



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-5426-TDI/483

**REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DO TRIGO IRRIGADO (Triticum aestivum, L.) POR ESPECTRORRADIOMETRIA DE CAMPO E APLICAÇÃO DO MODELO SAIL**

Márcio de Morisson Valeriano

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Getúlio Teixeira Batista e Eduardo Delgado Assad, aprovada em fevereiro de 1992.

528.711.7:63

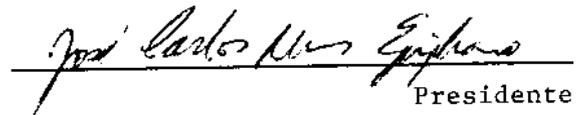
VALERIANO, M.M.

Reflectância espectral do trigo irrigado (Triticum aestivum, L.) por espectrorradiometria de campo e aplicação do modelo SAIL. / M.M.Valeriano. -- São José dos Campos: INPE, 1992. 149p. -- (INPE-5426-TDI/483).

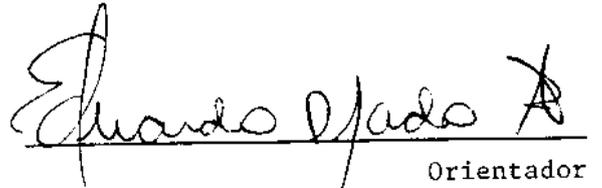
1. Trigo. 2. Spectrorradiometria. 3. Reflectância espectral. 4. Índice de área foliar. I. Título.

Aprovada pela Banca Examinadora  
em cumprimento a requisito exigido  
para a obtenção do Título de Mestre  
em Sensoriamento Remoto

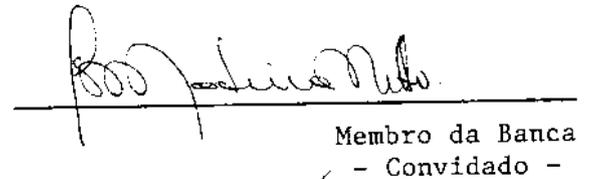
Dr. José Carlos Neves Epiphanyo

  
Presidente

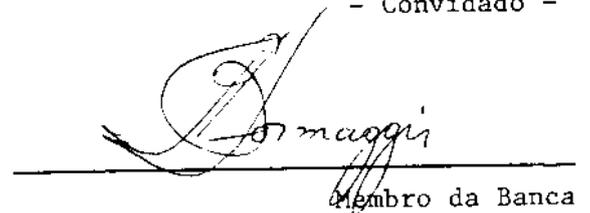
Dr. Eduardo Delgado Assad

  
Orientador

Dr. José da Silva Madeira Netto

  
Membro da Banca  
- Convidado -

Dr. Antonio Roberto Formaggio

  
Membro da Banca

Candidato: Márcio de Morisson Valeriano

São José dos Campos, 07 de fevereiro de 1992



## AGRADECIMENTOS

À colaboração de Cíntia da Costa Correia, Jacomina Derksen, João Alves da Silva, Júlio César Albretch, Marco Valério, Marcus Vinícius Reis, Mariano Pairet Júnior, Nelson de Oliveira Pais, Rubens Ferreira do Nascimento, e de toda a equipe de operários rurais do Centro de Pesquisas Agronômicas do Cerrado; dos colegas do INPE, dos milagres de Alfredo da Costa Pereira e das mágicas de Márcia Rocha, entre muitos.

Aos meus orientadores Dr. Eduardo Delgado Assad e Dr. Getúlio Teixeira Batista pelo grande apoio para a realização deste estudo.

À Fundação Banco do Brasil pelo suporte financeiro durante a fase de campo e à CAPES pelas sempre bemvindas bolsas de estudo.

Aos senhores Dr. Lúcio José Vivaldi e Dr. Dalton Linneu Valeriano Alves pela preciosa orientação no trabalho.



## RESUMO

A reflectância espectral de dosséis de trigo (*Triticum aestivum*, L.) foi analisada em função de suas variáveis biofísicas, baseando-se em dados experimentais e em resultados do modelo SAIL, cujo potencial na investigação destas relações foi avaliado. O modelo SAIL calcula a reflectância da vegetação a partir de parâmetros biofísicos e espectrais do dossel e de parâmetros relativos à geometria de iluminação/observação. Os dados referem-se a 7 cultivares em 14 parcelas amostrais, localizadas em Planaltina (DF), sob manejo e irrigação uniformes. As medidas feitas com espectrorradiômetro abrangeram regiões do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (de 547 a 823nm) e foram acompanhadas de levantamentos de dados agrônômicos efetuados em 13 épocas ao longo do ciclo de desenvolvimento (maio a setembro de 1989). As reflectâncias do vermelho e do infravermelho próximo mostraram-se muito relacionadas ao IAF, através de regressão logarítmica, principalmente antes do IAF máximo. As variáveis levantadas no experimento foram aplicadas no modelo após serem complementadas por dados da literatura e as simulações tiveram comportamento semelhante ao dos dados observados. Os dados espectrais dos componentes de dossel foram considerados fundamentais como base quantitativa para estudos sobre as relações espectro-agronômicas.



FIELD SPECTRORADIOMETRY AND SAIL MODEL APPLICATION TO  
IRRIGATED WHEAT (*Triticum aestivum*, L.) CANOPIES SPECTRAL  
REFLECTANCE

ABSTRACT

Experimental data and results of SAIL model supported a study relating the spectral reflectance of wheat canopies (*Triticum aestivum*, L.) to their biophysical parameters which included an evaluation of the model potential for investigating such relationships. The SAIL model calculates the spectral reflectance of vegetation as a function of canopy biophysical and spectral parameters and of the viewing/illuminating geometry. Data were taken over 7 varieties on 14 plots, placed in Planaltina (DF), under homogeneous management and irrigation schedules. The measurements taken from spectroradiometer in the visible to the near-infrared portion of the electromagnetic spectrum (from 547 to 823nm) and the agronomic data were determined together on 13 dates throughout the growing season (from May to September, 1989). The red and the near-infrared reflectance showed strong relationship to the leaf area index (LAI) under logarithmic regression, mainly before LAI reaches its maximum. The model was applied with experimental field data complemented by data found in literature, and the model simulations and the measured data had similar behavior. Canopy single component spectral data were considered of great importance as quantitative basis for studies concerning spectral-agronomic relationships.



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvii
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
<u>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u>	<u>3</u>
2.1 - A folha e o espectro solar.....	3
2.2 - O dossel e o espectro solar.....	8
2.2.1 - A espectrorradiometria de campo.....	8
2.2.2 - A resposta espectral do dossel.....	10
2.3 - Modelos da resposta espectral do dossel.....	17
2.3.1 - Histórico e aplicações.....	17
2.3.2 - O Modelo SAIL.....	31
2.3.2.1 - Descrição.....	31
2.3.2.2 - Dados de entrada no modelo SAIL.....	34
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS.....</u>	<u>41</u>
3.1 - Condução e manejo da cultura.....	42
3.2 - Condução do experimento.....	43
3.3 - Levantamento dos dados de campo.....	45
3.3.1 - Dados radiométricos.....	45
3.3.2 - Dados agronômicos.....	48
3.4 - Dados de entrada para o modelo.....	49
3.5 - Tratamento dos dados obtidos.....	51

<u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES</u> .....	55
4.1 - Apresentação dos resultados.....	55
4.1.1 - Os dados e o desenvolvimento do trigo.....	59
4.1.2 - Teste do efeito de cultivar.....	65
4.1.3 - Relações entre dados espectrais e agronômicos..	67
4.2 - Relações entre RR (EST2) e RNIR (EST4) e o IAF...	71
4.2.1 - Resultados experimentais.....	71
4.2.2 - Abordagem pelo modelo.....	75
4.2.2.1 - Teste do modelo SAIL.....	75
4.2.2.2 - Simulações.....	78
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES</u> .....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
APÊNDICE A - DADOS DE CAMPO.....	95
APÊNDICE B - ANÁLISE DE DUNCAN PARA CULTIVARES.....	105
APÊNDICE C - COMPRIMENTOS DE ONDA DO RADIÔMETRO.....	109
APÊNDICE D - PROGRAMA PARA O MODELO SAIL.....	111

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Relação entre os FRBD nas bandas R e NIR e o IAF para dosséis de trigo.....	15
2.2 - Diagrama esquemático de um dossel vegetal e dos parâmetros da teoria Kubelka-Munk.....	19
2.3 - Curvas de reflectância hemisférica de folhas (Rh) do trigo de 500 a 800 nm.....	38
2.4 - Curvas de reflectância (Rh) e transmitância hemisférica (Th) de 500 a 800 nm de espiga (a), folha (b), palha (c) e colmo (d) do trigo.	39
3.1 - Diagrama da disposição das parcelas e suas respectivas cultivares.....	42
3.2 - Cronograma das atividades ligadas à cultura.....	43
3.3 - Diagrama esquemático da coleta de dados radiométricos, com as respectivas áreas de amostragem.....	46
4.1 - Curvas espectrais de reflectância da parcela 10 ao longo do ciclo.....	56
4.2 - Curva espectral de reflectância da parcela 10 na missão 5.....	58
4.3 - Gráfico do desenvolvimento da MFT. Os símbolos representam parcelas das cultivares BR-24 (□), BH-1146 (Δ), BR-16 (◇), Anahuac (+), Candeias (★), BR-12 (■) e BR-10 (▲).....	59
4.4 - Gráfico do desenvolvimento de MST.....	60
4.5 - Gráfico do desenvolvimento de H <sub>2</sub> O(%).....	61
4.6 - Gráfico do desenvolvimento de IAF.....	61
4.7 - Gráfico do desenvolvimento de H.....	62
4.8 - Gráfico do desenvolvimento de EST1 (RG).....	63
4.9 - Gráfico do desenvolvimento de EST2 (RR).....	64
4.10 - Gráfico do desenvolvimento de EST4 (RNIR).....	64

4.11 - Diagrama de dispersão entre IAF e os FRBD (RR e RNIR) com respectivas curvas de regressão logarítmica para dados ao longo de todo o ciclo....	72
4.12 - Diagrama de dispersão entre IAF e os FRBD (RR e RNIR) com curvas de regressão logarítmica para dados antes (---) e depois (- -) do florescimento.....	73
4.13 - Diagramas de dispersão e curvas de regressão linear entre os FRBDc (SAIL) e os FRBDo, com dados ao longo de todo o ciclo.....	75
4.14 - Diagramas de dispersão e curvas de regressão linear entre os FRBDc (SAIL) e os FRBDo, com dados para parcelas sem espigas.....	77
4.15 - Simulação SAIL da variação de RRc e RNIRc em função de IAF para solo claro (Rg(R)=17,00% e Rg(NIR)=21,00%), solo escuro (Rg(R)=8,50% e Rg(NIR)=12,50%) e solo médio (Rg(R)=12,75% e Rg(NIR)=16,75%).....	79
4.16 - Simulação SAIL da variação de RRc e RNIRc em função de IAF para dosséis com DAF uniforme, e com folhas dispostas em $z_1$ horizontal, vertical, $z_1=65^\circ$ e $z_1=25^\circ$ .....	80
4.17 - Simulação SAIL da variação de RR e RNIR em função de Rh para dosséis com DAF uniforme, e com folhas dispostas horizontalmente verticalmente.....	82

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Distribuição angular de folhas do trigo em três fases da cultura.....	37
4.1 - Níveis de significância do efeito de cultivar sobre parâmetros espectrais e agronômicos por missão.....	65
4.2 - Coeficientes de correlação linear simples (r) entre 5 variáveis agronômicas e 3 variáveis espectrais.....	67
4.3 - Coeficientes de correlação (r) entre dados agronômicos e as variáveis canônicas AGRO e SPC.....	69
4.4 - Coeficientes de correlação (r) entre dados espectrais e as variáveis canônicas AGRO e SPC.....	70



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A(x)$	- Absorção acumulada de energia por área, do topo do dossel até a profundidade $x$
$a$	- Coeficiente de extinção de fluxo difuso
$b$	- Coeficiente de retrodifusão de fluxo difuso
$B$	- Coeficiente de retrodifusão
$B'$	- Coeficiente de retrodifusão de fluxo especular
$c$	- Coeficiente de retrodifusão de fluxo especular
$c'$	- Coeficiente de difusão de fluxo especular
$cm$	- Centímetro
$DAF$	- Distribuição angular de folhas
$D.A.P.$	- Dias após o plantio
$dI$	- Variação do fluxo radiante na direção descendente
$dI'$	- Variação da fração especular de $I$
$dJ$	- Variação do fluxo radiante na direção ascendente
$dn$	- Variação do IAF acumulado
$dpv$	- Variação da fração dos componentes que podem ser vistos à profundidade $x$ , do ângulo de observação $z_v$
$dx$	- Variação de profundidade no dossel
$E(s)$	- Densidade de fluxo radiante especular descendente
$E(+d)$	- Densidade de fluxo radiante difuso ascendente
$E(-d)$	- Densidade de fluxo radiante difuso descendente
$E(+d, i, x)$	- Densidade de fluxo radiante difuso ascendente na camada $i$ , à profundidade $x$

EST1	- Reflectância na região do verde
EST2	- Reflectância na região do vermelho
EST4	- Reflectância na região do infravermelho próximo
F	- Coeficiente de difusão
F'	- Coeficiente de difusão para fluxo especular
f	- Ângulo azimutal relativo
fd	- Fração difusa do fluxo radiante descendente
fl	- Ângulo azimutal de orientação foliar
FRBD	- fator de reflectância bidirecional
FRBDc	- Fator de reflectância bidirecional calculado pelo modelo
FRBDo	- Fator de reflectância bidirecional observado
fs	- Fração especular do fluxo radiante descendente
H	- Altura média de plantas
h	- Distância aproximada entre o sistema óptico do radiômetro e a superfície dos alvos
H <sub>2</sub> O	- Porcentagem de água na planta
g(zl, fl)	- Densidade probabilística de orientação zenital e azimutal da área foliar
IAe	- Índice de área de espigas
IAF	- Índice de área foliar verde
IAP	- Índice de área de palha
I	- Fluxo radiante descendente
Io	- Fluxo incidente no topo do dossel
I'	- Fração especular de I
I'o	- Fração especular do fluxo incidente no topo do dossel

I(n)	- Fluxo radiante na direção n-positiva desde IAF=n
IR	- Região do infravermelho
J	- Fluxo radiante na direção n-negativa
jh	- Média de área de projeção horizontal
jv	- Média de área de projeção vertical
k	- Coeficiente de absorção
k'	- Coeficiente de extinção de fluxo especular
L	- Radiância
m	- Metro
MIR	- Região do infravermelho médio
MFT	- Matéria fresca total
MSC	- Matéria seca de colmos
MSe	- Matéria seca de espigas
MSf	- Matéria seca de folhas
MSp	- Matéria seca de folhas senescentes
MST	- Matéria seca total
N	- IAF total do dossel ou da camada de dossel
n	- IAF acumulado a partir do topo do dossel (ou da camada de dossel)
ne	- Número de espigas por metro quadrado
nh	- Número médio de componentes horizontais por volume
nv	- Número médio de componentes verticais por volume
NIR	- Região do infravermelho próximo
PCS	- Porcentagem de cobertura do solo
pv(zv, x)	- Fração dos componentes que podem ser vistos à profundidade x, do ângulo de observação zv
PVI	- Índice perpendicular de vegetação
r	- Fluxo radiante refletido
R	- Região do vermelho

Rh	- Reflectância hemisférica do componente
Rg	- Reflectância do solo subjacente
RIR	- Reflectância na região do infravermelho
RMIR	- Reflectância na região do infravermelho médio
RNIR	- Reflectância na região do infravermelho próximo
RNIRc	- Reflectância na região do infravermelho próximo calculada pelo modelo
RNIRO	- Reflectância na região do infravermelho próximo observada
RR	- Reflectância na região do vermelho
RRc	- Reflectância na região do vermelho calculada pelo modelo
RRO	- Reflectância na região do vermelho observada
RS	- Razão simples
RVIS	- Reflectância na região do visível
s	- Coeficiente de espalhamento
SAIL	- Scattering of Arbitrarily Inclined Leaves
sec	- Secante
T	- Fluxo radiante transmitido
Th	- Transmitância hemisférica do componente
t	- Fluxo radiante difuso descendente
U	- Coeficiente de absorção
U'	- Coeficiente de absorção para fluxo especular somente
VIS	- Região do visível
x	- Profundidade do dossel ou da camada de dossel
$x_{inf}$	- Profundidade óptica infinita do modelo
z	- Ângulo zenital solar
z1	- Ângulo zenital de orientação foliar

- zs - Ângulo zenital de incidência do  
fluxo especular
- zv - Ângulo zenital de observação



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Com o advento da era espacial, a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto teve seu potencial ampliado. Considerando a aquisição dos dados através de sensores a bordo de satélites, é possível levantar informações relativamente freqüentes sobre áreas extensas. A energia eletromagnética é, sob este ponto de vista, o veículo das informações que se originam no alvo e são captadas pelos sensores. O valor da energia refletida pelos alvos da superfície terrestre em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético pode ser relacionado a características do alvo.

Por outro lado, a espectroscopia de campo é uma técnica mais imediata e precisa para o estudo das relações entre dados espectrais e informações ligadas ao alvo. Por permitir maior controle das condições do alvo e da aquisição dos dados, a espectroscopia de campo tem sido largamente utilizada nos trabalhos de pesquisa em sensoriamento remoto.

