folhas, submetidas a tempos diferentes de armazenamento compreendidos entre a coleta e as medições espectrorradiométricas. Os tempos considerados foram:

- 0==>medições imediatamente após a coleta;
- 5==>medições 5 horas após a coleta;
- 8==>medições 8 horas após a coleta;
- 24==>medições 24 horas após a coleta;
- 32==>medições 32 horas após a coleta;
- 127==>medições 127 horas após a coleta;

Assim como mencionado na seção 3.3, estes tempos foram considerados como tratamentos de um experimento inteiramente casualizado, sendo que para cada um destes tratamentos foram tomadas 10 repetições as quais constituíram um grupo de folhas. Estes grupos foram arranjados sob a unidade de coleta do radiômetro, formando um quadrado de aproximadamente 30cm de lado, contendo uma única camada de folhas as quais, por sua vez, foram orientadas de forma que a direção do feixe de luz incidente fosse coincidente com seus eixos longitudinais; ainda somente foi considerada a reflectância do lado dorsal das folhas. Um pano preto fosco foi utilizado como fundo ("background"), uma vez que a camada de folhas não era contínua. O tempo consumido na operação de arranjo das folhas e medição espectrorradiométrica de cada repetição (grupo) foi de aproximadamente 5 minutos, resultando num total de 50 minutos, em média,

para cada tratamento. Este fato obrigou a adoção do seguinte procedimento de coleta das folhas para que fosse garantido um tempo de espera de 30 minutos para as folhas destinadas ao tratamento 0 de armazenamento:

HORÁRIO	PROCEDIMENTO	TRATAMENTO
6:00hs ==>	coleta para as 5 primeiras repetições	0
	coleta para as 5 primeiras repetições	5
	coleta para as 5 primeiras repetições	8
	coleta para as 5 primeiras repetições	24
	coleta para as 5 primeiras repetições	32
	coleta para as 5 primeiras repetições	127
7:30hs ==>	coleta para as 5 seguintes repetições	0
	coleta para as 5 seguintes repetições	5
	coleta para as 5 seguintes repetições	8
	coleta para as 5 seguintes repetições	24
	coleta para as 5 seguintes repetições	32
	coleta para as 5 seguintes repetições	127

Foi escolhido um indivíduo de Eucalipto que continha folhas em abundância e de fácil acesso que se desenvolvia próximo a cota máxima de um divisor topográfico e que se encontrava praticamente isolado, recebendo luz solar de todas as direções. Este indivíduo não foi abatido, sendo que para a extração das folhas e galhos de pequenos diâmetros (que não foram considerados nas medições), foi utilizado um podão.

Uma vez extraídas as folhas eram introduzidas em sacos pretos de polietileno com capacidade para 100 litros, os quais foram mantidos abertos e imediatamente encaminhadas ao laboratório e lá mantidas sob ausência da luz.

As repetições foram feitas sobre as folhas não repostas, ou seja, uma mesma folha não foi utilizada mais do que uma vez na coleta dos dados espectrorradiométricos.

### 3.2.5-COLETA E ORIENTAÇÃO DAS FOLHAS DE ARAUCÁRIA

Como tratamentos foram considerados os níveis de danos identificados por Lingnau(1990) e uma característica edáfica particular que foi considerada como passível de investigação; assim:

TRATAMENTO	NÍVEL DE DANO
0 =====>	planta sadia
1 =====>	nível 1
2 =====>	nível 2

3 =====> nível 3  
4 =====> planta morta (folhas secas)  
AFR=====> afloramento rochoso

Os plantios de Araucária foram percorridos tendo-se como orientação um trabalho de fotointerpretação realizado previamente por Lingnau(1990) no qual foram cartografadas as classes relativas aos danos mencionados. Um indivíduo representativo de cada nível de dano e do substrato denominado afloramento rochoso (AFR) foi abatido para que pudessem ser extraídas suas folhas, as quais em seguida foram acondicionadas em sacos de polietileno com capacidade para 100 litros, e em seguida foram encaminhadas prontamente para o laboratório. A coleta destas folhas foi conduzida de forma a garantir o tempo mínimo entre a coleta e as medições espectrorradiométricas; para tanto os indivíduos foram abatidos numa sequência sincronizada com o andamento das medições.

Assim como no experimento conduzido com as folhas de Eucalipto, as folhas de Araucária foram arranjadas mantendo-se a coincidência entre os eixos longitudinais destas e a direção dos raios luminosos incidentes a 45 oriundos do projetor. Contudo, convém salientar que as acículas não foram extraídas, mantendo-se aqui também uma camada única de folhas sobre um pano preto como fundo.

### 3.2.6-MEDIÇÕES ESPECTRORRADIOMÉTRICAS

Cada leitura ou medição realizada pelo radiômetro foi denominada de "espectro" e constituiu um arquivo passível de posterior processamento em um microcomputador. Para cada tratamento foram registrados 10 espectros, sendo que estas 10 medidas foram intercaladas com a leitura de dados de uma placa padrão de sulfato de bário que também passaram a constituir arquivos ou espectros para posterior processamento.

Cada arquivo continha as seguintes informações:

- .dia/mês/ano;
- .hora local;
- .intensidade da energia captada pela unidade de coleta;
- .tempo de integração;
- .reflectância espectral na faixa de 0,4 a 1,1µm.

### 3.2.7-PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os arquivos gravados em fita magnética foram transferidos para um microcomputador e posteriormente foram gravados em disco flexível de 5 1/4" de dupla face. Através de um programa específico foram gerados novos arquivos contendo o fator de reflectância para cada espectro oriundo das amostras. Segundo o algoritmo implementado através deste programa o fator de reflectância foi calculado pela divisão dos dados referentes a cada espectro das amostras, pelos dados referentes ao espectro da placa padrão obtido num horário mais próximo. Os novos arquivos contendo o fator de reflectância de cada repetição para cada tratamento foram gravados em disco flexível no formato ASCII, o que permitiu sua utilização em um microcomputador da linha MSX, através do qual foram confeccionados programas em linguagem BASIC, para realizar cálculos referentes a simulação das bandas do sensor Thematic Mapper (TM), a análise de variância e confecção de gráficos.

#### 3.2.7.1-SIMULAÇÃO DAS BANDAS TM

Para facilitar o tratamento estatístico destes dados foram calculadas as médias dos fatores de reflectância compreendidos entre 0,44 a 0,55um (banda TM1), 0,55 a 0,60um (banda TM2) e 0,63 a 0,69um (banda TM3). Cada tratamento originou 10 médias para cada uma destas bandas as quais foram comparadas entre si através da análise de variância.

### 3.3-RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.3.1-Eucalipto

Como resultado do processamento dos arquivos gravados nas fitas magnéticas foram gerados outros arquivos que foram gravados em disco flexível contendo os fatores de reflectância de cada amostra medida, sendo que cada um destes continha as 256 bandas espectrais referentes a 4 amostras. Um exemplo de um destes arquivos encontra-se apresentado no Anexo A. A observação deste exemplo permite verificar que há uma frequência alta de fatores de reflectância nulos nas faixas compreendidas entre 0,37um a 0,42um e 0,85um a 1,1um. Na primeira faixa citada este fato pode ser explicado pela baixa intensidade de energia emitida pela lâmpada, aliado a baixa reflectância das folhas; e na segunda faixa a alta frequência de zeros pode ser explicada pela já mencionada presença do filtro infravermelho diante da lâmpada do projetor. A Figura 21 ilustra os gráficos de uma repetição para cada um dos tratamentos considerados.

A faixa espectral considerada nos cálculos e comparação entre tratamentos ficou compreendida entre 0,37um a 0,87um. Para esta faixa pode-se constatar que a forma das curvas apresentadas nas Figuras 20 e 21 é muito semelhante a forma típica da curva do fator de reflectância da vegetação. Contudo a partir de aproximadamente 0,77um há uma degradação das curvas sob a forma de pontos dispersos aleatoriamente. Isso comprova a não existência de energia na região do infravermelho incidente sobre as amostras. Ainda para a região compreendida entre 0,4 a 0,68um há uma tendência de crescimento dos valores dos fatores de reflectância a medida que estende-se os tempos de armazenamento (tratamentos). Para facilitar a visualização desta afirmação, foi confeccionado um gráfico contendo os fatores de reflectância médios para as bandas TM1, TM2 e TM3, o qual encontra-se apresentado na Figura 21.