Em agricultura, os dados de satélite têm sido bastante utilizados em identificação e mapeamento das diferentes culturas agrícolas. Outra finalidade da pesquisa em sensoriamento remoto agrícola é o desenvolvimento de estimativas de variáveis biofísicas das culturas por meio dos dados espectrais. Estes dados vêm sendo reconhecidos como bons indicadores das condições gerais das culturas agrícolas.

São conhecidos vários estudos no sentido de modelar o processo de interação dos dosséis vegetais com a

energia eletromagnética dos quais surgiram alguns modelos de reflectância espectral da vegetação, cujo potencial ainda não foi totalmente explorado. A utilização de tais modelos apresenta-se como uma ferramenta promissora em virtude de sua flexibilidade em simulações de mudanças das variáveis envolvidas, além de permitir estimativas de variáveis da vegetação através de técnicas de inversão dos modelos. Dentre os modelos mais consagrados está o SAIL (Scattering of Arbitrarily Inclined Leaves), aplicado neste estudo.

O presente trabalho teve como objetivos:

- 1) analisar o comportamento agronômico e espectral da cultura do trigo ao longo de seu ciclo;
- 2) levantar informações para questões ligadas à natureza e ao grau de dependência nas relações entre as variáveis espectrais e agronômicas; e
- 3) avaliar o desempenho do modelo de reflectância espectral SAIL em relação aos resultados experimentais.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 - A FOLHA E O ESPECTRO SOLAR

O conhecimento das interações da radiação solar com a vegetação é fundamental para a interpretação de dados de sensoriamento remoto para fins agrícolas. A parte do organismo vegetal envolvida nessa interação é referida neste estudo como dossel, sendo este constituído por folhas, caules, espigas, flores, etc., conforme o tipo e as condições da planta. Sob o ponto de vista do sensoriamento remoto, um determinado tipo de dossel é caracterizado pelo comportamento espectral de seus componentes, sua estrutura interna e sua organização no espaço.

Devido à especialização como estruturas fotossintetizantes, as folhas têm grande importância na interação do fluxo radiante com a vegetação. A estrutura da folha desempenha papel de relevo na sua reflectância espectral, uma vez que detalhes da anatomia foliar têm funções variadas no processo de interação.

Uma folha típica de gramínea, como o trigo, objeto deste estudo, apresenta fileiras de células grandes, chamadas de células buliformes (Esau, 1974). Estas células formam faixas de diferentes larguras, e são conhecidas como células motoras, por estarem envolvidas nos processos de enrolamento e de dobramento das folhas. O mesófilo das gramíneas mostra, como regra, ausência de diferenciação em parênquimas paliçádico e esponjoso, ou seja, elas têm mesófilo compacto. No entanto, abaixo das duas camadas epidérmicas, há fileiras de células que apresentam organização mais regular do que as do restante do mesófilo. Com escler-

rênquima bastante desenvolvido, as folhas de gramíneas comumente apresentam suas fibras dispostas em forma de placas longitudinais que se estendem dos feixes vasculares maiores em direção à epiderme.

No que se refere à resposta espectral de uma folha típica, Knipling (1970) considerou três grandes faixas do espectro eletromagnético: a região do visível (VIS), com reflectância baixa, a região do infravermelho próximo (NIR), com reflectância relativamente alta e a do infravermelho médio (MIR), com reflectância relativamente baixa. A alta absorção na região do VIS é devida principalmente aos pigmentos clorofilianos, embora outros pigmentos também atuem. A energia radiante interage com as folhas no mesófilo, uma vez que a cutícula é praticamente transparente. O fluxo é difundido através da cutícula e da epiderme às células e espaços intercelulares de ar do mesófilo.

De 700 a 1300nm, cerca de 40 a 60% da energia radiante é espalhada para cima (retroespalhamento) pela superfície de incidência e constitui a porção da radiação correspondente à reflectância; quase o total do restante, por sua vez, é espalhado para baixo, e constitui a porção transmitida (transmitância). Esse mecanismo único de espalhamento é o motivo da semelhança entre o espectro transmitido e o refletido. Em folhas de gerânio variegado, na parte aclorofilada, a reflectância no VIS se iguala à reflectância no NIR, indicando que a interação do VIS com a estrutura foliar não é diferente da interação do NIR. No MIR, a reflectância das folhas está condicionada à forte absorção causada pela água. Portanto, os pigmentos e a água influem nas regiões espectrais de reflectância relativamente baixa de modo indireto, e não têm, por si, essas características espectrais (Knipling, 1970).

Sinclair et al. (1973) apresentaram uma hipótese pela qual a luz tem trajetória difusa através do mesófilo, ocorrendo, no interior da folha, a reflexão total e a reflexão crítica. Mestre (1935) citado por Sinclair et al. (1973) considera que, para ocorrer reflexão crítica, a radiação deve atravessar materiais de índices de refração contrastantes e o ângulo de incidência deve ser maior que o ângulo crítico de reflexão. O mesófilo esponjoso das folhas parece estar dentro das duas condições, havendo grandes espaços intercelulares bem como células com paredes dispostas em todas as orientações possíveis.

Considerou ainda, aquele autor, ser possível a reflexão na superfície das folhas. A reflexão especular ocorre em folhas com cutícula extremamente lisa, caso em que obedece às leis da óptica geométrica, e pode, portanto, ser calculada a partir do ângulo de incidência e do índice de refração da cutícula. A reflectância difusa na superfície tem origem na rugosidade de cutículas de superfície acidentada, não sendo, portanto, passível de ser calculada. A intensidade desta reflectância, segundo um dado ângulo de incidência sobre a superfície difusora, tende a obedecer à lei do cosseno de Lambert.

Em decorrência de sua hipótese, Sinclair et al. (1973) inferiram que, quanto maior o poder de difusão do tecido do mesófilo, maior deveria ser o potencial de reflexão da folha. Examinando os processos pelos quais ocorreria a reflexão interna, Mestre (1935), citado por Sinclair et al. (1973), concluiu que o espalhamento devido às organelas e pequenas partículas do interior das células não deveria ocorrer, por não se observar em folhas albinas o padrão de espalhamento de Rayleigh (predominantemente azul), que assim resultaria. Em face destas e de outras evidências, a estrutura do mesófilo foi considerada a mais

provável causa do poder difusivo das folhas. Verificaram ainda que a difusão no tecido do mesófilo favorece a probabilidade de absorção dos comprimentos de onda do VIS pelos pigmentos, em virtude do aumento da trajetória interna. Com o aumento do poder de difusão do mesófilo, a transmitância decresce, aumentando a reflexão e a absorção.

Dinger (1941), citado por Sinclair et al. (1973), observou que a clorofila é transparente no NIR, onde a reflectância e a transmitância são altas. Sinclair et al. (1973), baseados em estudos sobre a RNIR de folhas de diferentes ecossistemas (Obatan, 1941 e 1944, citados por Sinclair et al., 1973), não observaram padrão algum de resposta consistente, e foi concluído que também a cutícula e a epiderme não estão envolvidos na RNIR.

Ripple (1986) verificou que a água, além da influência direta sobre o RMIR, tem efeitos sobre a RVIS e a RNIR. As relações entre o teor de água foliar e a RVIS e a RNIR resultam, respectivamente, da variação do nível de clorofila e da estrutura interna. Folhas sob estresse hídrico apresentaram, desse modo, reflectância maior no R e menor no NIR.

Além da reflectância ocorrida conforme os mecanismos explicados anteriormente, a reflectância especular, que é originada da cutícula das folhas, também foi objeto de alguns trabalhos (Vanderbilt e Grant, 1983; Grant et al., 1987). A cutícula das plantas é estratificada e frequentemente apresenta estruturas cerosas, identificáveis por microscopia eletrônica. No caso do trigo, há estruturas aciculares irregulares, distribuídas sobre uma superfície cerosa plana. A reflexão especular, que aí ocorre, pode ter uma importância razoável, dependendo da situação de aquisição do dado espectral. Nesse caso, a reflectância observada

não corresponde à interação da luz com o mesófilo somente, havendo uma variação da reflectância independente da situação do mesófilo (Vanderbilt e Grant, 1983). Grant et al. (1987) observaram que a reflectância especular das folhas está sujeita a efeitos de condições ambientais, de distúrbios fisiológicos e da fenologia da planta, que atuam através de modificações da estrutura dos corpos cerosos da cutícula.

Subtraindo a porção especular da reflectância total, tem-se somente a fração difusa, que é a que penetrou na folha, interagindo com os pigmentos. Portanto, as bandas de absorção são mais pronunciadas para a porção difusa (Vanderbilt e Grant, 1983), o que permite melhor observação da resposta causada pela interação com o mesófilo isoladamente.

Gausman et al. (1973), estudando o mesófilo de plantas cultivadas, observaram que as folhas de mesófilo compacto foram as que apresentaram as menores reflectâncias em 1000nm, em concordância com a natureza da reflectância do NIR, descrita anteriormente. Naquele estudo, a folha do trigo apresentou-se como uma exceção, mostrando uma reflectância comparável à de folhas dorsiventrais, mesmo sendo de estrutura compacta. Porém, examinando microfotografias do corte transversal da folha, verificaram que o mesófilo do trigo é bem mais poroso do que o das outras gramíneas do estudo (cana e milho). Isto indica que a folha do trigo deve ter comportamento espectral mais próximo ao de plantas de mesófilo estratificado do que a do milho ou a da cana.

## 2.2 - O DOSSEL E O ESPECTRO SOLAR

### 2.2.1 - A ESPECTROSCOPIA DE CAMPO

Uma condição fundamental para os procedimentos de espectroscopia é que medidas efetuadas em diferentes horários e localidades possam ser comparadas. Considera-se que dados de um experimento tenham maior valor quando usados em conjunto com dados de outro experimento ou em um teste de modelo. No caso de alvos agrícolas, sabe-se que a reflectância de um dossel varia com a configuração da situação de iluminação e de observação (geometria de cena), não se limitando às características biofísicas do dossel.

É preciso processar o dado bruto obtido pelo radiômetro (que é um sinal proporcional à radiância da cena) em unidades comparáveis, os fatores de reflectância (Bauer et al., 1986). O fator de reflectância bidirecional (FRBD) é definido como sendo a relação entre o fluxo radiante refletido por uma superfície de uma amostra e o fluxo refletido, na mesma geometria de cena, por uma superfície ideal, perfeitamente difusora (painel de referência). Para pequenos ângulos de observação (menores que  $20^{\circ}$ ), a expressão fator de reflectância bidirecional (FRBD) é usada correntemente em trabalho de campo, como sendo associada a duas direções, uma referente ao sensor e a outra referente ao iluminante (o disco solar, em medidas de campo). As condições ideais básicas para o procedimento são: observações freqüentes do painel de referência, ângulos zenitais solares menores que  $45^{\circ}$ , nenhuma nuvem nas proximidades do disco solar e distância adequada entre o sensor e o alvo.

Um procedimento recomendável (Jackson e Pinter Jr., 1986) para fazer a calibração dos dados consiste na obtenção dos dados de referência no início, no

meio e no final de cada sequência de medições. Uma interpolação com base nestas três medições e seus horários ajusta o dado da placa de referência ao horário de cada medida de cada parcela.

O método de calibração proposto por Duggin (1980), simplifica o procedimento no campo. Com a montagem prévia de um arquivo de coeficientes horários para a localidade do experimento, dispensam-se as freqüentes leituras sobre a placa nos dias de medições sobre os alvos. O coeficiente horário consiste num par de medidas do tipo irradiância solar/radiância da placa de referência, obtidas, idealmente, no mesmo instante e no mesmo local. Os coeficientes horários só servem para as unidades detectoras com as quais se obtiveram essas medidas, e a cada coeficiente está associado um determinado ângulo solar sendo fixo o ângulo de observação. Um coeficiente deve ser obtido a cada 5 minutos de intervalo durante toda a trajetória do disco solar. Cada coeficiente horário (fator de calibração) é função do cosseno do respectivo ângulo zenital solar, o que permite obter uma equação de regressão para cada faixa de comprimentos de onda em estudo.

Na tomada de dados espectrais no campo, cada leitura de radiância dos alvos é associada a uma leitura da irradiância solar tomada instantes antes ou depois (idealmente simultâneas), com uso de radiômetro provido de coletor cosseno. O registro do horário e da data de cada leitura, permite a determinação do ângulo zenital solar, através do qual o valor do coeficiente horário correspondente pode ser calculado com o uso da equação de regressão obtido. Aplicando essa relação ao valor de irradiância do coletor, estima-se o valor de radiância da placa de referência, dispensando sua determinação no momento das observações.

### 2.2.2 - A RESPOSTA ESPECTRAL DO DOSSEL

Quando se estuda a reflectância de um dossel, fatores como solo, sombras e a própria morfologia do dossel atuam junto com a reflectância de folhas simples. Em bases percentuais, a reflectância de um dossel é consideravelmente menor do que o de uma folha isolada (Knipling, 1970). Os níveis de reflectância de um dossel são 40 e 70% dos de uma folha, respectivamente, nas regiões do VIS e do NIR. Isso resulta num realce do platô do infravermelho, que é causado pela transmissão, através das folhas superiores do dossel, da energia refletida pelas folhas inferiores, resultando no processo conhecido por mecanismo de múltiplas camadas, descrito por Allen e Richardson (1968).

Das medidas radiométricas derivam-se alguns índices espectrais propostos para estimar vários parâmetros agrônômicos, como porcentagem de cobertura do solo (PCS), índice de área foliar (IAF), matéria fresca total (MFT) e produtividade. Geralmente incorporando mais de uma banda, esses índices se apóiam no fato de que, com o aumento da biomassa fotossinteticamente ativa, há um aumento na reflectância do NIR e um decréscimo na reflectância do R. Muitos desses índices, que envolvem razões entre bandas, são supostamente independentes da quantidade de iluminação e eliminam a necessidade de determinação de irradiância para o cálculo das reflectâncias. A razão entre bandas, ao contrário das reflectâncias puras, contorna também os erros introduzidos nas estimativas de radiância pela resposta não-lambertiana dos painéis de referência (Pinter Jr. et al., 1983). Há outro grupo de índices denominados índices ortogonais ou perpendiculares, que consistem em polinômios do primeiro grau também envolvendo mais de uma banda espectral.

Vários trabalhos a respeito da relação entre esses índices e parâmetros biofísicos da vegetação foram feitos. Dentre eles, Tucker (1979); Daughtry et al. (1980); Aase et al. (1984); Best e Harlan (1985); Hatfield et al. (1985); e Wiegand e Richardson (1987). A maior parte desses trabalhos explora, em essência, as relações obtidas experimentalmente, através de regressões. Os diferentes índices, não raro, apresentam-se funcionalmente equivalentes como foi observado por Perry e Lautenschlager (1984) e Dusek et al. (1985). Apesar disso, conforme a situação, estes índices mostram diferenças no desempenho como indicadores da condição do dossel.

Segundo Knipling (1970), quando doenças ou estresses fisiológicos afetam as propriedades espectrais de folhas individuais, as mudanças iniciais mais pronunciadas freqüentemente ocorrem na região do VIS, devido à sensibilidade da clorofila a distúrbios fisiológicos. Porém, a detecção das condições de estresse se baseia, não na mudança de resposta de folhas individuais, mas na redução da área foliar total exposta ao sensor. Essa redução pode surgir da perda direta de folhas, da mudança de sua orientação, ou da interrupção do crescimento da planta. Nesses casos, a RNIR tende a ser alterada relativamente mais do que a RVIS, por causa da redução do realce do infravermelho, ou por um aumento da exposição do solo.

Demetriades-Shah e Court (1987) consideraram que deficiência de nutrientes pode tanto ter influência indireta (via estrutura, crescimento), como ser diretamente responsável por mudanças espectrais. A deficiência de nitrogênio causa tipicamente uma clorose, resultando em amarellecimento. Isso se deve à presença do nitrogênio nas moléculas de clorofilas. A concentração de clorofila pode ser

estimada quantitativamente através de medidas de reflectância sobre a cultura. Entretanto, os autores verificaram que o contraste entre a cultura e o solo é muito maior do que entre a cultura sadia e a cultura clorótica. Assim, a reflectância do solo pode encobrir perfeitamente a detecção de clorose em dosséis com pequena PCS.

O nível de nitrogênio na cultura do trigo ligado à reflectância foi estudado por Hinzman et al. (1986) com base nas características de crescimento. O crescimento das plantas foi significativamente afetado por diferentes níveis de fertilização, o que levou a alterações da reflectância. A resposta a níveis crescentes de nitrogênio foi caracterizada por um decréscimo na reflectância do VIS, com acréscimo na do NIR. As maiores diferenças observadas ocorreram na região do NIR, indicando maior efeito dos tratamentos sobre a massa de folhas do que sobre a absorção clorofiliana. Os padrões temporais da resposta espectral e das características agronômicas tiveram as mesmas tendências. A reflectância máxima do NIR ocorreu junto com o máximo IAF, acontecendo o oposto com o R. Quando se diminuiu a área foliar verde, a reflectância no R aumentou.