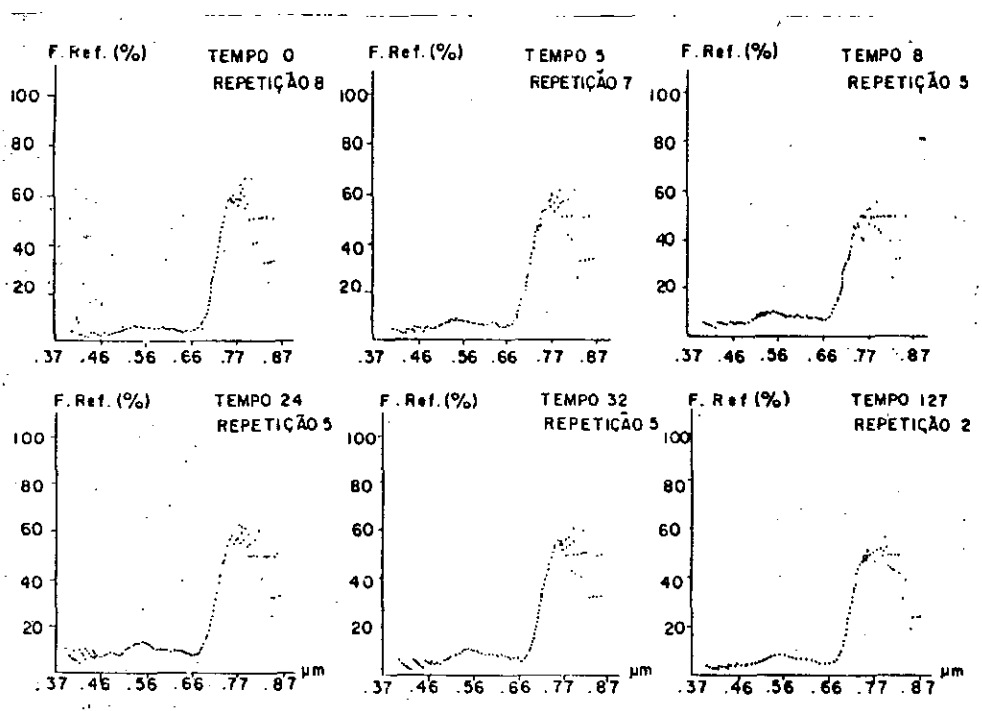


Fig. 20 - Reflectância espectral de folhas de Eucalipto submetidas a diferentes períodos de armazenamento.



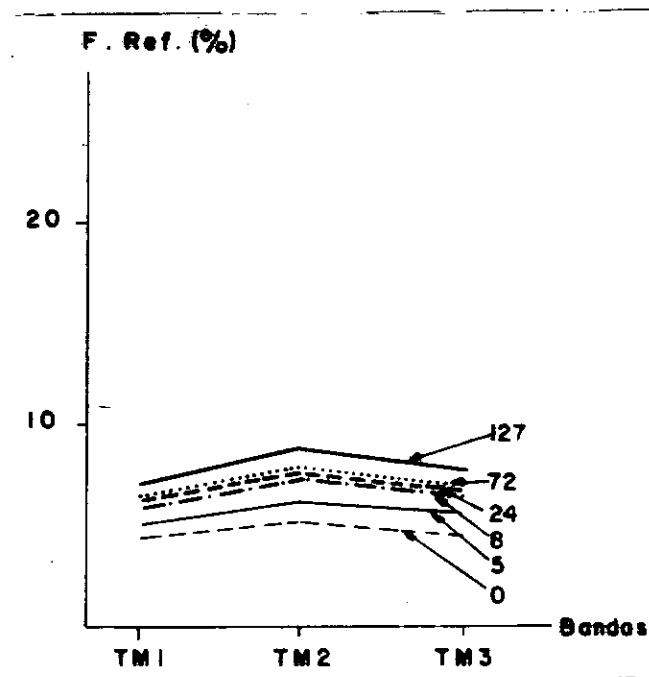


Fig. 21 -Reflectância espectral das folhas de Eucalipto x bandas TM por tempo de armazenamento.

A significância destas diferenças foi determinada pela análise de variância destas médias a qual será apresentada a seguir.

#### 3.3.1.1-ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A análise de variância entre as médias dos tratamentos foi conduzida sobre os dados referentes a simulação das bandas TM individualmente (por banda).As tabelas 2,3 e 4 ilustram os resultados da simulação das bandas TM1, TM2 e TM3, respectivamente.

Devido a perda de 2 (duas) repetições (3 e 7) no tratamento 8 a análise de variância foi conduzida considerando o caso de duas parcelas perdidas em um experimento inteiramente casualizado, conforme procedimento apresentado por Gomes(1963)..

Tabela 2 - Médias dos fatores de reflectância para cada tratamento para a banda TM1.

BANDA=TM1		TRATAMENTOS					
REPETIÇÕES	0	5	8	24	32	127	
1	+2,9501	+4,9621	+5,1687	+5,6031	+6,3854	+7,5438	
2	+4,8396	+4,6793	+5,9676	+5,6649	+7,1247	+6,6419	
3	+4,1376	+4,3139	-	+6,7533	+6,9744	+8,8199	
4	+4,7488	+4,5426	+5,2418	+5,3267	+4,5976	+5,1840	
5	+4,0135	+4,3012	+6,8021	+9,7119	+7,9369	+6,5161	
6	+3,8933	+5,7875	+5,3616	+5,4667	+4,6691	+6,5232	
7	+3,3257	+6,2483	-	+5,1579	+5,1424	+6,9157	
8	+5,1997	+4,8050	+5,1090	+7,4417	+5,7075	+5,2611	
9	+3,4544	+5,0241	+7,5240	+4,9031	+8,5663	+7,8045	
10	+5,8236	+4,9676	+5,0144	+5,2275	+5,6272	+8,7188	
MÉDIA	+4,2386	+4,9632	+5,7749	+6,1257	+6,2705	+6,9929	

Tabela 3 - Médias dos fatores de reflectância para cada tratamento para a banda TM2.

BANDA=TM2		TRATAMENTOS					
Rep.	0	5	8	24	32	127	
1	3,8438	5,8035	6,5260	6,6594	7,5055	9,4052	
2	6,2850	6,0978	7,3007	7,3051	8,5752	8,1487	
3	4,8983	5,4985	-	8,5906	8,3838	11,2193	
4	5,7987	5,5864	6,6165	6,3676	6,3611	6,6426	
5	4,9740	5,6497	8,5977	11,5545	10,4719	8,1723	
6	4,4786	6,5915	6,6072	6,9602	6,1810	8,8935	
7	3,9718	7,7561	-	6,2248	6,4180	8,7419	
8	6,4996	5,9223	6,6102	9,1847	7,0415	6,2318	
9	4,2172	6,1795	9,2173	6,3447	10,0942	9,5232	
10	6,7631	6,6922	6,1447	6,6105	7,1459	10,6873	
MÉDIA	5,1730	6,1778	7,2025	7,5802	7,8178	8,7666	

Tabela 4 - Médias dos fatores de reflectância para cada tratamento para a banda TM3.

BANDA=TM3	TRATAMENTOS					
Rep	0	5	8	24	32	127
1	3,2129	5,1998	5,7153	6,4073	6,3560	7,7951
2	5,5841	5,4584	6,7138	6,0878	6,7865	7,2969
3	4,3260	4,6494	-	7,3474	7,4906	19,8872
4	4,6870	4,5556	5,8573	5,7561	6,1098	5,9324
5	4,4676	4,9114	7,6476	19,9895	19,0803	7,1229
6	3,7422	6,2993	5,6544	7,2014	5,7675	8,3346
7	3,4048	7,3631	-	5,6013	5,5974	8,2887
8	5,7240	5,1202	5,7628	7,6021	6,3606	5,6224
9	3,3796	5,2666	8,1259	6,2329	18,9986	8,5846
10	6,1543	7,4135	5,4986	5,7686	6,3295	19,3818
MÉDIA	4,4683	5,6337	6,3720	6,7994	6,8767	7,8247

A Tabela 5 mostra o quadro da análise de variância para a banda TM1.

Tabela 5 - Análise de variância para as médias dos tratamentos banda TM1.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	DESVIO	F
Tratamento	5	48,57	9,71	3,12	7,49*
Resíduo	52	67,41	1,30	1,14	
Total	57	115,98			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

A significância de F a 5% de probabilidade indicou a existência de diferença entre pelos menos duas médias, justificando-se portanto a aplicação do teste de Tukey, o qual foi também aplicado ao mesmo nível de significância (5%). O valor considerado para a comparação entre as médias foi  $\Delta = 1,51$ , contudo a média do tratamento "8" foi comparada com  $\Delta = 1,6$ , conforme procedimento apresentado por Gomes (1963). A comparação final entre as

médias para a banda TM1 ficou então:

Tratamento	Médias
127-----	6,9929 *
32-----	6,2705 * *
24-----	6,1257 * *
8-----	5,7749 * * *
5-----	4,9632 * *
0-----	4,2386 *

Nota-se portanto que para a banda TM1 houve diferença significativa (ao nível de 5% de probabilidade) entre as médias dos tratamentos "5" e "127", "0" e "24", "0" e "32" e finalmente "0" e "127". Através desse resultado pode-se concluir que alterações significativas na reflectância das folhas de Eucalipto correspondente a essa banda espectral só foram detectadas 24 horas após sua coleta.

A Tabela 6 mostra o quadro da análise de variância para as médias dos tratamentos considerando a banda TM2.

Tabela 6 - Análise de variância para as médias dos tratamentos banda TM2.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	DESVIO	F
Tratamento	5	80,94	16,19	4,02	9,01*
Resíduo	52	93,38	1,80	1,34	
Total	57	174,32			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

Assim como na análise de variância anterior, o valor de F foi significativo ao nível de 5% de probabilidade. Seguiu-se a aplicação do teste de Tukey, tendo sido considerados os valores  $\Delta=1,88$  para a comparação da média do tratamento "8" e  $\Delta=1,77$  para a comparação das demais. Como resultado obteve-se:

Tratamento	Médias
127-----	8,7666 *
32-----	7,8178 * *
24-----	7,5802 * *
8-----	7,2029 * *
5-----	6,1778 * *
0-----	5,1730 *

Houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos "5" e "127", "0" e "8", "0" e "24",

"0" e "32" e finalmente "0" e "127".Pode-se concluir portanto que alterações significativas na reflectância das folhas de Eucalipto correspondente a essa banda espectral só foram detectadas 8 horas após a sua coleta.

Finalmente a Tabela 7 mostra o quadro da análise de variância para as médias dos tratamentos considerando a banda TM3.

Tabela 7 - Análise de variância para as médias dos tratamentos banda TM3.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	DESVIO	F
Tratamento	5	80,94	16,19	4,02	9,01*
Resíduo	52	93,38	1,80	1,34	
Total	57	174,32			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

O valor de F foi aqui também significativo, seguindo-se a aplicação do teste de Tukey, considerando  $\Delta=1,68$  para a comparação da média do tratamento "8" e  $\Delta=1,57$  para a comparação das demais médias.O resultado ficou portanto:

Tratamento	Médias
127-----	7,8247 *
32-----	6,8877 * *
24-----	6,7994 * *
8-----	6,3720 * *
5-----	5,6337 * *
0-----	4,4683 *

Este resultado encontrado foi exatamente igual ao alcançado na comparação entre as médias realizada para a banda TM2, existindo portanto diferenças significativas entre os mesmos tratamentos.