Baret et al. (1987) fizeram medições dos fatores de reflectância sobre dosséis de trigo, com o emprego de um radiômetro de alta resolução espectral, para levantar dados adicionais contidos em bandas estreitas e que não se evidenciam por medições em bandas largas. Aquele estudo concentrou-se no "red edge" (definido como o posicionamento, no espectro, do ponto de inflexão da reflectância do R para o NIR) e no 'red slope' (a declividade da curva de reflectância na região do espectro localizada entre 670 e 760nm). Verificaram aqueles autores que as variáveis espectrais são independentes das cultivares observadas e das datas de plantio, porém muito relacionadas à fenologia dos

dosséis. Estas variáveis mostraram-se muito úteis na complementação dos dados espectrais para observação da vegetação, uma vez que os dados espectrais e o IAF apresentam tendências igualmente parabólicas ao longo do ciclo.

Com a maturação e senescência dos dosséis de trigo, suas reflectâncias se aproximam daquelas do solo exposto. A senescência é acompanhada de uma degradação dos pigmentos e, conseqüentemente, da diminuição da absorção no VIS. A diminuição da reflectância no NIR é atribuída a mudanças na disposição e na magnitude da área foliar (Hinzman et al., 1986) que, segundo Knipling (1970), deve ser seguida da degeneração da estrutura celular .

No que concerne a relações espectro-agronômicas, o IAF tem sido estudado com especial atenção, devido ao alto interesse que desperta como informação agronômica, e à sua evidente relação com a resposta espectral. O IAF verde é um atributo fundamental dos dosséis por serem as folhas o tecido dominante na fotossíntese das plantas. Tucker (1979) estudou combinações das bandas do R e do NIR e concluiu que estas são muito sensíveis às variações de IAF, daí seu emprego em muitos dos índices espectrais, com vários trabalhos a respeito.

Ilustrando esse relacionamento, a Figura 2.1 mostra a relação entre o IAF e o FRBD na faixa do R e do NIR, para a cultura do trigo, com dados colhidos da emergência até o florescimento. As relações do IAF do trigo com RR e RNIR apresentam-se não-lineares (Daughtry et al., 1980; Hinzman et al., 1986), principalmente quanto à RR, que tende a estabilizar com valores baixos de IAF, ou seja, em torno de 3,0. Para o NIR, o crescimento da reflectância também estabiliza-se, porém com valores maiores de IAF, devido à maior transmitância das folhas nessa faixa do espec-

tro.

Formaggio (1989) testou os modelos de regressão linear, exponencial e logarítmico, através do coeficiente de correlação para dados agronômicos e espectrais obtidos sobre feijão e trigo. Verifica-se em seus resultados que os maiores coeficientes foram obtidos com modelo de regressão logarítmica entre as bandas R e NIR e o IAF. Como conclusão é destacado o predomínio das relações curvilineares, existindo um IAF crítico, de saturação, acima do qual não se altera a resposta espectral do dossel. Desse modo, configura-se uma tendência assintótica, o que não permite a determinação do IAF acima do ponto crítico.

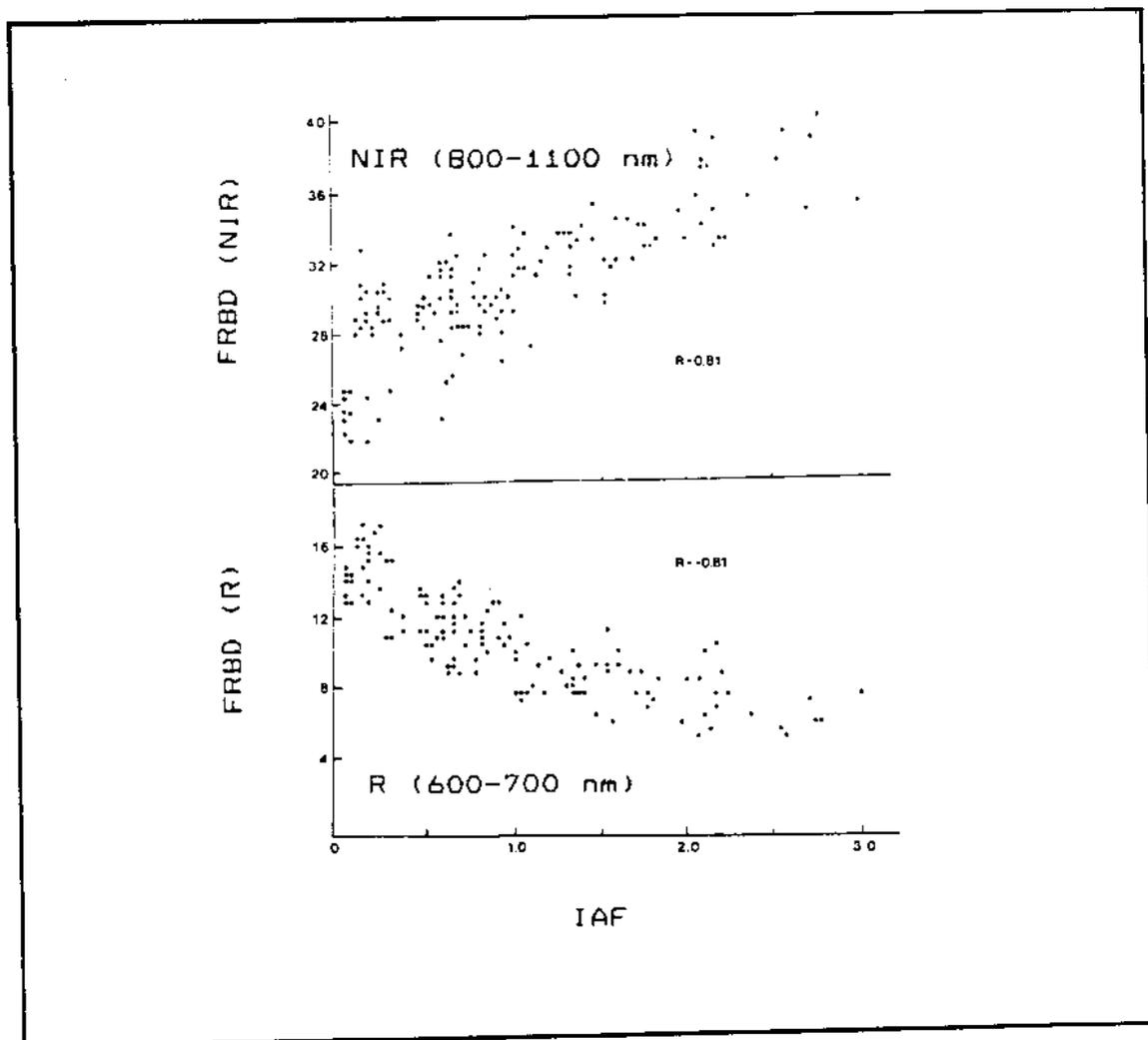


Fig. 2.1 - Relação entre os FRBD nas bandas R e NIR e o IAF para dosséis de trigo.

FONTE: Adaptada de Daughtry et al. (1980).

Deve-se ressaltar que há outros parâmetros foliares (Pinter Jr. et al., 1985), ligados à arquitetura da planta de trigo, que influem nessas relações. Pinter Jr. et al. (1983) relataram que a correlação entre dados espectrais e IAF varia também com o ângulo zenital solar, principalmente na banda do NIR, em que essa correlação mostra-se muito prejudicada com grandes ângulos zenitais.

Pinter Jr. et al. (1983) estudaram o padrão diário de índices de vegetação de dosséis de trigo e verificaram que os índices do tipo razão variam em função da geometria de iluminação. A evolução dos índices ao longo do dia apresentou-se simétrica em relação ao meio-dia solar, qualquer que fosse o IAF do dossel. Alguma assimetria pode ser explicada por porções diferentes de solo iluminado, causadas pela variação de azimute solar relativo à orientação das linhas de plantio. As maiores mudanças ocorreram quando o IAF verde era baixo e quantidades substanciais de solo iluminado ou de folhas marrons iluminadas foram vistas pelo radiômetro. Desse modo, conforme a hora do dia, dosséis com IAF diferentes tiveram índices semelhantes. Foi sugerido que a observação de dosséis com pequeno IAF é favorecida se as medições fossem feitas com o Sol em baixos ângulos de elevação. Ao contrário, situações de alto IAF seriam melhor observadas sob ângulos de elevação solar altos, com azimute paralelo às linhas de plantio. Observou-se também que os dados espectrais sofrem oscilações em curtos períodos de tempo, além da variação ao longo do dia.

Jackson e Pinter Jr. (1986) examinaram o efeito da arquitetura do dossel de trigo sobre sua resposta espectral. Os dosséis estudados diferiam, sobretudo, no arranjo geométrico de sua folhagem, sendo os demais parâmetros (reflectância das folhas, IAF, biomassa) praticamente iguais. Foram considerados dados sobre duas variedades de trigo, uma com distribuição angular de folhas (DAF) planófila e a outra, erectófila. Dois índices de vegetação foram calculados: uma razão de bandas (Razão Simples, RS) e um índice ortogonal (Índice Perpendicular de Vegetação, PVI). Em geral, os resultados de PVI foram opostos aos da RS. O dossel planófilo apresentou PVI mais altos, desde o início até a senescência. Durante o período

de maior vigor, os respectivos índices de ambos os dosséis diferiram em aproximadamente 30%. Além disso, o dossel planófilo teve maior PVI que o do erectófilo enquanto este apresentou maior RS do que o planófilo. Esses resultados demonstram que dosséis de geometrias diferentes tendo mesmas biomassa e IAF podem apresentar índices de vegetação muito variáveis e indicam que os índices respondem diferentemente à arquitetura das plantas.

É muito comum separarem-se os dados segundo duas fases do desenvolvimento, antes e depois do máximo IAF, obtendo-se duas funções de relação com os dados espectrais (Asrar et al., 1984; Hatfield et al., 1985; Wiegand e Richardson, 1987). A divisão não é arbitrária, uma vez que após o IAF máximo, começa a formação de material senescente, alterando-se a composição do dossel em termos de seus elementos. No caso particular do trigo, o máximo IAF corresponde ao florescimento.

## 2.3 - MODELOS DA RESPOSTA ESPECTRAL DO DOSSEL

### 2.3.1 - HISTÓRICO E APLICAÇÕES

É importante estabelecer relações entre os FRBD e dados biofísicos dos dosséis, uma vez que essa é a chave para uma interpretação quantitativa dos dados espectrais. A modelagem de reflectância dos dosséis é uma ferramenta de baixo custo que pode fornecer tais relações rapidamente e sob condições controladas. Além disso, esses modelos permitem muitas investigações teóricas que, por sua vez, otimizam a elaboração de planos de pesquisa em radiometria de culturas. De imediato, pode-se ressaltar algumas aplicações através de simulação de mudanças de variáveis e da inversão dos modelos.

Goel (1987), em sua revisão da literatura sobre esses modelos, classificou-os em quatro grupos, segundo seus fundamentos: modelos geométricos, modelos de meio turbido, modelos híbridos e modelos de simulação por computador.

O presente trabalho envolve a aplicação do modelo SAIL, pertencente ao grupo dos modelos de meio turbido, os quais são baseados na teoria da transferência radiativa e que, a partir de evoluções com quatro parâmetros da teoria de Kubelka e Munk (1931), citados por Allen e Richardson (1968), ou teoria K-M, foi aplicada para o caso de dosséis vegetais. Esses modelos foram sucessivamente melhorados (Allen e Richardson, 1968; Allen et al., 1970; Suits, 1972; Verhoef, 1984) evoluindo no sentido de descrever o dossel de modo cada vez mais realístico.

Este histórico resume as principais evoluções e aplicações, desde a teoria K-M até o modelo SAIL.

A teoria de Kubelka e Munk (1931) citado por Allen e Richardson (1968) é uma representação teórica, por intermédio de dois parâmetros (coeficientes de extinção, ou absorção, e de espalhamento), da propagação da luz num meio difusor. Allen e Richardson (1968) procuraram estabelecer até que ponto dois parâmetros podem determinar a reflectância e a transmitância de um sistema de folhas. Admitiram eles que o dossel fosse lateralmente infinito. Entretanto, no sentido vertical foi considerada uma dimensão finita ( $n$ ) correspondente ao IAF acumulado, medido do topo do dossel (onde  $n=0$ ) ao solo, onde  $\underline{n}$  é igual ao IAF total ( $n=N$ ).

A teoria K-M é baseada nas seguintes equações diferenciais, cujos termos estão representados no diagrama esquemático da Figura 2.2:

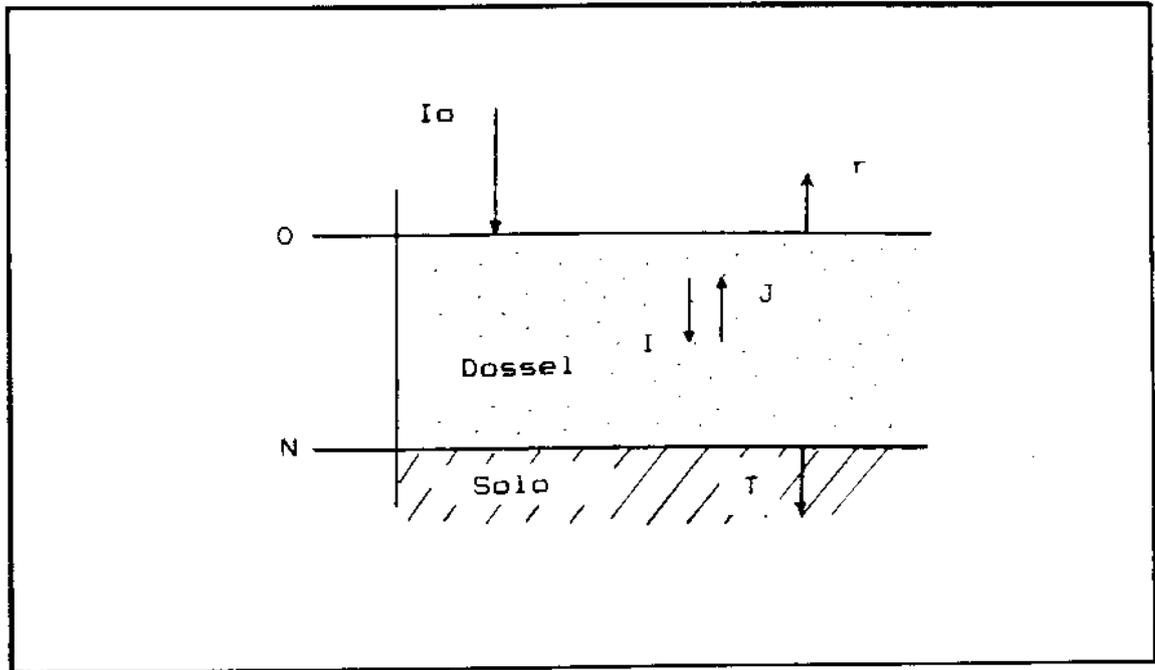


Fig. 2.2 - Diagrama esquemático de um dossel vegetal e dos parâmetros da teoria Kubelka-Munk.

FONTE: Adaptada de Allen e Richardson (1968).

$$dI = -(k+s) \cdot I \, dn + s \cdot J \, dn \quad (2.1)$$

$$dJ = +(k+s) \cdot J \, dn + s \cdot I \, dn \quad (2.2)$$

O plano  $n=0$  é a superfície iluminada do dossel e o plano  $n=N$  é a superfície do solo. Se  $I$  for a unidade, o fluxo refletido ( $r$ ) é designado reflectância e o transmitido ( $T$ ), transmitância. Definem-se as relações:

$$I(n)=1 \quad , \quad J(n)=r \quad (2.3)$$

quando  $n = 0$  , e

$$I(n)=T \quad , \quad J(n)=Rg \cdot I(n) \quad (2.4)$$

quando  $n = N$ .

Resolvendo a equação (2.2) para  $I$ , e substituindo na equação (2.1), obtêm-se a seguinte equação diferencial:

$$d^2J/dn^2 - a^2J = 0 \quad (2.5)$$

A equação

$$d^2I/dn^2 - a^2I = 0 \quad (2.6)$$

foi estabelecida por analogia à equação (2.5). A constante  $a$  em (2.5) e em (2.6) é dada pela relação:

$$a^2 = k(k+2s) \quad (2.7)$$

Resolvendo (2.5) e (2.6) e impondo as condições de contorno expressas em (2.3) e (2.4), obtêm-se as representações dos dois parâmetros ( $s$  e  $k$ ) do fluxo relativo de luz no dossel.

O fluxo refletido ( $r$ ) e o transmitido ( $T$ ) pelo dossel podem ser obtidos fazendo-se  $n=0$  e  $n=N$ , respectivamente, o que resulta nas relações:

$$r = J(N, 0, Rg) \quad (2.8)$$

$$T = I(N, N, Rg) \quad (2.9)$$

A determinação da reflectância e da transmitância com dois parâmetros foi baseada em duas hipóteses simplificadoras: absortância nula ou espalhamento

nulo. No primeiro caso, com  $k$  tendendo a zero (num meio não absorvente) e  $N$  constante,  $J$  e  $I$  são lineares relativamente a  $n$ . A quantidade  $J-I$ , segundo a teoria K-M, para tal meio é independente de  $n$ , e dada por:

$$J-I = -(1-s.N)^{-1} + (T.N^2.R_g / (1-R_g.r)) \quad (2.10)$$

A reflectância e a transmitância de um dossel não absorvente podem ser obtidas, ainda, fazendo  $n=0$  e  $n=N$ . Daí:

$$r = s.N / (1+s.N) \quad (2.11)$$

$$T = 1 / (1+s.N) \quad (2.12)$$

Para verificar o segundo caso, de espalhamento nulo e absortância finita, basta fazer  $s=0$ , o que resulta em:

$$J = R_g \cdot \exp(-k \cdot (2.N-n)) \quad (2.13)$$

$$I = I_o \cdot \exp(-k \cdot n) \quad (2.14)$$

Estas duas equações descrevem a reflectância do solo subjacente, quando atenuada por um meio absorvente.