### 3.3.2-ARAUCÁRIA

Os dados gravados em fita magnética foram processados da mesma forma como foram aqueles gerados no experimentos envolvendo as folhas de Eucalipto.A Figura 22 ilustra os gráficos de repetições específicas de cada um dos níveis de danos ("tratamentos") considerados.

Aqui também pode-se verificar a degradação das curvas após 0.77um,o que é explicado pela presença do filtro infravermelho diante da lâmpada do projetor. Com exceção do gráfico referente ao nível de

dano "4", cuja curva é significativamente diferente das demais, todos os demais gráficos apresentaram-se semelhantes entre si, com valores maiores no fator de reflectância nas regiões do verde (0,56nm) e vermelho (de 0,7um a 0,77um), quando comparado com os resultados alcançados no experimento anterior.

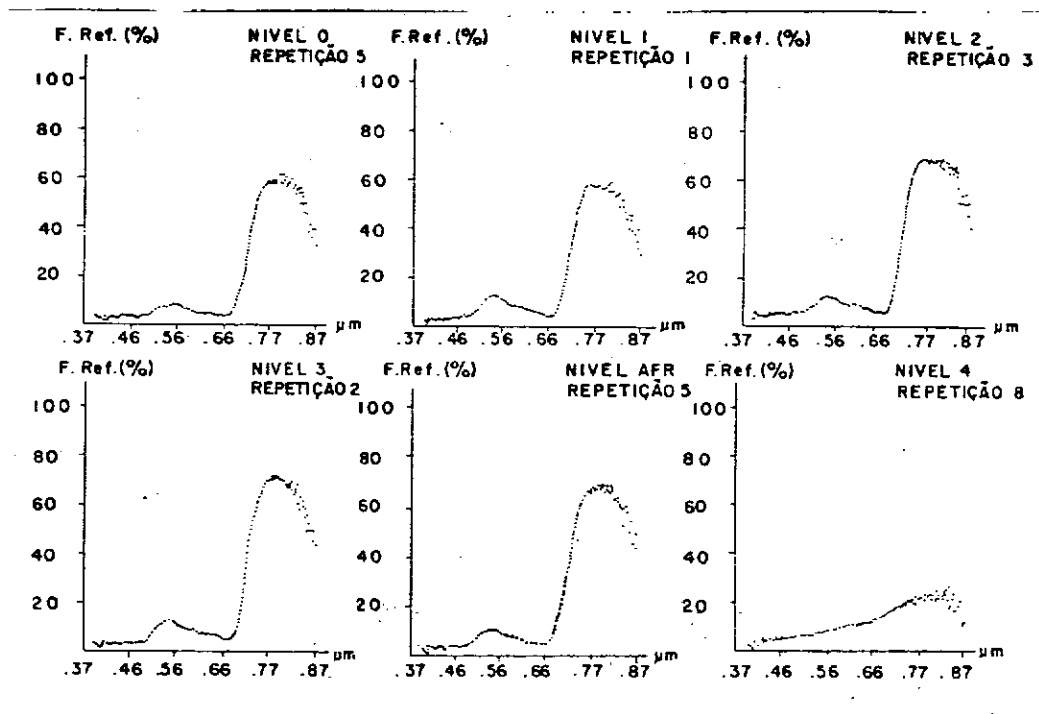


Fig.22 - Reflectância das acículas de Araucaria provenientes de indivíduos que apresentavam diferentes níveis de danos.

A Figura 23 mostra o gráfico contendo os valores dos fatores de reflectância x as bandas TM.

A análise deste gráfico permite observar que há uma tendência de maiores valores dos fatores de reflectância com o aumento do nível de dano para as bandas consideradas. Ainda pode-se verificar a forma bastante distinta das demais apresentada pela curva da reflectância do nível de dano "4". Vale salientar que as acículas provenientes do indivíduo que apresentava este

nível apresentavam-se com uma coloração marrom (acículas secas). A diferenciação entre as médias foi estudada através da análise de variância a qual será apresentada a seguir.

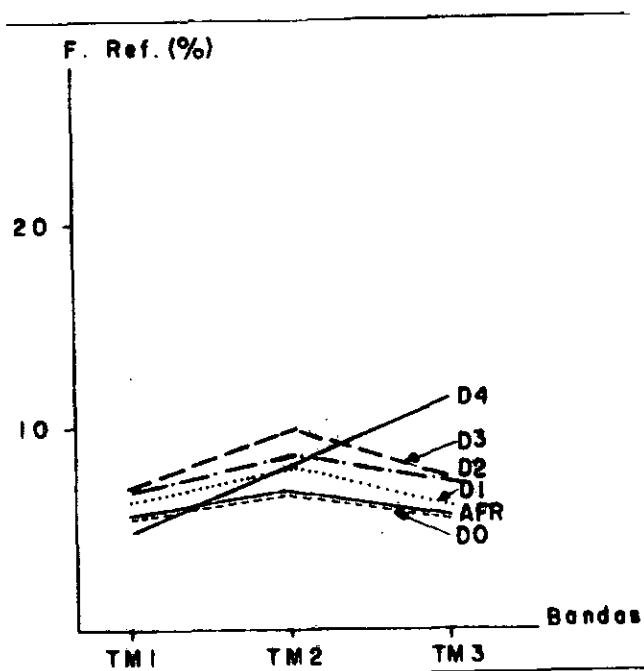


Fig. 23 - Reflectância x bandas Tm, por tratamento (nível de dano).