A teoria K-M mostrou larga aplicabilidade para a descrição da interação da luz com o dossel. Porém, ela só é exata com luz perfeitamente isotrópica num meio difusor ideal. A teoria não considera a variação do albedo do dossel em função do ângulo zenital solar (Allen et al., 1970). Ela é aplicável, portanto, dentro do dossel, após toda luz direta (ou especular) ser difundida.

Quando um dossel é iluminado por luz direta, a teoria K-M deve ser generalizada de modo a levar em conta os ângulos solares, a orientação de folhas, e outros atributos da situação física. O sistema de equações de Duntley (1942), citado por Allen et al. (1970), é uma generalização da teoria K-M para cinco parâmetros, melhorando o ajuste entre a teoria e a experimentação. O uso de cinco parâmetros permite incluir orientação das folhas, ângulos solares e mais um atributo da planta, todos independentes entre si. Allen et al. (1970) demonstraram que as equações de Duntley podem, ainda, determinar a reflectância do dossel em função do ângulo solar.

A teoria de Duntley é baseada nas equações diferenciais:

$$dI'n/dn = -(u' + B' + F') \cdot I'n \quad (2.15)$$

$$dt/dn = F' I'n - u \cdot t - B \cdot t + B \cdot s \quad (2.16)$$

$$-ds/dn = B' I'n - u \cdot s - B \cdot s + B \cdot t \quad (2.17)$$

A solução da equação (2.15) é:

$$I'n = I'o \cdot \exp(-q' \cdot n) \quad (2.18)$$

onde

$$q' = (u' + B' + F') \quad (2.19)$$

Algumas relações são consideravelmente simplificadas no caso especial de absorção desprezível, aplicável a folhas na região espectral de 1000nm. O balanço da radiação, neste caso, é independente de n.

As equações generalizadas de Duntley permitem calcular a irradiância dentro de um dossel sobre solos com diferentes reflectâncias, supondo-se que a luz direta incidente no solo seja refletida como luz difusa. A atenuação da luz direta através de um dossel pode ser caracterizada pela relação

$$I' = I'o.\exp(-q'.n.\sec z) \quad (2.20)$$

Segundo Allen et al. (1970), um bom planeamento de métodos para a determinação dos parâmetros de Duntley ( $u'$ ,  $B'$  e  $F'$ ) de um dossel deve se apoiar em medições dos fluxos ascendentes e descendentes no interior do dossel. Este modelo consiste em uma única camada de componentes de dossel distribuídos aleatoriamente e não considera mudanças direcionais da reflectância em função do ângulo de observação.

O modelo de Suits (1972) é uma extensão do modelo anterior e consiste num número de camadas de dossel horizontalmente infinitas, cujos componentes são idealizados como combinações de painéis planos, de reflexão e de transmissão difusas, vertical e horizontalmente orientados. As projeções horizontais e verticais de cada componente de dossel podem ser determinadas a partir de medições físicas de plantas representativas.

Como no modelo anterior, o fluxo radiante que interage com o dossel é dividido em direto (especular) e difuso. A densidade de fluxo difuso é, por sua vez, dividido em ascendente e descendente. Como cada camada tem diferentes propriedades, a identificação da camada deve ser explicitada como índices nos símbolos das variáveis. Por exemplo,  $E(+d, i, x)$  representa o fluxo difuso ascendente na  $i$ -ésima camada e na altura  $x$ . As equações para os fluxos

em cada camada são semelhantes às do modelo de Allen et al. (1970), de uma só camada:

$$\begin{aligned} dE(+d,i,x)/dx = & -a_iE(+d,i,x) + & (2.21) \\ & + b_iE(-d,i,x) + c_iE(s,i,x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dE(-d,i,x)/dx = & a_iE(-d,i,x) + & (2.22) \\ & -b_iE(+d,i,x) - c'_iE(s,i,x) \end{aligned}$$

$$dE(s,i,x)/dx = k'_iE(s,i,x) \quad (2.23)$$

Os coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $c'$  e  $k'$  são calculados a partir de medidas dos componentes do dossel em cada camada por meio das relações:

$$a = jh.nh.(1-Th) + jv.nv.(1-(Rh+Th)/2) \quad (2.24)$$

$$b = jh.nh.Rh + jv.nv.(Rh/2 + Th/2) \quad (2.25)$$

$$c = jh.nh.Rh + (2/\pi).jv.nv.(Rh/2 + Th/2).tan\ zs \quad (2.26)$$

$$c' = jh.nh.Th + (2/\pi).jv.nv.(Rh/2 + Th/2).tan\ zs \quad (2.27)$$

$$k = jh.nh + (2/\pi).jv.nv.tan\ zs \quad (2.28)$$

As condições de contorno estabelecem que o fluxo descendente, no topo da primeira camada ( $x=0$ ), deva ser unicamente especular. Elas estabelecem também que os fluxos ascendente e descendente sejam contínuos na interface das camadas. No nível do solo, as exigências são de que todo o fluxo descendente que nele incida seja refletido, resultando em fluxo difuso ascendente.

A prática corrente consistia em calcular a reflectância hemisférica do dossel, fazendo uma relação entre os fluxos ascendente e descendente no topo do dossel, o que equivale a considerar o fluxo difuso como isotrópico dentro do dossel. Ou seja, a reflectância do dossel deveria ser lambertiana, o que não ocorre. Assim, foi necessário considerar o caráter bidirecional da reflectância, o que requer a determinação da radiância do dossel.

A radiância (L) esperada dos componentes pode ser calculada a partir das equações (2.21), (2.22) e (2.23) em qualquer nível (x) particular do dossel:

$$dL/dx = (u.E(+d) + v.E(-d) + w'.E(s)) / \pi \quad (2.29)$$

onde

$$u = jh.nh.Th + jv.nv.(Rh/2 + Th/2) \cdot (2/\pi) \cdot \tan z_v \quad (2.30)$$

$$v = jh.nh.Rh + jv.nv.(Rh/2 + Th/2) \cdot (2/\pi) \cdot \tan z_v \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} w' = & jh.nh.Rh + \\ & + jv.nv.\tan z_s.\tan z_v.((\sin f + (\pi - f).\cos f).Rh + \\ & + (\sin f - f.\cos f).Th) / 2\pi. \end{aligned} \quad (2.32)$$

A fração  $p_v(z_v, x)$  dos componentes que podem ser vistos à profundidade x, do ângulo de observação  $z_v$ , é dada por:

$$dp_v(z_v) / dx = kp_v(z_v) \quad (2.33)$$

A radiância pode ser calculada somando-se as contribuições para a radiância através do dossel, e adicionando-se a radiância do solo, tudo relativamente às frações  $p_v$  de cada componente, como vistas da posição do

observador.

$$L = \int_{-n}^0 pv(zv, x) (u.E(+d) + v.E(-d) + w'.E(s)) dx / \pi + \quad (2.34)$$

$$+ pv(zv, x) (Rg.E(-d) + E(s)) / \pi$$

Chance e LeMaster (1977) desdobraram o modelo de Suits em três condições de uso:

Modelo I: modelo em camadas de Suits, cujas condições iniciais são quatro:

$$1) E(s, 1, 0) = 1 \quad (2.35)$$

$$2) E(-d, 1, 0) = 0 \quad (2.36)$$

3) continuidade do fluxo na interface das camadas

$$4) E(+d, i, N) = Rg.(E(-d, i, N) + E(s, i, N)) \quad (2.37)$$

Modelo II: modelo de camada infinita de Suits; para dosséis densos, em que todo o fluxo descendente é refletido ou absorvido de modo que a chamada espessura infinita (espessura do dossel na qual os mecanismos de interação com o fluxo estejam saturados) tenha sido atingida. As condições iniciais e de contorno são:

$$1) E(-d, 1, 0) = 0 \quad (2.38)$$

$$2) E(s, 1, 0) = 1 \quad (2.39)$$

$$3) E(-d, 1, x \rightarrow +\infty) = 0 \quad (2.40)$$

Modelo III: modelo combinado de Suits. Os dois modelos anteriores são combinados para constituir um modelo de 2 camadas, sendo a primeira a superfície altamente reflexiva do dossel e a segunda suficientemente profunda para se atingir a profundidade óptica infinita das duas camadas. As condições são:

$$1) E(s, 1, 0)=1 \quad (2.41)$$

$$2) E(-d, 1, 0)=0 \quad (2.42)$$

3) continuidade entre as camadas 1 e 2

$$4) E(+d, 2, x \rightarrow +\infty)=R_g \quad (2.43)$$

Pode-se modificar a suposição de ausência de luz difusa (condições 1 e 2) que se aplica aos três modelos para melhor representar as condições reais de iluminação. Denotam-se assim as frações difusa e especular por  $f_d$  e  $f_s$ , respectivamente, modificando-se as duas condições para:

$$1) E(s, 1, 0)=f_s \quad (2.44)$$

$$2) E(-d, 1, 0)=f_d \quad (2.45)$$

Define-se a profundidade óptica infinita de dossel neste modelo ( $x_{inf}$ ), a um dado comprimento de onda, como sendo a menor profundidade na qual a reflectância obtida pelo modelo de uma camada de Suits de profundidade  $x$  está dentro de 5% em torno da reflectância obtida pelo modelo de camada infinita. A profundidade infinita tem o seguinte significado físico: maiores profundidades de dossel produzem apenas insignificantes alterações na reflectância. Assim esta profundidade infinita é uma medida do limite su-

perior de IAF acima do qual ele não afeta a reflectância do dossel.

Nos resultados desse trabalho, o  $x_{inf}$  para algodão variou de zero (a 690nm) até um IAF de 6,24 (a 1050nm). Quando  $x_{inf}$  é nulo significa que a reflectância do dossel infinito se assemelha à do solo. Outros dados obtidos para trigo indicam que essas reflectâncias se assemelham entre 650 e 700nm, sugerindo que, em geral, a reflectância do dossel nessa região pode ser uma boa estimativa da  $R_g$ .

Allen e Richardson (1968) já haviam observado fenômeno análogo, quando empilharam folhas de algodão na abertura do radiômetro: a reflectância parou de variar com duas folhas na região do VIS, e com oito na região do NIR. Pelo modelo de Suits, isso ocorreria com duas folhas no VIS e seis no NIR.

Chance e LeMaster (1977) simularam dois dosséis, um de camada única de 50cm e outro com duas camadas de 25cm, sendo a segunda camada com folhas mais reflexivas. Observaram que as curvas de reflectância só se distinguem no NIR, o que demonstra que a reflectância no VIS deve-se às folhas próximas à superfície do dossel, enquanto a RNIR sofre efeitos do comportamento espectral de camadas inferiores. Portanto, esse modelo pode ser usado para se ter uma avaliação qualitativa da filtragem seletiva da luz exibida pelos dosséis.

Em outro estudo, Chance e LeMaster (1978) apresentaram uma extensão do modelo de Suits para o cálculo da absorção do fluxo pelo dossel. Isso é possível sem a necessidade de adicionar qualquer parâmetro além dos já existentes no modelo. Partindo das equações (2.21), (2.22) e

(2.23), estabeleceram outras relações:

Seja  $A(x)$  a quantidade acumulada de energia por área, absorvida, desde a superfície do dossel até uma camada horizontal, na profundidade  $x$ . Assim,  $A(x+dx)-A(x)$  é a energia total absorvida numa camada  $i$  que vai da profundidade  $x$  até  $x+dx$ . A energia que entra nessa região é

$$E(s, i, x)+E(-d, i, x)+E(+d, i, x+dx), \quad (2.46)$$

e a que sai,

$$E(d, i, x)+E(d, i, x+dx)+E(s, i, x+dx), \quad (2.47)$$

portanto,

$$\begin{aligned} (A(x+dx)-A(x))/dx = & (E(d, i, x+dx) + \\ & -E(+d, i, x))/dx + \\ & -(E(-d, i, x+dx)-E(-d, i, x))/dx + \\ & -(E(s, i, x+dx)-E(s, i, x))/dx, \end{aligned} \quad (2.48)$$

de modo que, no limite em que  $dx$  se aproxima de zero,

$$\begin{aligned} dA(x)/dx = & dE(d, i, x)/dx - dE(-d, i, x)/dx \\ & - dE(s, i, x)/dx \end{aligned} \quad (2.49)$$

Deve-se ressaltar que a equação (2.49) tem validade apenas para o interior daquela camada  $i$ . A expressão  $dA(x)/dx$  não é válida nos limites da camada. As condições para se resolver a equação (2.49) são:

$$A(0)=0 \quad (2.50)$$

e se  $x_i$  é um limite entre camadas,

$$\lim_{x \rightarrow \xi} A(x) = A(\xi) \quad (2.51)$$

Assim, definindo  $A(\xi)$ , fica assegurada a continuidade da solução através dos limites entre as camadas. A solução da equação (2.49) é a relação básica do modelo de absorção da luz, dada por:

$$A(x) = E(+d, i, x) - E(-d, i, x) - E(s, i, x) + \quad (2.52) \\ - (E(+d, l, 0) - E(-d, l, 0) - E(s, l, 0))$$

Observa-se que os três primeiros termos são o fluxo líquido ascendente, na altura  $x$  do dossel, enquanto os últimos são o fluxo ascendente na superfície do dossel. Chance e LeMaster (1978) determinaram o limite superior de absorção por um dossel, visto que a absorção cresce assintoticamente com o IAF verde. Procederam a uma comparação do modelo de absorção com dados experimentais obtendo boa concordância.

Baret (1988) desenvolveu um modelo teórico simplificado de absorção por um dossel, também baseado no modelo de Suits. Explorando as relações teóricas estabelecidas naquele modelo, chegou a um modelo da absorção de luz pelo dossel em função do comportamento dos FRBD. Baret (1988) testou seu modelo e os resultados simulados mostraram-se coerentes com os resultados de modelos analíticos mais complexos.

LeMaster et al. (1980) executaram um trabalho no sentido de avaliar o desempenho do modelo de Suits bem como para levantar parâmetros para o trigo, tomando dados semanais durante o crescimento da cultura. Fazendo um controle das características espectrais dos componentes isolados do dossel, foi visto que estes se mantiveram

razoavelmente constantes (com intervalo de variação de 10%) para a maior parte do ciclo. A aplicação do modelo mostrou-se razoável para várias condições da cultura, mas a concor-  
dância foi sempre pior no início e no final do ciclo, devido à descontinuidade do dossel nessas fases.

### 2.3.2 - O MODELO SAIL

#### 2.3.2.1 - DESCRIÇÃO

O modelo SAIL (Verhoef, 1984) visa melhorar a resposta angular do modelo de Suits e suas variantes, calculando seus coeficientes a partir do índice de área foliar total e de uma função de distribuição angular de folhas (DAF). Assim, o modelo de Suits passa a ser um caso especial do modelo SAIL, considerando-se um dossel extremófilo (folhas horizontais e verticais apenas). A distribuição angular de folhas é uma função da densidade probabilística de orientação  $g(zl, fl)$ , onde  $zl$  e  $fl$  são os ângulos zenital e azimutal, respectivamente, da normal à superfície superior das folhas. Além da DAF, o único outro parâmetro que descreve a morfologia do dossel é o IAF. O modelo integra a contribuição de cada classe de inclinação foliar nos fatores de espalhamento e extinção de cada camada. Isso torna a representação bem mais realista. O fato é que cada inclinação de folha gera um padrão espacial de interceptação e espalhamento da luz, não passível de ser reproduzido através da média ponderada dos padrões associados a folhas horizontais e verticais.

Cálculos comparativos mostram que, nos perfis de reflectância bidirecional em função dos ângulos de observação, a descontinuidade no ponto nadir, presente nos resultados do modelo de Suits, não ocorrem no SAIL. As maiores diferenças entre os dois modelos ocorrem com ilumi-

nação a zênite ou a ângulos zenitais de observação menores que  $45^{\circ}$ . Badhwar et al. (1985) compararam os resultados dos modelos SAIL e Suits em dosséis de soja e milho, sob diversos ângulos de observação, com as reflectâncias medidas. O ajuste foi fraco para os dois modelos, sendo pior para o de Suits. Ambos os modelos apresentaram intervalo de variação dos resultados menores do que os resultados experimentais, tendendo a superestimar os FRBD pequenos e a subestimar os grandes.

Para verificar se diferenças entre resultados e modelo poderiam ser explicadas por mudança de alguns parâmetros, Badhwar et al. (1985) fizeram uma análise de sensibilidade para o modelo SAIL. Simularam variações, uma de cada vez, de reflectância e transmitância de folhas ( $R_h$  e  $T_h$ , respectivamente), além dos parâmetros DAF,  $f_s$ ,  $R_g$  e IAF dentro de limites razoáveis. Observaram que nenhuma mudança sistemática desses parâmetros poderia explicar as diferenças encontradas. Mudanças na  $f_s$  por um fator igual a 2 produziram mudanças calculadas menores que 0,5% no resultado. Igualmente, mudando-se a  $R_g$  em 50%, a reflectância calculada mudou em menos que 1%. Mudanças na reflectância e transmitância das folhas alteraram a reflectância calculada em 30%, causando mudanças lineares na reflectância do dossel. A DAF e a geometria de observação causaram mudanças sistemáticas na reflectância, mas não alteraram o comportamento da diferença relativa entre a reflectância calculada e a medida.

Uma análise de dados sobre soja, usando o SAIL (Goel e Thompson, 1984) mostrou que o desempenho no NIR podia ser melhorada se o IAF e a DAF fossem alterados. De qualquer modo, o melhor ajuste foi obtido quando a DAF foi considerada como sendo uma função delta de Dirac centrada no ângulo médio da distribuição observada. Foi obser-

vado empiricamente que, quando o IAF foi aumentado na proporção entre a largura do dossel e o espaçamento entre linhas (o que dá um fator em torno de 1,14) e a DAF substituída pela função delta, os resultados do modelo tiveram o melhor ajuste aos dados experimentais. O aumento do IAF se justifica (erros de amostragem e o tipo de dossel, em linha), mas a concentração da DAF não encontrou justificativa experimental.

Goel e Deering (1985) apresentaram uma técnica de inversão do modelo SAIL, que foi aplicada para determinação do IAF para soja e para uma cobertura de gramínea. Nessa técnica, é feito inicialmente um ajuste entre as reflectâncias medidas e as do modelo. As medidas têm que abranger um número razoável de direções de observação/iluminação. Para minimizar o número de parâmetros desconhecidos no modelo, supuseram que o dossel fosse constituído somente por folhas. Baseados nas medidas de FRBD, variaram os valores de IAF de modo a se atingir o menor desvio modelo-medida e mantiveram fixos os valores dos demais parâmetros. As estimativas obtidas dessa forma mostraram-se muito boas e para a cobertura de gramínea, quando uniforme e para a soja. Para a cobertura incompleta da gramínea, a estimativa foi razoável apenas quando se restringiu os ângulos zenitais solares de, no máximo,  $50^{\circ}$ . Isso confirma a aplicabilidade da inversão do modelo SAIL na estimativa do IAF de dosséis uniformes.

Em geral, são usados conjuntos separados de parâmetros biofísicos e espectrais para cada componente do dossel, o que não pode ser feito com essa técnica. Os valores de cada parâmetro obtido pela inversão do modelo vêm a ser, portanto, as médias dos valores particulaes realmente exibidos pelos vários componentes do dossel.

### 2.3.2.2 - DADOS DE ENTRADA NO MODELO SAIL

Por se tratar do modelo empregado neste trabalho, convém fazer uma revisão no que concerne aos dados de entrada do modelo SAIL, observando-se que tem sido prática usual o emprego de dados já obtidos por outrem, completados por medições próprias.

Os dados necessários para alimentação do modelo SAIL foram classificados em quatro principais grupos, segundo Goel e Deering (1985): dados biofísicos (IAF e DAF); dados espectrais ( $R_h$ ,  $T_h$  e  $R_g$ ); dados de iluminação ( $z_s$  e  $f_d$ ) e dados de observação ( $z_v$  e  $f$ ). A obtenção dos dados do dossel, especialmente da DAF do trigo, requer o desenvolvimento de metodologias práticas que permitam amostragem adequada.

Aase (1978) apresentou uma relação entre biomassa foliar e a área correspondente, o que pode facilitar muito as determinações de IAF. O trabalho foi feito com o trigo, envolvendo várias cultivares. Foi considerado que a relação obtida pode ser aplicada a qualquer variedade de trigo. A superfície específica de folhas verdes, definida como IAF dividido pela respectiva MSf, de folhas verdes de trigo foi de  $0,202 \text{ cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ .

O mesmo foi feito para as folhas senescentes do trigo (palha) por Baret (1986), envolvendo três cultivares ('Talent', 'Arcane' e 'Arminda'). A superfície específica da palha foi igual a  $0,115$ ,  $0,098$  e  $0,102 \text{ cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ , respectivamente, o que resulta numa média de  $0,105 \text{ cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ . A determinação da área de folhas senescentes do trigo é ainda mais difícil do que a do IAF, devido ao enrolamento e enrugamento do limbo foliar.

O conjunto de dados biofísicos para o experimento de LeMaster et al. (1980) foi usado em outro experimento (Chance, 1977) para calcular a função bidirecional do fator de reflectância de outra cultivar de trigo, com ótima concordância entre os resultados experimentais e os do modelo de Suits. Em seu trabalho, após medir apenas o IAF dos dosséis, Chance (1977) empregou os dados biofísicos medidos por LeMaster et al. (1980), pressupondo que eles seriam os mesmos uma vez que correspondessem a um mesmo IAF medido. Porém, são necessários estudos futuros para verificar se esse ou qualquer outro modelo pode simular todas as variedades de trigo a partir de apenas uma lista de parâmetros. Chance (1977) sugeriu que, além dos dados biofísicos seria também possível usar tabelas de  $R_g$ , se fosse desejável fazer uma simulação da variação da reflectância do substrato.

Dos dados do dossel, a DAF tem sido apontada em vários trabalhos como uma variável de difícil determinação, havendo na literatura algumas metodologias propostas (Baret, 1986; Smith et al., 1977), porém todas de execução trabalhosa e sofisticada. Os métodos mais simples são normalmente fotográficos, em pares de fotos ortogonais ou em grupos com diferentes inclinações de visada (Smith et al., 1977).

Baret (1986) propõe uma simplificação da determinação de DAF, considerando a projeção da curvatura do arco foliar do trigo como uma combinação de duas parábolas. A partir de fotos ortogonais é possível obter-se uma parábola, a partir da qual, analiticamente, chega-se a uma função de DAF. Baret (1986) verificou que, além disso, a forma do limbo foliar pode fornecer um fator de correção para determinação mais refinada.

Idso e DeWit (1970) apresentaram uma classificação das funções de DAF em seis tipos ideais: planófilo, plagiófilo, uniforme, esférico (ou hemisférico), extremófilo e erectófilo. Em plantas planófilas há predomínio de área foliar horizontal; em erectófilas, vertical; em plagiófilas, oblíqua; em extremófilas, vertical e horizontal; em plantas uniformes, a área foliar está igualmente distribuída em todos os ângulos; em plantas esféricas, a distribuição é como a de uma esfera.

Estudando essas distribuições, Goel e Strebel (1984) concluíram que todas as plantas podem ser descritas de acordo com esses seis tipos ideais, ficando algumas classificadas como plantas intermediárias em relação às classes referidas.

Nesse estudo encontram-se valores de DAF para o trigo em três fases do desenvolvimento, apresentado na Tabela 2.1. A distribuição apresentada mostra-se muito próxima a uma DAF uniforme, que teria um valor de probabilidade constante e igual a  $1/9$  (ou 0,1111) para todas as classes. É interessante notar que a frequência de folhas horizontais ( $z_l=5^\circ$  e  $z_l=15^\circ$ ) é relativamente menor no início do ciclo, quando o trigo tende a mostrar as folhas mais eretas. Outros estudos, embora não tivessem tratado tão especificamente o assunto, atribuíram DAF planófila (Jackson e Pinter Jr., 1986) para dosséis de trigo.

TABELA 2.1 - DISTRIBUIÇÃO ANGULAR DE FOLHAS DO TRIGO EM TRÊS FASES DA CULTURA

z1	Fase inicial	Crescimento	Fase final
5	0,0884	0,0807	0,1082
15	0,0969	0,1018	0,1067
25	0,1018	0,1121	0,1067
35	0,1059	0,1182	0,1072
45	0,1098	0,1217	0,1082
55	0,1139	0,1230	0,1098
65	0,1187	0,1219	0,1121
75	0,1254	0,1173	0,1160
85	0,1392	0,1035	0,1252

FONTE: Adaptada de Goel e Strebel (1984)

A reflectância e a transmitância hemisférica dos elementos (folha, colmo, palha e espiga) são outros dados de elaborada obtenção por requererem sofisticado instrumental. Alguns trabalhos apresentam estes dados para o trigo, normalmente de 50 em 50 nm. Embora LeMaster et al. (1980) afirmassem que a reflectância permanece relativamente estável durante a maior parte do ciclo de desenvolvimento do trigo, comparando-se os dados publicados em diferentes trabalhos (Figura 2.2), observam-se curvas diferentes (Chance e LeMaster, 1977, Gausman et al., 1973; LeMaster et al., 1980) para um mesmo elemento do dossel de trigo.

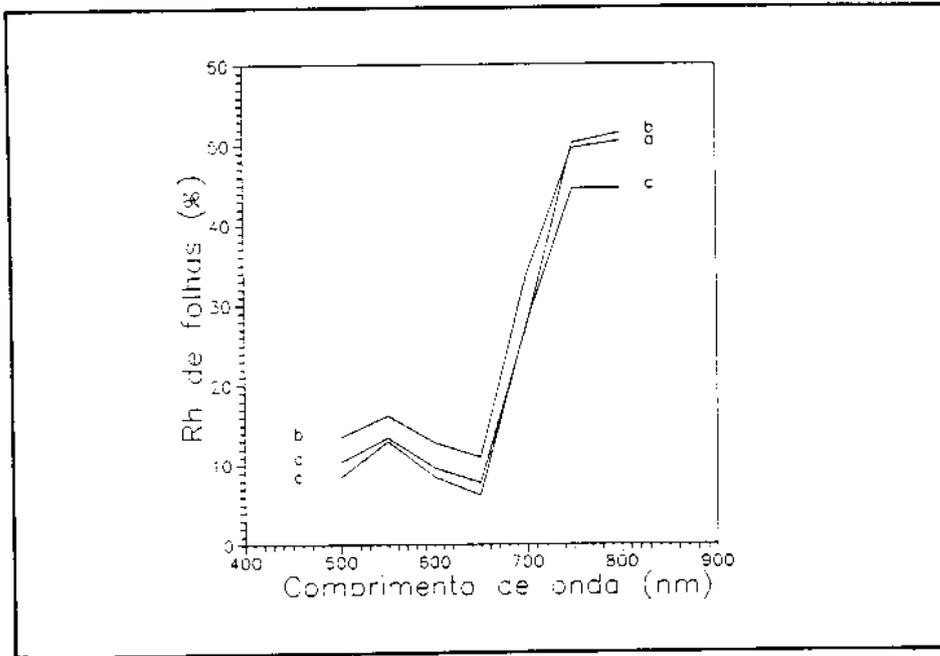


Fig. 2.3 - Curvas de reflectância hemisférica de folhas (Rh) do trigo de 500 a 800 nm.

FONTE: Adaptada de (a) Gausman et al. (1973); (b) Chance e LeMaster (1977); e de (c) LeMaster et al. (1980).

No trabalho de Chance e LeMaster (1977), é apresentado um conjunto bem completo de dados espectrais do trigo, com Rh e Th de cada componente. Nos gráficos da Figura 2.3 esses dados são mostrados na forma de curvas espectrais. Observa-se que as espigas e os colmos foram amostrados enquanto ainda estavam verdes, devido ao pico da curva de Rh que se observa na região de 550 nm (região do verde).

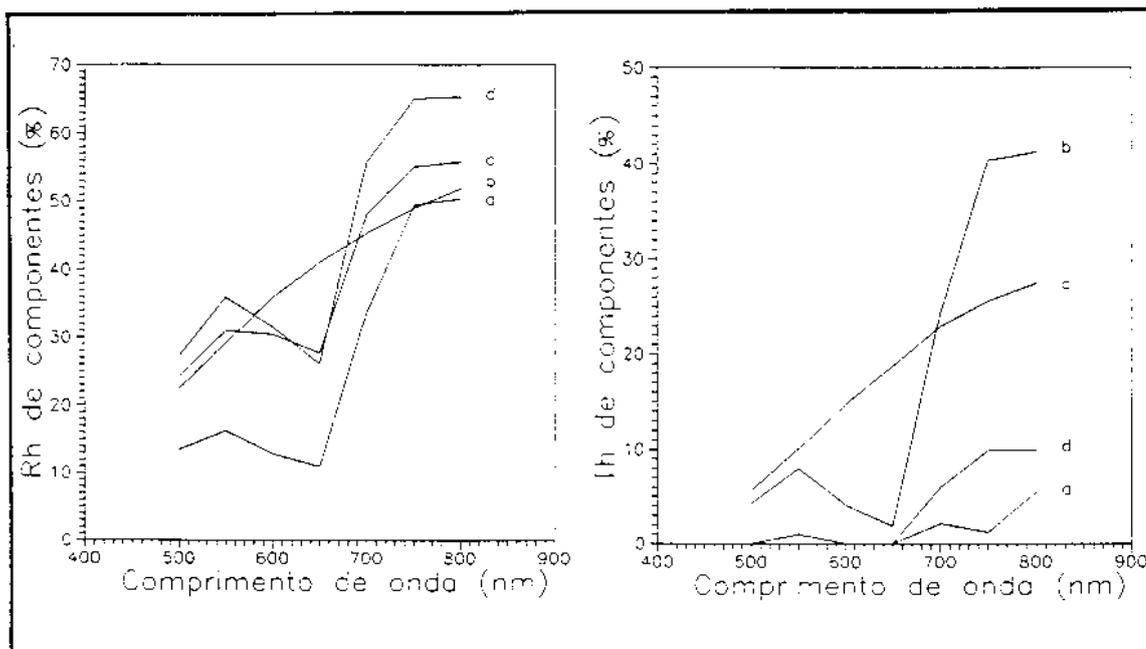


Fig. 2.4 - Curvas de reflectância (Rh) e transmitância hemisférica (Th) de 500 a 800 nm de espiga(a), folha(b), palha(c) e colmo(d) do trigo.

FONTE: Adaptada de Chance e LeMaster (1977).

Para a determinação da porcentagem de iluminação difusa, o procedimento adotado por alguns autores (LeMaster et al., 1980) é bem simples. O que se faz é uma determinação do FRBD da placa de referência sombreando-a de modo a se bloquearem os feixes de iluminação direta. Sob esta condição, a irradiância sobre a placa é somente aquela correspondente à componente difusa da iluminação. O restante do procedimento de calibração pode ser feito conforme o método adotado, sem modificações.



CAPÍTULO 3MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir os objetivos descritos no Capítulo I, foi planejado e executado um trabalho de campo seguido de análises e aplicações dos dados no modelo. Os procedimentos adotados visaram aproveitar um campo experimental, montado com a finalidade de teste de cultivar, para os objetivos deste trabalho.

O trabalho de levantamento de dados constituiu-se de:

- a) levantamento de variáveis biofísicas dos dosséis ao longo do desenvolvimento;
- b) levantamento dos dados espectrais; e
- c) obtenção de dados de entrada para aplicação no modelo.

Os estudos posteriores ao trabalho de campo envolveram:

- a) Apreciação geral dos resultados;
- b) Testes e análises sobre os dados; e
- c) Aplicação, testes e simulações do modelo.

Não foi possível, para alguns parâmetros de entrada do modelo, a determinação de dados próprios no campo. Foi necessária, portanto, uma complementação dos dados, baseada em dados encontrados na literatura.

### 3.1 - CONDUÇÃO E MANEJO DA CULTURA

O trabalho de campo foi realizado na Estação Experimental do Centro de Pesquisas Agropecuárias do Cerrado (CPAC), Planaltina (DF), com coordenadas geográficas 15°35'30" S e 47°42'30" W, a uma altitude de 1007m acima do nível do mar, entre 17 de maio e 13 de setembro de 1989.

O local do experimento é formado por parcelas em um único terraço, em solo tipo Latossolo Vermelho-Escuro, com declividade de 2°30', exposto a 50° NE, plantadas com trigo (*Triticum aestivum*, L.), sob irrigação por sistema de pivô central. As variedades de trigo observadas foram BR-10, BR-12, BR-16, BR-24, BH-1146, Anahuac e Candeias, plantadas, cada uma, em duas parcelas de 10x10m<sup>2</sup>, dispostas conforme o croqui abaixo (Figura 3.1):

Parc.1 BR-24	Parc.2 BH-1146	Parc.3 BR-16	Parc.4 Anahuac	Parc.5 Candeias	Parc.6 BR-12	Parc.7 BR-10
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Parc.8 BR-16	Parc.9 Anahuac	Parc.10 Candeias	Parc.11 BR-12	Parc.12 BR-10	Parc.13 BH-1146	Parc.14 BR-24

Fig. 3.1 - Diagrama da disposição das parcelas e suas respectivas cultivares.

A adubação básica de plantio foi de NPK+B na fórmula 4-24-16, na dose de 450 kg/ha. Ao fim do primeiro mês foi feita uma adubação por cobertura, em forma de uréia, na dose de 50 kg/ha. A semeadura obedeceu a um espaçamento de 20 cm entre linhas e foi feita à mão para garantir a máxima uniformidade de profundidade e de densidade. A quantidade de sementes foi calculada para cada variedade, levando-se em conta o poder germinativo, para que fosse atingida uma densidade de 400 plantas por metro quadrado. A lâmina d'água aplicada em irrigação foi de 23mm na ocasião do plantio e 17mm nas demais aplicações.