### 3.3.2.1-ANÁLISE DE VARIÂNCIA

As Tabelas 8,9 e 10 apresentam os dados referentes a simulação das bandas TM1, TM2 e TM3, respectivamente.



Tabela 8 - Médias dos fatores de reflectância para cada tratamento para a banda TM1.

BANDA=TM1		TRATAMENTOS					AFR
Rep	0	1	2	3	4		
1	6,8742	8,4969	8,4385	5,6787	4,2144	5,5073	
2	5,7960	6,6613	6,9156	8,0776	1,7313	5,7622	
3	4,7632	7,9928	8,6000	5,9586	5,5049	4,9409	
4	4,1840	5,3487	4,9040	7,2813	6,7224	4,2961	
5	5,5887	6,3621	9,9410	4,7239	5,1961	7,0853	
6	3,8103	5,1191	6,5316	5,3178	5,7327	4,2781	
7	7,4811	8,0742	4,1498	7,9792	2,5237	6,1677	
8	6,4709	4,7415	5,9473	7,9265	6,5475	6,2646	
9	6,1899	5,1486	5,3325	9,3292	4,1315	6,6431	
10	4,7722	4,0151	7,6062	6,6792	5,9077	3,9935	
MÉDIA	5,5931	6,1960	6,8367	6,8952	4,8212	5,4939	

Tabela 9 - Médias dos fatores de reflectância para cada tratamento para a banda TM2.

BANDA=TM2		TRATAMENTOS					AFR
Rep	0	1	2	3	4		
1	7,7393	10,6986	10,4685	8,4178	6,8549	7,3005	
2	7,0169	9,0366	8,6062	10,8635	2,8612	7,8145	
3	6,3464	10,3100	10,4339	8,0700	9,1796	6,1167	
4	4,7608	7,3109	5,8761	9,2594	11,3568	5,6373	
5	7,1137	8,6114	11,6684	6,9718	8,2291	9,2240	
6	4,6146	7,1391	9,0700	7,4068	8,8163	5,6655	
7	9,3373	10,3361	5,7292	11,1261	4,4836	7,7161	
8	7,1150	5,4969	7,9380	12,4251	9,6675	7,3223	
9	7,0524	6,6574	6,2838	13,0950	6,7980	8,0745	
10	5,5862	5,0897	9,8498	9,0434	9,0458	5,0732	
MÉDIA	6,6683	8,0687	8,5934	9,6679	7,7293	6,9945	

Tabela 10 - Médias dos fatores de reflectância para cada tratamento para a banda TM3.

BANDA=TM3		TRATAMENTOS					AFR
Rep	0	1	2	3	4		
1	6,1680	7,2160	8,2378	6,3268	9,8730	5,2986	
2	5,2265	6,1979	6,5258	8,4084	5,3221	5,7001	
3	5,2398	7,7758	8,3974	6,2297	14,7496	4,3943	
4	4,2841	5,8678	4,6468	7,1196	16,1917	4,4628	
5	5,7908	6,3053	8,5068	5,6099	12,3088	7,0890	
6	3,5722	5,2890	7,9409	5,4581	12,3899	5,6959	
7	7,0438	7,7266	5,4679	8,8921	7,5245	6,6609	
8	5,6875	3,6806	6,4115	8,9573	13,6040	5,4662	
9	5,3958	4,8082	6,9876	9,2810	10,4999	5,8136	
10	5,2742	4,4319	8,7769	8,1034	12,4765	4,1476	
MÉDIA	5,3683	5,9299	7,1899	7,4386	11,4940	5,4729	

No processamento dos dados não houve perda de arquivos a análise de variância foi conduzida considerando um experimentos inteiramente casualizado. A Tabela 11 mostra o quadro da análise de variância para as médias dos tratamentos para a banda TM1.

Tabela 11- Análise de variância para as médias dos tratamentos banda TM1.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	DESVIO	F
Tratamento	5	33,47	6,69	2,59	3,02*
Resíduo	54	119,70	2,22	1,49	
Total	59	153,16			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

Para a comparação entre médias foi considerado  $\Delta=1,95$  resultando em :

Tratamento	Médias
3-----	6,8952 *
2-----	6,8367 *
1-----	6,1960 * *
0-----	5,5931 * *
AFR-----	5,4939 * *
4-----	4,8212 *

Tem-se portanto que houve diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade entre as médias dos tratamentos "4" e "2" e finalmente "4" e "3". Para essa banda TM1 a reflectância foi significativamente menor nas amostras do nível de dano "4", comparado com a reflectância das amostras provenientes dos níveis "3" e "2".

A Tabela 12 mostra o quadro da análise de variância para as médias dos tratamentos, considerando agora a banda TM2.

Tabela 12- Análise de variância para as médias dos tratamentos banda TM2.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	DESVIO	F
Tratamento	5	59,84	11,97	3,46	3,10*
Resíduo	54	208,43	3,86	1,96	
Total	59	268,27			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

Para comparação entre médias foi considerado  $t_{0,05} = 2,53$  resultando em:

Tratamento	Médias
3-----	9,6679 *
2-----	8,5934 * *
1-----	8,0687 * *
4-----	7,7293 * *
AFR-----	6,9945 *
0-----	6,6683 *

Houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos AFR e "3" e finalmente "0" e "3".

A Tabela 13 mostra o quadro da análise de variância para as médias dos tratamentos considerando a banda TM3.

Tabela 13- Análise de variância para as médias dos tratamentos banda TM3.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	DESVIO	F
Tratamento	5	264,31	52,86	7,27	16,99*
Resíduo	54	168,04	3,11	1,76	
Total	59	432,35			

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

Para comparação entre médias foi considerado  $\Delta=2,26$  resultando em:

Tratamento	Médias
4-----	11,4940
3-----	7,4386 *
2-----	7,1899 *
1-----	5,9299 *
AFR-----	5,4729 *
0-----	5,3683 *

Houve portanto diferença significativa entre a média do tratamento "4" e todas as demais que não diferiram entre si. Analisando os resultados obtidos nas três bandas TM consideradas pode-se verificar aspectos importantes. Primeiramente nota-se que para a banda TM1 a média do tratamento "4" foi significativamente diferente das médias dos tratamentos "3" e "2", tendo um valor inferior, ou seja, as amostras provenientes do nível de dano "4" refletiram menos energia na região do azul (0,44um a 0,5um) em relação as amostras provenientes dos níveis "2" e "3". Na região do verde (0,55um a 0,6um) essa diferença desaparece e a média do tratamento "0" (planta sadia) tornou-se diferente da média do tratamento "3", indicando que nesta faixa espectral (banda TM2) as plantas sadias refletem menos energia quando comparadas com aquelas que apresentam o nível de dano "3". Em termos práticos, as plantas sadias apresentam acículas com uma coloração verde de tonalidade mais escura que as acículas de plantas que apresentam o nível de dano "3". Na região do vermelho (0,63um a 0,69um-banda TM3) somente a média do tratamento "4" diferiu das demais, o que podia ser esperado uma vez que as acículas dos indivíduos provenientes deste nível de dano apresentavam uma coloração marrom avermelhado (acículas completamente secas). Importante salientar que em nenhuma das bandas TM houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos "1", "2" e "3", indicando que estas bandas não são as mais propícias para diferenciá-los entre si. Ainda com o aumento do comprimento de onda (TM1==>TM2==>TM3), as médias do tratamento "4" mostraram uma igual tendência de

aumento;isso pode ser verificado no gráfico da Figura 23 .

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na condução de experimentos futuros para a determinação da reflectância de folhas "ex situ" alguns cuidados devem ser tomados em relação as fases de escolha de indivíduos dos quais se fará a extração do material a ser espectrorradiométricamente medido, coleta e armazenamento deste material, simulação das condições ambientais ótimas (laboratório) para as medições, arranjo adequado do material sob o equipamento, que por sua vez deverá ser o mais adequado a natureza e objetivos do experimento, gravação e processamento dos dados gerados, bem como sua visualização e finalmente o delineamento estatístico a ser adotado. Cada experimento em particular deverá ter uma prévia definição destes aspectos, com particulares critérios e procedimentos.

Em ambos os experimentos conduzidos foram adotados exatamente os mesmos procedimentos em todas as suas fases. Dadas as diferenças morfológicas, estruturais e arquitetônicas de ambos os gêneros considerados (Eucalipto e Araucária) foi constatada a necessidade de adaptações destes procedimentos de forma particularizada. Esta necessidade foi principalmente sentida na fase de arranjo do material a ser medido sob a unidade de coleta do espectrorradiômetro. As acículas da Araucária são de difícil manuseio e apresentam, mesmo para um único indivíduo, grandes variações em seus ângulos de inserção nos ramos. Para eliminar este problema, as acículas poderiam ser retiradas dos ramos e seguir-se-ia um procedimento semelhante ao adotado no arranjo das folhas de Eucalipto as quais foram dispostas lado a lado numa única camada, voltadas todas com a mesma face em direção a unidade de coleta do instrumento. Contudo há de se considerar que esta operação demanda mais tempo o que poderia comprometer a estabilidade do estado fisiológico destas acículas, acarretando em influências indesejáveis sobre o resultado das medições.