No quadro que se segue (Figura 3.2), está representado o cronograma das atividades ligadas à cultura, no período do plantio (17/05/89) até a colheita (13/09/89):

Mes Dia	Maio			Junho									Julho						Ago.				Set				
	17	25	29	06	08	12	13	16	19	20	22	29	03	04	09	13	16	22	25	28	03	06	11	17	21	13	
Plantio	x																										
Irrigação	x	x	x	x			x		x		x	x		x	x	x	x		x		x	x	x	x	x		
Adubação					x																						
Herbicida						x				x																	
Inseticida													x														
Fungicida																			x								
Colheita																											x

Fig. 3.2 - Cronograma das atividades ligadas à cultura

### 3.2 - CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

As observações foram executadas nos dias 30/05, 07/06, 16/06, 21/06, 06/07, 13/07, 19/07, 26/07, 04/08, 09/08, 16/08, 23/08 e 01/09, sempre dentro do período de 09:00h até 11:00h, com o levantamento dos dados espectrais tomando entre 30 e 40 minutos. O horário das medidas foi escolhido por motivos operacionais levando-se ainda em conta que a passagem do satélite LANDSAT no local ocorre em torno de 09:45h e que à tarde a cobertura de nuvens é comum nessa época do ano. Os levantamentos das variáveis agronômicas foram feitos praticamente ao mesmo tempo, em sequência às medidas radiométricas (antes ou depois).

Os dados agronômicos levantados diretamente incluíram: matéria fresca total (MFT); matéria seca (MS) de cada componente do dossel (folhas, palhas, colmos e espigas); índice de área foliar verde (IAF); índice de área de colmos (IAC); estágio fenológico da cultura; fotografias verticais; fotografias horizontais; altura de planta e altura dos estratos homogêneos; número de colmos e de espigas. Ao final do ciclo, foram ainda coletados dados de produtividade das parcelas. Muitos dos dados levantados não foram abordados nas análises por terem servido apenas como dados de apoio ao estudo apresentado.

Os parâmetros espectrais medidos incluíram: porcentagem de iluminação difusa espectral da cena, reflectância espectral do dossel e reflectância espectral do solo subjacente.

O equipamento utilizado incluiu:

- radiômetro SPECTRON SE-590
- câmera fotográfica YASHICA mel
- balança METTLER P10 (d=1g)
- balança METTLER P2010 (d=0,1g)
- estufa IKEMOTO RIKAKOGIO
- estufa IKEDA
- planímetro óptico HAYASHI DENKOH AAC-400
- placa de referência de  $\text{BaSO}_4$  (LARAD, INPE)

O espectrorradiômetro SPECTRON SE-590 consiste de duas unidades detectoras ligadas através de cabos a uma unidade controladora, a qual faz o registro digital dos dados adquiridos, em uma fita miniatura. Uma das unidades detectoras ficou apontada para o alvo com um campo de visada de  $15^\circ$  de abertura, captando a energia refletida (radiância), enquanto a outra, com um coletor cosseno em sua abertura, ficou apontada para o céu, captando a energia

incidente do hemisfério celeste inteiro (irradiância). O radiômetro coleta dados em 252 intervalos de comprimento de onda, localizados entre aproximadamente 368 nm e 1114 nm. A disposição destes intervalos no espectro eletromagnético está apresentada no Apêndice C.

### 3.3 - LEVANTAMENTO DOS DADOS DE CAMPO

O procedimento previsto para ser adotado no campo, e realizado na maior parte das observações, envolvia a seguinte sequência:

- a) nivelamento da placa de referência;
- b) leitura radiométrica sobre a placa à sombra;
- c) leitura radiométrica sobre a placa ao Sol;
- d) 2 leituras sobre o solo exposto;
- e) 4 leituras sobre cada uma das 7 primeiras parcelas (sendo a 1<sup>a</sup> de cada parcela acompanhada de uma fotografia vertical);
- f) 2<sup>a</sup> série de leituras sobre a placa (como em b e c);
- g) leituras sobre as 7 parcelas restantes (como em e);
- h) 3<sup>a</sup> série de leituras sobre a placa (como em b e c);
- i) determinação das alturas das camadas homogêneas para cada parcela;
- j) coleta de amostras (por camadas), observação dos estágios fenológicos e das condições das parcelas;
- e
- k) tomada de 1 fotografia em perfil por variedade.

#### 3.3.1 - DADOS RADIOMÉTRICOS

A leitura radiométrica sobre a placa de referência à sombra permitiu o cálculo da porcentagem espectral de luz difusa. As leituras sobre a placa foram repetidas para que fosse possível fazer interpolações entre os

dados de calibração, caso necessário. As leituras de radiância dos alvos (placa, dossel e solo) foram acompanhadas de leituras de irradiância solar que serviram para o cálculo das reflectâncias, conforme o método de calibração utilizado (Duggin, 1980). As leituras feitas nos dias de campo sobre a placa de referência ao Sol foram tomadas a título de segurança, pois eram dispensáveis.

Na Figura 3.3 está ilustrado o esquema de coleta dos dados radiométricos, com as áreas amostradas representadas em escala sobre uma parcela.

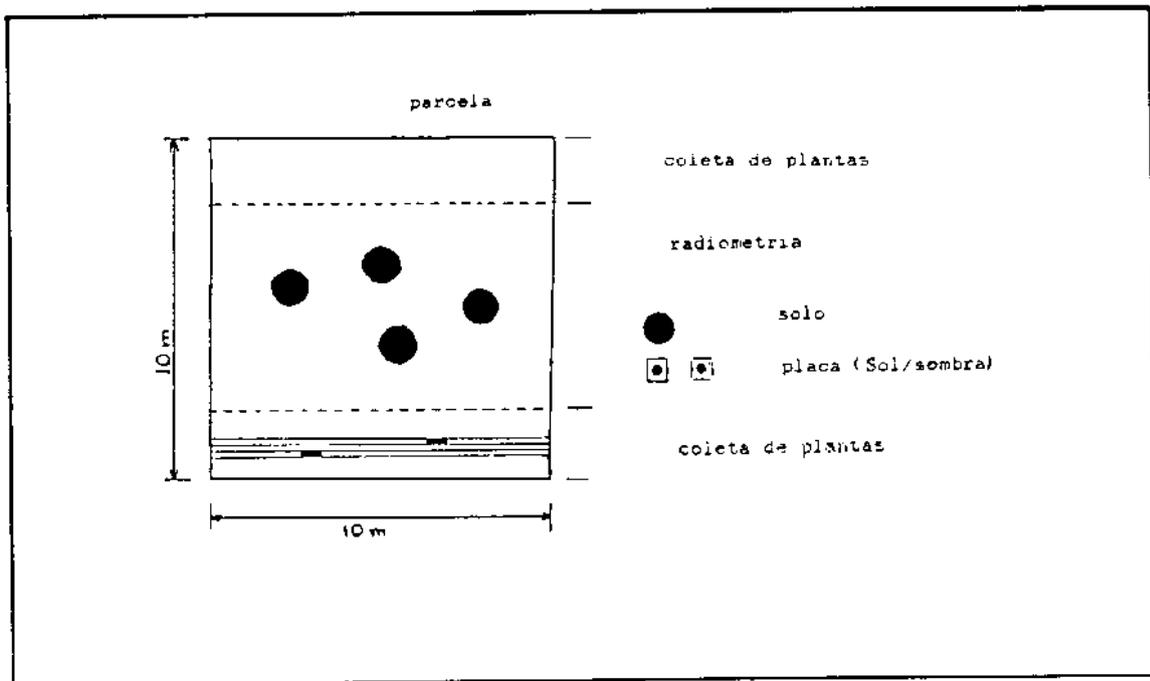


Fig. 3.3 - Diagrama esquemático da coleta de dados radiométricos, com as respectivas áreas de amostragem.

As distâncias aproximadas entre o sistema óptico do radiômetro e a superfície dos alvos (h) foram:

$h=0,80\text{m}$ , no caso da placa de referência;  
 $h=1,40\text{m}$ , no caso do solo;  
 $h=(3,0\text{m} - (\text{altura das plantas}))$ , no caso dos  
dosséis, até a 6<sup>a</sup> observação inclusive; e  
 $h=(3,80\text{m} - (\text{altura das plantas}))$ , no caso dos dosséis,  
a partir da 7<sup>a</sup> observação inclusive.

A variação da altura do mastro foi feita para que se amostrassem apenas os alvos desejados, sem o risco do campo de visada ultrapassar os limites dos mesmos. A pequena área de solo exposto disponível no local do experimento e as dimensões da placa de referência tornaram obrigatórias as mudanças na altura do radiômetro a cada missão. O crescimento em altura das parcelas tornou conveniente aumentar o mastro para a observação das mesmas a partir da 7<sup>a</sup> missão.

O cálculo das reflectâncias envolveu o uso de programas desenvolvidos pelo Laboratório de Radiometria do INPE. Para implementação e funcionamento do método de calibração, foi obtido o arquivo de coeficientes horários, a partir de cada par de leituras obtido num intervalo de aproximadamente 7 segundos, sendo de 5 minutos o intervalo entre os pares consecutivos. Essas medidas foram feitas no dia 01/06/89 (um dia de céu aberto), de 09:00h até 15:00h.

Foi calculada a reflectância correspondente às bandas espectrais denominadas EST, conforme a seleção de bandas proposta por Rudorff e Batista (1989) para estudos sobre trigo, com o seguinte posicionamento no espectro eletromagnético:

EST1: 547 - 562nm (verde)  
EST2: 661 - 673nm (vermelho)  
EST3: 756 - 780nm (infravermelho próximo)

EST4: 786 - 823nm (infravermelho próximo)

EST5: 852 - 880nm (infravermelho próximo)

Nos resultados apresentados neste trabalho, as análises de variáveis espectrais incluíram somente as bandas EST1 (RG), EST2 (RR) e EST4 (RNIR). Para o teste do Modelo SAIL, foi confeccionado um arquivo auxiliar de reflectâncias em banda estreita, em torno de 650nm, embora a diferença entre essa banda e EST2 (em torno de 665nm) tivesse sido muito pequena.

### 3.3.2 - DADOS AGRONÔMICOS

Foram consideradas três camadas para o dossel: a camada inferior, onde ocorrem folhas verdes, cana e colmos; a camada intermediária, onde ocorrem somente folhas verdes e colmos e a camada superior, a das espigas.

De início, foram tomadas, de cada parcela, amostras representadas por plantas colhidas em segmentos de 0,5m, em duas linhas aleatórias para análises de laboratório. A partir da 7ª observação, o dossel mostrou-se mais homogêneo, devido a uma uniformização causada pelo crescimento, o que permitiu tomar apenas um segmento de 0,5m como suficientemente representativo de cada parcela.

As amostras de cada parcela foram pesadas inteiras (peso fresco) e em seguida pesou-se, de cada uma, uma sub-amostra (entre 1/8 e 1/4 da amostra) para as análises de área foliar e de área de colmos. Do restante das amostras, separaram-se os componentes para pesagem de matéria seca efetuada após 24h de estufa a 60°C.

A área de colmos foi estimada a partir de medidas do comprimento e do diâmetro dos mesmos, usando-se, respectivamente, régua e paquímetro. Tanto para área como para peso seco, a bainha das folhas foi considerada parte do colmo, tomando-se como folha apenas o limbo. Para matéria seca de palha, foram consideradas quaisquer folhas que não estivessem verdes. O IAF referido nesse trabalho considera apenas a área foliar verde, que foi determinada por meio do planímetro óptico.

Foi feita uma tentativa de levantamento da DAF, com a utilização de uma fotografia do perfil de cada dossel. O que se pretendia era ter um registro gráfico de algumas plantas (que estariam dispostas no plano propício para observação da arquitetura) de cada cultivar e, através de uma análise da disposição de suas folhas, chegar às respectivas funções de DAF. Esta tentativa foi frustrada em virtude da dificuldade de distinguirem as folhas de uma planta das de outra através de uma simples fotografia do em perfil dos dosséis.

### 3.4 - DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO

Dos dados de entrada para o modelo SAIL, alguns não foram, direta ou totalmente, determinados no experimento. Dos parâmetros do dossel, a DAF, a  $R_h$  e a  $T_h$  dos componentes foram coletados na literatura. Conforme resultados de Goel e Strebel (1984) apresentados na Tabela 2.1, neste trabalho pressupõe-se DAF uniforme para todas as parcelas, adotando-se portanto, uma densidade probabilística de 0,1111 para cada uma das nove classes de  $z_l$ .

Para a  $R_h$  e  $T_h$  dos componentes, foram utilizados os dados publicados por Chance e LeMaster (1977) por se constituírem num conjunto completo de dados espectrais de todos os componentes de dossel do trigo.

A área de folhas senescentes (palha) foi calculada com base no peso seco de palha, medido no campo, e na média de superfície específica de folhas senescentes apresentada por Baret (1986). O índice de área de palha (IAP) foi, desse modo, calculado segundo a equação abaixo:

$$IAP = 0,0105 \times MSp \quad (3.1)$$

onde se têm IAP em  $m^2/m^2$ , MSp em  $g/m^2$  e 0,0105  $m^2/g$  (média de superfície específica para palha do trigo, segundo Baret (1986)).

Para a determinação da área e da distribuição angular das espigas, foi considerado um modelo cilíndrico para o formato, sendo atribuídas dimensões constantes para todas as espigas. As diferenças de áreas de espiga entre as parcelas são então baseadas apenas no número de espigas das parcelas. A área da espiga modelo é igual à média da área de 14 espigas (amostradas uma por parcela), cujas dimensões foram estimadas por projeção vertical e horizontal das mesmas, o que resultou numa área de  $3,8 \cdot 10^{-3} m^2$  por espiga. O índice de área de cada espiga (considerando, como para IAF, uma face somente, ou metade da área total) foi calculado segundo a equação:

$$IAe = 3,8 \times 10^{-3} \times ne \quad (3.2)$$

onde se têm IAe em  $m^2/m^2$  e ne em espigas por  $m^2$ .

Para a distribuição angular da espiga, foi aplicada uma distribuição extremófila (área distribuída em superfícies verticais e horizontais), na proporção apresentada na literatura para espigas do experimento de Chance e LeMaster (1977), expressa na equação:

$$\text{área vertical} = 2,75 \times (\text{área horizontal}) \quad (3.3)$$

É prudente fazer-se a ressalva de que a atribuição de resultados de literatura e simplificações dos parâmetros de entrada do modelo possam vir a influir negativamente no seu desempenho. Isto será considerado nas análises que serão feitas sobre estes resultados, restringindo a discussão ao que é cabível nestas condições.

### 3.5 - TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS

Foram confeccionadas as curvas espectrais de reflectância de cada parcela, para cada observação no campo. Com as reflectâncias nas bandas EST1, EST2 e EST4 (ítem 3.2) e com os dados agronômicos MFT, MST, H2O, IAF e H, foram plotadas curvas de desenvolvimento, ao longo de todo o ciclo, com todas as parcelas juntas. Sobre as curvas espectrais e de desenvolvimento foram feitas observações visuais, comparações e considerações preliminares.

Foi testado o efeito de cultivar sobre as principais variáveis (MFT, MST, H2O, IAF, EST1, EST2 e EST4) em cada época observada, através de uma análise de variância, com delineamento em blocos casualizados. Nesta análise, as médias para cada cultivar englobam duas repetições. Nos casos em que o efeito foi significativo para um intervalo de confiança de 5% ou menos, foi feita uma análise de Duncan, que ordena e agrupa as médias analisadas. Para esta análise, foi escolhido um intervalo

de confiança de 10%, para aumentar a separabilidade das médias, uma vez são poucas repetições (2) por cultivar.

Foi estudado o relacionamento entre os dados através de análise de correlação simples e de correlação canônica. Da análise de correlação canônica resultou um índice espectral de vegetação ortogonal, envolvendo as bandas EST1, EST2 e EST4.

As relações entre o IAF e os dados espectrais EST2 e EST4 foram estudados com mais detalhe. Foram confeccionados diagramas de dispersão, juntamente com curvas obtidas por análise de regressão logarítmica. Os dados foram separados segundo duas fases, antes e depois do IAF máximo (sendo a primeira da missão 1 à 6 inclusive e a segunda a partir da missão 7). Essas curvas foram ainda avaliadas através do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e de testes de significância da regressão obtida.

A aplicação do modelo foi feita, inicialmente, caso a caso, considerando todos os parâmetros envolvidos na observação de cada parcela. O programa utilizado para a aplicação do modelo está apresentado no Apêndice D. O conjunto de FRBDC assim obtido foi comparado com o de FRBDO correspondentes através de análises de regressão linear e testes de significância das relações obtidas.

As simulações do modelo foram feitas variando-se alguns parâmetros de entrada e mantendo-se outros iguais ao da parcela 10 na ocasião da 5<sup>a</sup> missão. A parcela foi escolhida aleatoriamente, entre as parcelas com cultivares de características parecidas com as da maioria. Evitou-se escolher parcelas com a cultivar Anahuac por ter folhas esbranquiçadas e com as cultivares BH-1146 e BR-24,

por apresentarem porte destacadamente maior. A quinta missão foi escolhida por se tratar de uma fase em que os dosséis estiveram com aspecto uniforme, elevados valores de IAF, cobertura total do solo e com presença de material senescente na camada inferior. Supõe-se que estas circunstâncias favoreçam a observação do efeito dos parâmetros simulados.