O critério estabelecido no armazenamento das folhas de Eucalipto foi arbitrário e portanto passível de maiores e completas investigações. Temperatura, luminosidade e umidade são parâmetros que poderiam ser explorados em experimentos futuros, incluindo uma discussão mais aprofundada dos aspectos fisiológicos envolvidos no processo a luz do comportamento espectral do material analisado. O termo comportamento espectral inclui a determinação da transmitância e absorvância espectrais, além da reflectância espectral aqui considerada. Para tanto o equipamento

utilizado deve ser previamente selecionado, conhecendo-se com exatidão os objetivos a serem alcançados e as disponibilidades de equipamento. Assim como já foi mencionado anteriormente, a quase totalidade dos trabalhos envolvendo a determinação do comportamento espectral de folhas "ex situ" valeram-se de espectrofotômetros por permitirem a determinação da reflectância e transmitância espectrais. O espectrorradiômetro aqui utilizado em sua configuração básica foi eficiente e de fácil manuseio, contudo as medições só puderam ser realizadas sobre grupos de folhas com a consequente inclusão de sombras e descontinuidades da camada de folhas e acículas que por certo interferiram nas medições. Quando o interesse é o estudo do comportamento espectral de folhas isoladas o espectrofotômetro parece ser o equipamento mais adequado, quando comparado com o espectrorradiômetro.

O sistema de gravação de dados apresentou duas limitações principais, sendo uma referente a necessidade de um grande número de fitas magnéticas (cada fita permitiu o registro de 80 arquivos-espectro) e estas fitas não constituem um meio seguro de armazenamento de dados sendo passíveis de danos mecânicos e/ou eletrônicos. A minimização destes problemas pode ser atingida pela utilização de um microcomputador acoplado diretamente ao espectrorradiômetro durante as medições, permitindo o registro dos dados em disco flexível ou rígido e a visualização direta dos dados imediatamente após as medições, eliminando inclusive a necessidade do osciloscópio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, W.A.; Richardson, A.J. Interaction of light with a plant canopy. Journal of the Optical Society of America, 58: 1023-1028, 1968.
- Breece, III, H.T.; Holmes, R.A. Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybean and corn leaves "in vivo". Applied Optics, 10(1): 119-127, 1971.
- Carlson, R.E.; Yarger, D.N.; Shaw, R.H. Factors affecting the spectral properties of leaves with special emphasis on leaf water status. Agronomy Journal, 63: 486-489, 1971.
- Daughtry, C.S.T.; Biehl, L.L. Changes in spectral properties of detached leaves. Laboratory for Applications of Remote Sensing. Lafayette. Purdue University, 1984.
- Devlin, R.M. Plant physiology. New York. Dvan Nostrand Company. 1975, 600p.
- Gates, D.M.; Keegan, H.J.; Schleter, J.C.; Weidner, V.R. Spectral properties of plants. Applied Optics, 4 (1): 11-20, 1965.
- Gausman, H.W. ; Allen, W.A.; Myers, V.I. ; Cardenas, R. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L. Agronomy Journal, 61: 374-376, 1969.
- Gausman, H.W.; Allen, W.A.; Cardenas, R. Reflectance of cotton leaves and their structure. Remote Sensing of Environment, 1: 19-22, 1969.
- Gausman, H.W.; Allen, W.A.; Cardenas, R. ; Richardson, A.J. Relation of lighth reflectance to histological and physical evaluations of cotton leaf maturity. Applied Optics, 9: 545-552, 1970.
- Gausman, H.W.; Allen, W.A.; Wiegand, C.L. The leaf mesophylls of twenty crops, their lighth spectra and optical and geometrical parameters. New York. US. Dept. of Agriculture. 1973, p. 1-58, 1973. (Technical Bulletin 1465).
- Gausman, H.W. Leaf reflectance of near-infrared. Photogrammetric Engineering, 2: 183-191, 1974.



- Goel, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. Remote Sensing Reviews, 4: 1-21, 1988.
- Gomes, F.P. Curso de estatística experimental. Piracicaba, SP. Superior de Agricultura Luiz de Queiróz. 1963, 383p.
- Kumar, R. Radiation from plants-reflection and emission: a review. Purdue Research Foundation. (Research Project n:5543), 1972, 88p.
- Lillesaeter, O. Spectral reflectance of partly transmitting leaves: laboratory measurements and mathematical modeling. Remote Sensing of Environment, 12: 247-254, 1982.
- Suits, G.H. The Nature of eletromagnetic radiation. In: Manual of remote sensing. Falls Church. ASP. 1983, p.37-60.
- Swain, P.H.; Davis, S.M. Remote sensing: a quantitative approach. New York. McGraw-Hill. 1978, 396p.
- Thomas, J.R.; Namken, L.N.; Oerther, G.F. ; Brown, R.G. Estimating leaf water content by reflectance measurements. Agronomy Journal, 63: 845-847, 1971.

**PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS  
EDITADAS PELO INPE**

**RELATÓRIOS DE PESQUISA**

- Reportam resultados de pesquisa tanto de natureza técnica quanto científica.

**NOTAS TÉCNICO-CIENTÍFICAS**

- Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, software, sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados e atlas, e documentação de projetos de engenharia.

**MANUAIS TÉCNICOS**

- Descrevem normas, procedimentos, instruções e orientações.

**PUBLICAÇÕES DIDÁTICAS**

- Apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

**TESES E DISSERTAÇÕES**

- Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

**PUBLICAÇÕES SERIADAS**

- Periódicos Técnico-científicos: Boletim de Sensoriamento Remoto, Climanálise: Boletim de Monitoramento e Análise Climática.
- Anais de Eventos