CAPÍTULO 4RESULTADOS E DISCUSSÕES4.1 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os dados colhidos sobre as parcelas de trigo permitiram obter 166 curvas espectrais em 13 missões radiométricas, durante a estação de crescimento do trigo na safra de 1989. As medidas foram obtidas com intervalos de aproximadamente 7 dias, sempre que possível. As curvas espectrais geradas a partir dessas medidas representam a reflectância da cultura em relação à reflectância de uma superfície teoricamente 100% refletora, no intervalo de comprimento de onda de 400 a 1100 nm. A título de exemplo, são apresentadas, nas Figuras 4.1 e 4.2, as curvas espectrais da parcela 10 ao longo do ciclo e na missão 5, respectivamente.

Como as medidas radiométricas começaram a ser feitas quando o trigo estava com 6 dias após emergência (a 13 dias após o plantio), pode-se observar a variação da resposta espectral desde o início do crescimento até a maturação (exemplo da figura 4.1).

Ao longo desse ciclo, na região do vermelho (650-670 nm), foi observada uma queda da reflectância a partir da segunda missão, devido à absorção pelas folhas verdes, evidenciando-se, desde a terceira missão, um pico de reflectância no verde (550 nm).

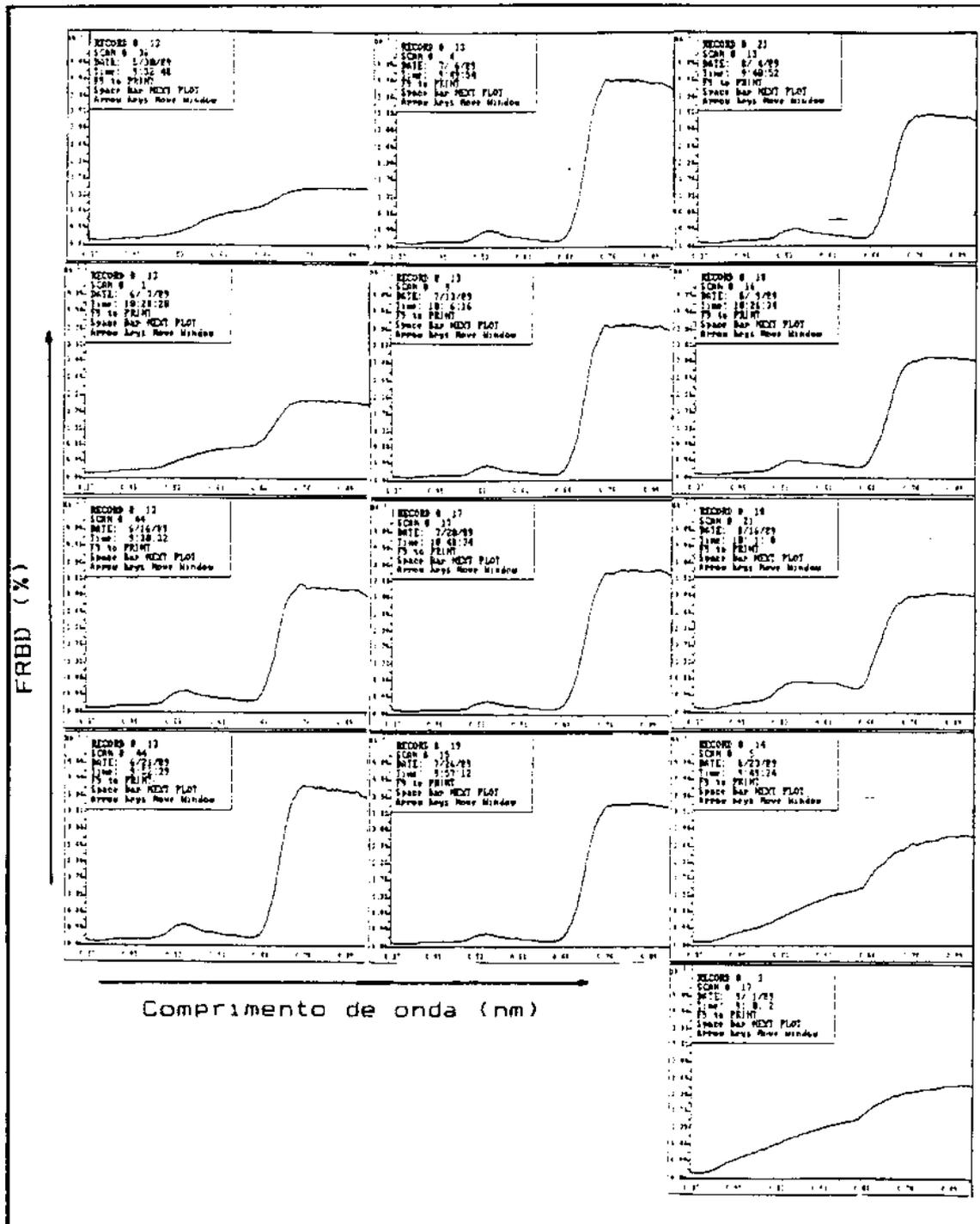


Fig. 4.1 - Curvas espectrais de reflectância da parcela 10 ao longo do ciclo

Cabe ressaltar que a queda brusca na reflectância da cultura a partir de 900 nm é devida a problemas no radiômetro SPECTRON SE-590 e, portanto, reflectâncias acima deste comprimento de onda não foram consideradas neste trabalho. Testes de laboratório mostraram que esse problema se deve a um espectro de segunda ordem do sistema de difração do aparelho. Esse efeito é desprezível quando se mede a radiância da cultura, porém não o é para medidas da radiância solar através do coletor cosseno ou refletido pelo painel de sulfato de bário. O efeito desse sinal adicional induzido pela sobreposição de harmônicos do espectro de segunda ordem é o decréscimo da razão real entre os sinais da cultura e os das referências em comprimentos de onda longos, gerando uma queda nos valores das curvas de fator de reflectância.

No Apêndice A são apresentadas os dados brutos das parcelas (P), missões (M), idade da cultura ou dias após plantio (ID), variedade (V), matéria fresca total (MFT), matéria seca total (MST), matéria seca de folhas, colmos, palha e de espigas (MSf, MSc, MSp e MSe, respectivamente), índice de área foliar verde (IAF), índice de área de colmos (IAC), altura de planta (H), porcentagem de água na planta (H<sub>2</sub>O), estágio fenológico, e produtividade (PROD), além dos fatores de reflectância nas bandas EST.

Na Figura 4.2 é apresentada em detalhe a curva de reflectância da parcela 10, na missão 5. Ao mesmo tempo, na região do infravermelho próximo (a partir de 760 nm), grande parte da energia incidente é refletida, aumentando com o número de camadas de folhas presentes no dossel. Da oitava para a nona missão começa a aumentar a reflectância no vermelho (650 nm) devido à senescência das folhas.

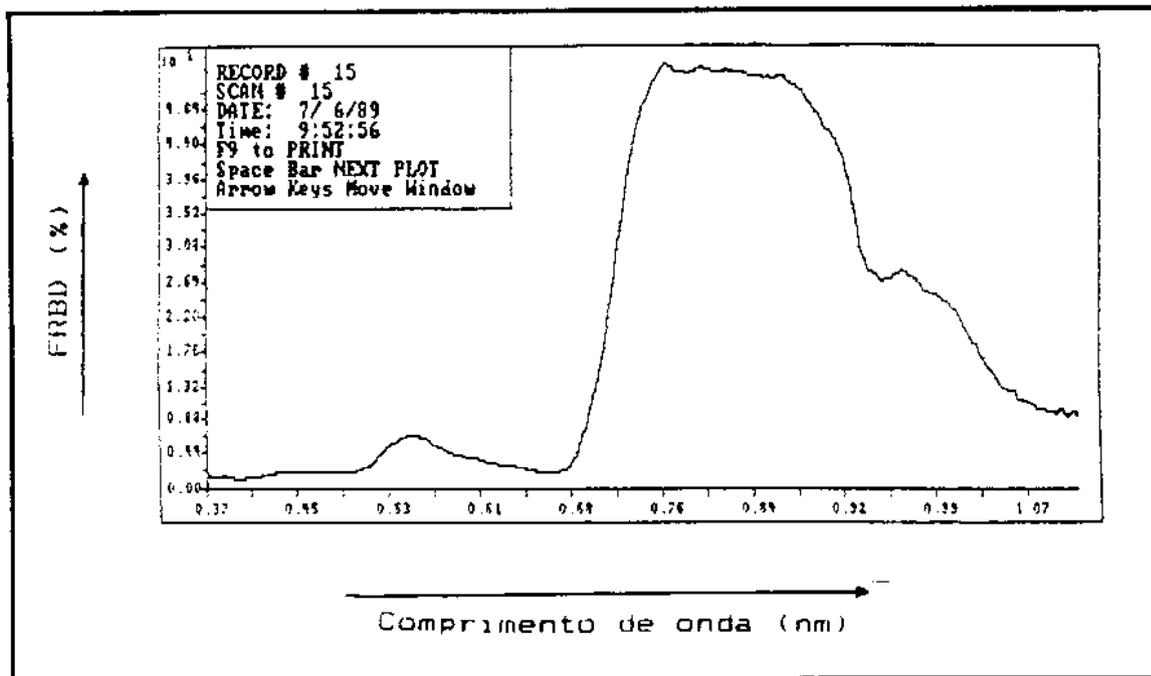


Fig. 4.2 - Curva espectral de reflectância da parcela 10 na missão 5.

Algumas bandas espectrais foram selecionadas por Rudorff et al. (1989) por serem mais sensíveis às condições de crescimento e desenvolvimento da cultura do trigo. As análises do presente trabalho foram realizadas com três dessas bandas (denominadas EST) cujos comprimentos de onda se localizam nos intervalos do pico de reflectância do verde (547-562 nm), do pico de absorção do vermelho (661-673 nm) e do patamar do infravermelho próximo (786-823 nm), conforme item 3.2.

A pesquisa que se segue fundamenta-se sobre as seguintes variáveis agronômicas e espectrais: matéria fresca e seca total (MFT e MST); porcentagem de água na planta (H2O); altura de planta (H); índice de área foliar verde (IAF) e reflectância nas bandas EST (EST1, EST2, EST4). Dados detalhados do dossel foram levantados com a

finalidade exclusiva de serem aplicados ao teste do modelo SAIL. As demais variáveis agrônômicas foram abordadas em estudos preliminares visando explorar as relações espectro-agrônômicas. Alguns resultados podem ser mencionados, à medida que se fizerem indispensáveis. Maiores detalhes constam em relatório entregue à Fundação Banco do Brasil (Vale-riano, 1990).

#### 4.1.1 - OS DADOS E O DESENVOLVIMENTO DO TRIGO

A MFT (Figura 4.3) mostrou crescimento até perto do 60<sup>o</sup> dia, quando se estabilizou, tendendo para um declínio após o ponto de máximo.

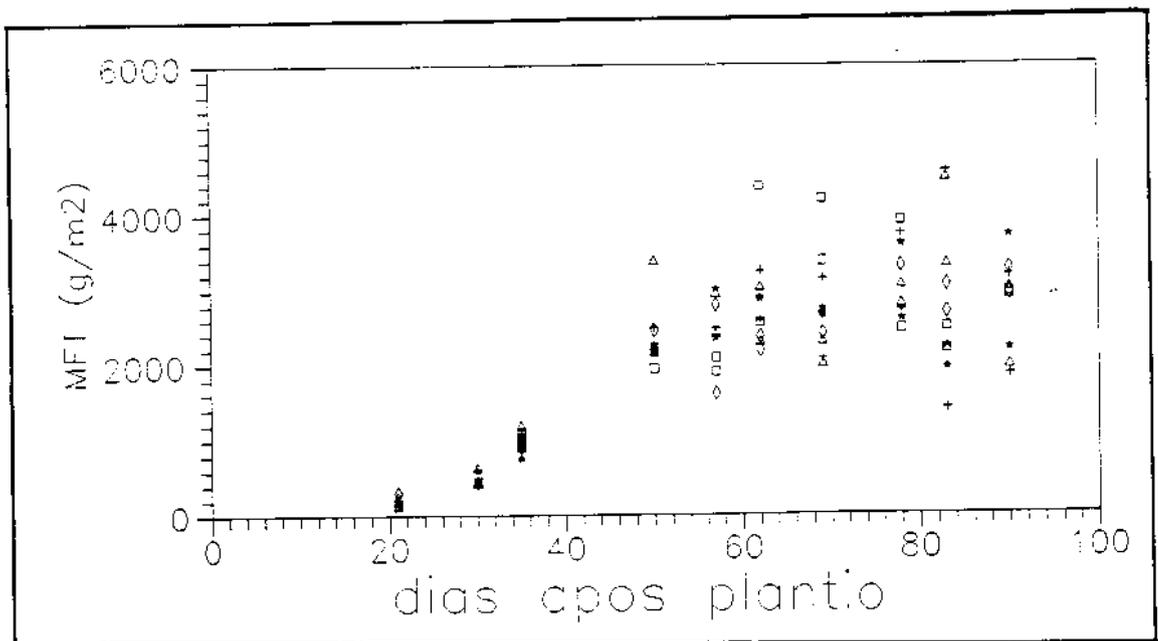


Fig. 4.3 - Gráfico do desenvolvimento da MFT. Os símbolos representam parcelas das cultivares BR-24 (□), BH-1146 (△), BR-16 (◇), Anahuac (+), Can-deias (★), BR-12 (■) e BR-10 (▲).

O formato parabólico da curva de desenvolvimento da MFT (Figura 4.3) coincide com resultados apresentados na literatura (Aase, 1978; Baret, 1986; e Rudorff e Batista, 1989). Os símbolos estão descritos na legenda da Figura 4.3.

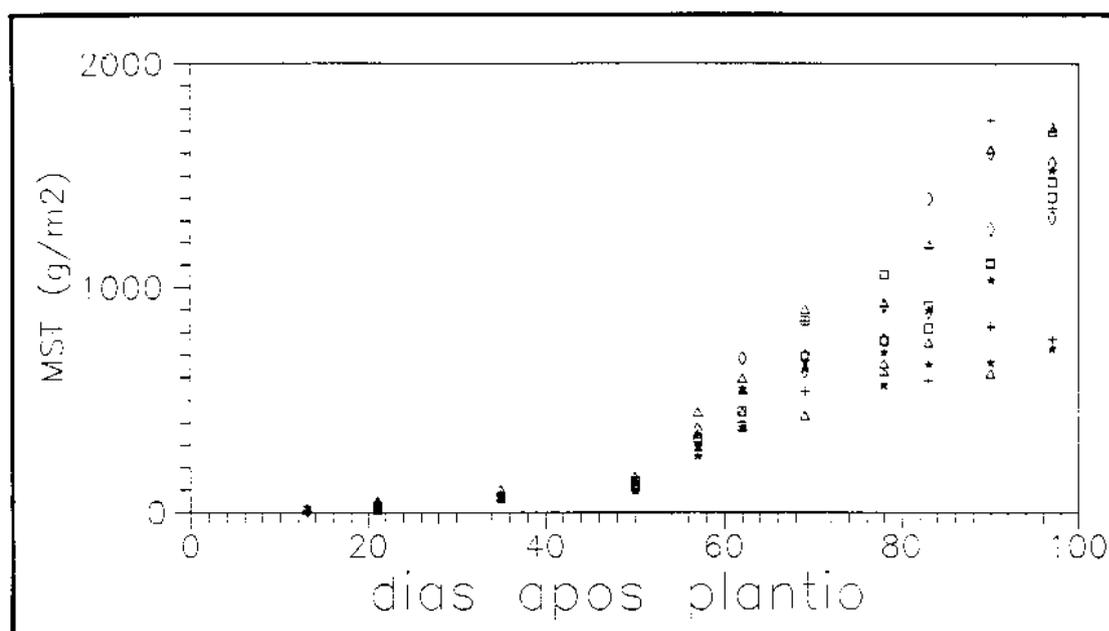


Fig. 4.4 - Gráfico do desenvolvimento de MST

A MST (Figura 4.4) do trigo teve desenvolvimento sempre crescente, conforme já relatado (Aase, 1978; e Baret, 1986), diferenciando seu desenvolvimento daquele apresentado pela MFT no final do ciclo. Na fase inicial da cultura, a variação de MST corresponde diretamente à de MFT uma vez que o dossel compõe-se somente de matéria verde.

Como consequência disso, observa-se na Figura 4.5 que o teor de água na planta decresce a partir do 50<sup>o</sup> dia, caindo de 90% até 40%, aproximadamente, no final do ciclo. A composição do dossel altera-se aumentando a proporção de elementos secos (palhas e espigas). Os símbolos estão descritos na legenda da Figura 4.3.

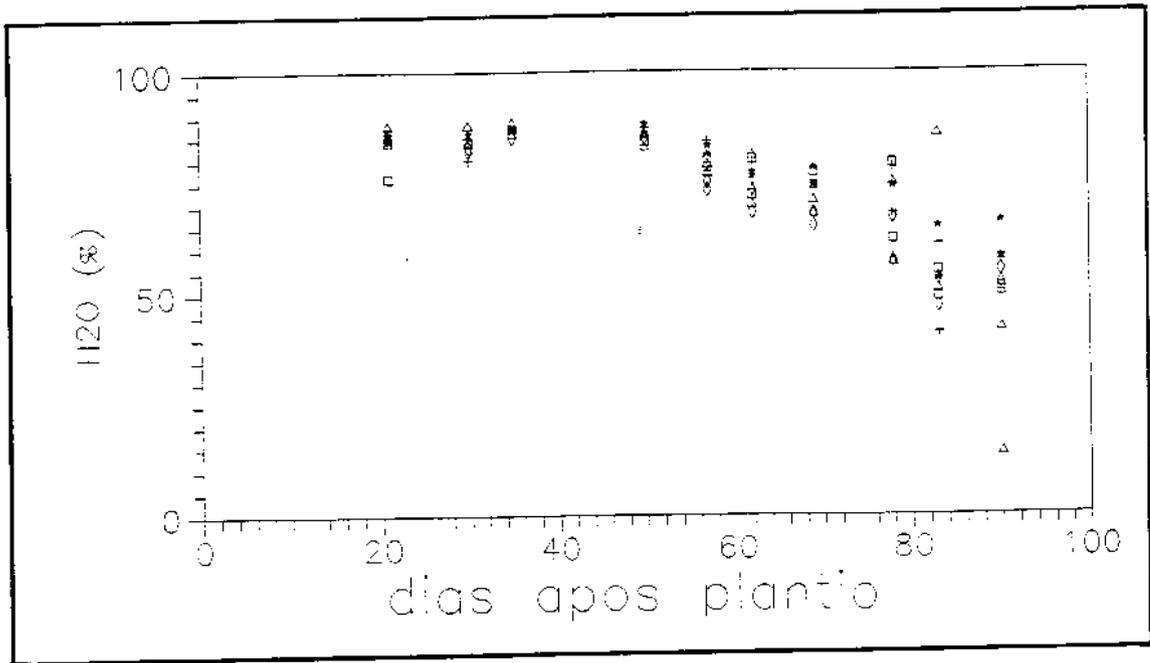


Fig. 4.5 - Gráfico do desenvolvimento de H<sub>2</sub>O(%)

Na evolução do IAF (Figura 4.6), observa-se um pico definido no 50<sup>o</sup> dia, iniciando um declínio devido à senescência das folhas.

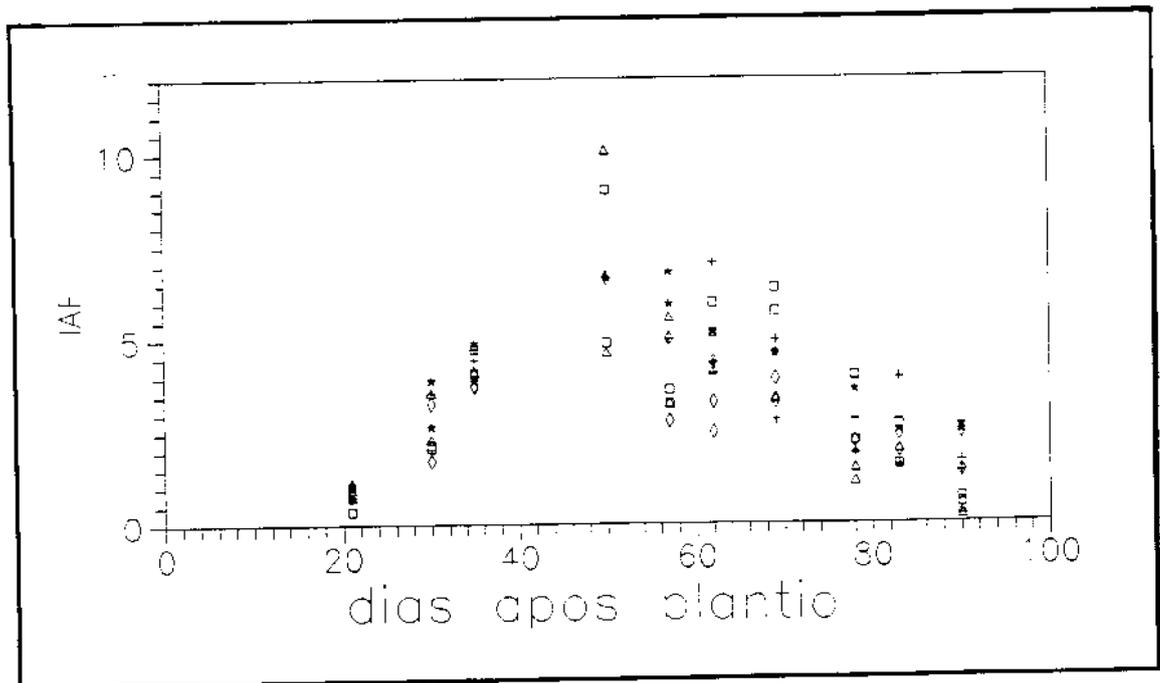


Fig. 4.6 - Gráfico do desenvolvimento de IAF

Nota-se ainda na Figura 4.6, a tendência parabólica do desenvolvimento do IAF, em concordância com dados da literatura (Aase, 1978; Asrar et al, 1984; Baret et al., 1987; Formaggio, 1989; e Hatfield et al., 1985).

A altura das plantas (H) teve um crescimento aparentemente não-linear (Figura 4.7), mais lento no início, tendendo a acelerar até o 69<sup>o</sup> dia, quando estabilizou. O desenvolvimento da H ocorre da mesma forma que o da MST embora esta continue crescendo até o final do ciclo. Os símbolos estão descritos na legenda da Figura 4.3.

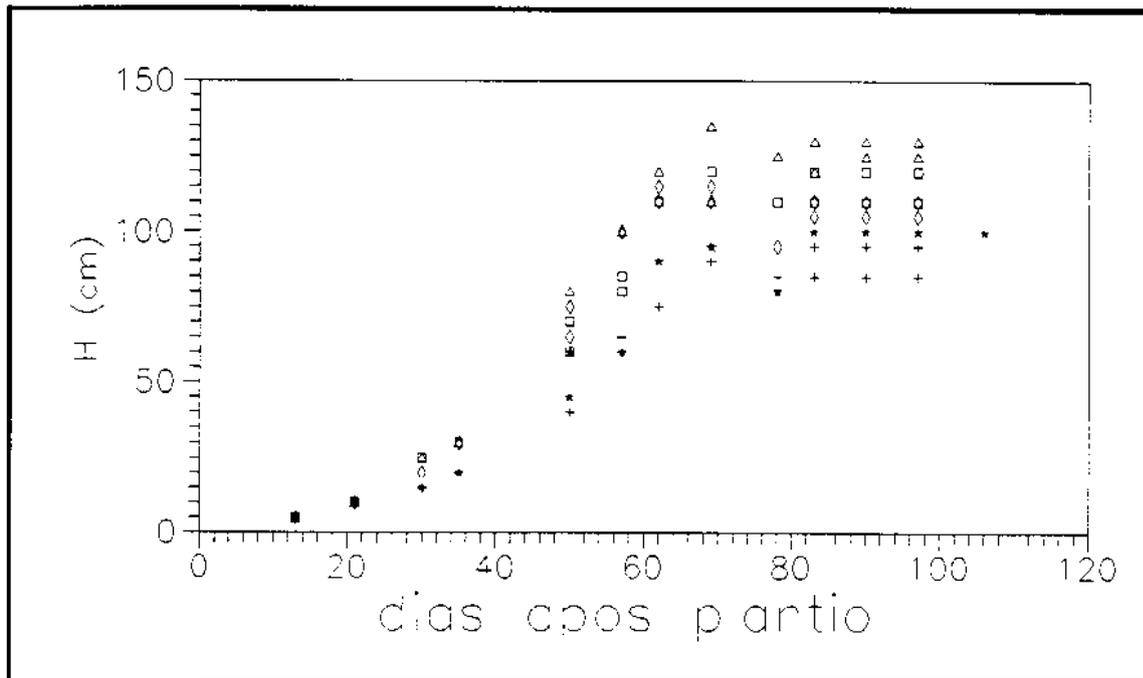


Fig. 4.7 - Gráfico do desenvolvimento de H

A reflectância na banda EST1 (Figura 4.8) apresentou um padrão temporal caracterizado por dois períodos de crescimento, inicial e final, com uma fase de declínio no meio do ciclo, resultando numa curva do tipo senóide. O crescimento inicial se deve à cobertura do solo, enquanto que no final ocorre degradação dos pigmentos com

conseqüente aumento na reflectância no VIS. Já a queda no meio do ciclo pode ser explicada pelo aumento da área sombreada na superfície do dossel, à medida que as plantas crescem em altura (H). Observando a curva da Figura 4.7, verifica-se que este efeito é máximo quando as plantas atingem sua altura final, iniciando um período em que a senescência atua de forma dominante. Os símbolos estão descritos na legenda da Figura 4.3.

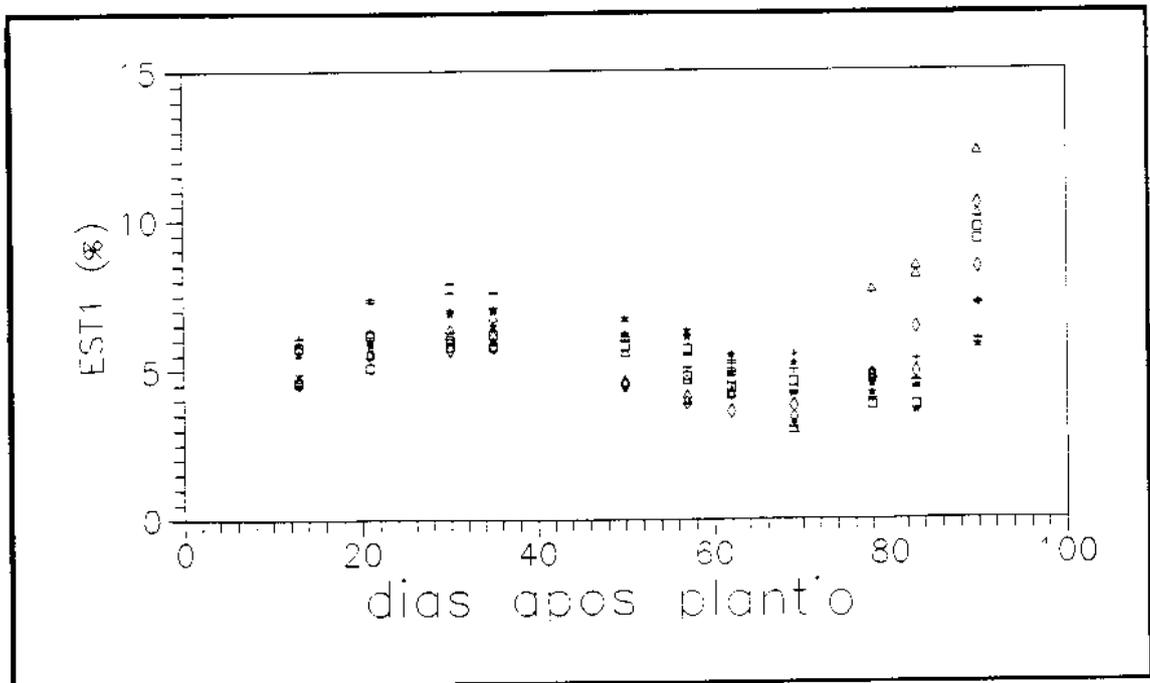


Fig. 4.8 - Gráfico do desenvolvimento de EST1 (RG)

A reflectância na banda EST2 (Figura 4.9) apresentou-se relativamente alta no início do ciclo, decrescendo até estabilizar em valores baixos no período do 35<sup>o</sup> ao 83<sup>o</sup> dia, aproximadamente, quando ocorre atividade fotossintética mais intensa. No final do ciclo, com o declínio de área verde por senescência, a reflectância EST2 cresce a valores quase tão altos quanto os do início do ciclo. Os símbolos estão descritos na legenda da Figura 4.3.

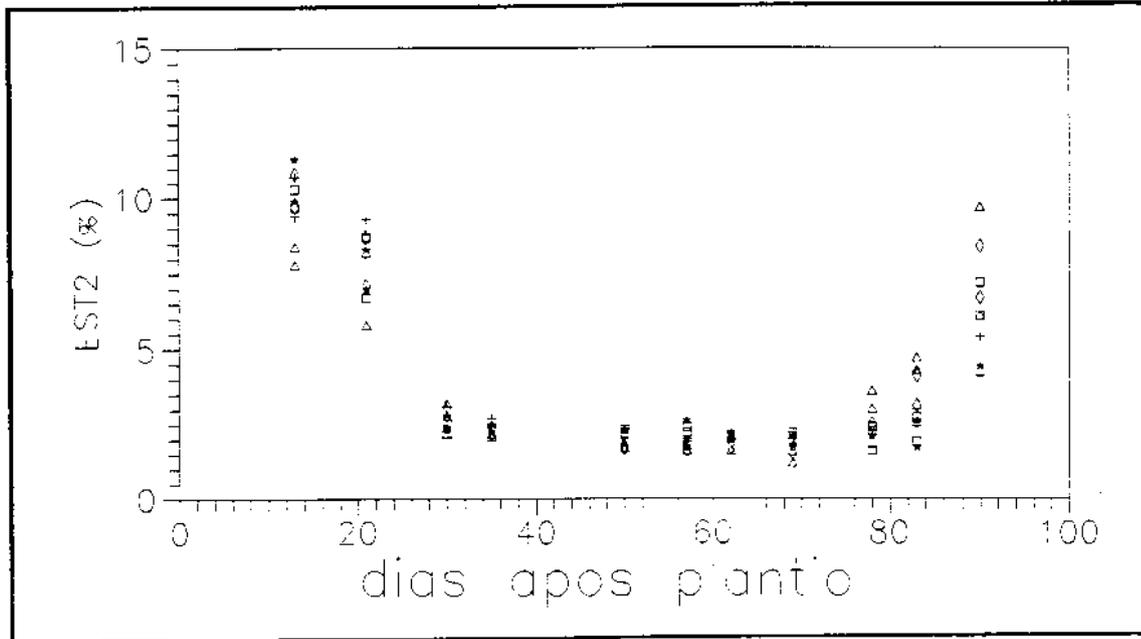


Fig. 4.9 - Gráfico do desenvolvimento de EST2 (RR)

A reflectância na banda EST4 (Figura 4.10) comportou-se de maneira similar ao IAF, com um período de máximos no meio do ciclo.

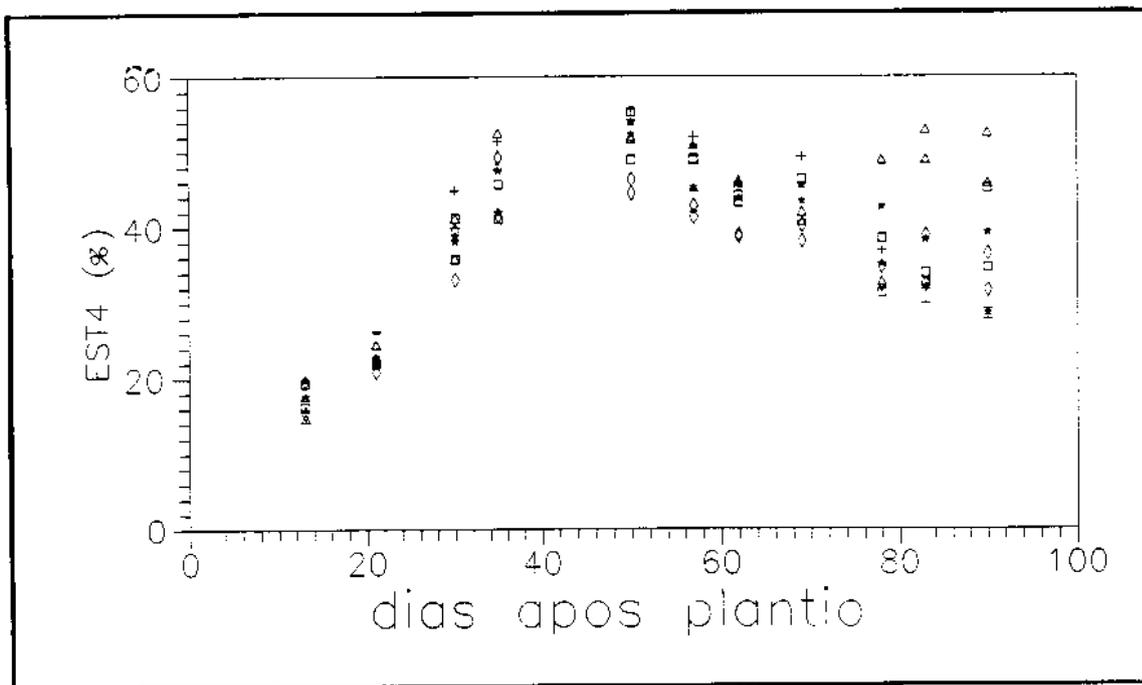


Fig. 4.10 - Gráfico do desenvolvimento de EST4 (RNIR)

Com exceção da variedade BH-1146, o desenvolvimento de EST4 regride após o atingido o máximo, porém não de modo tão brusco quanto o IAF, sugerindo até um pequeno patamar do 69º dia ao final do ciclo. Isto indica que algumas parcelas tiveram as folhas amarelecidas (implicando em redução de área verde ou IAF) sem que se perdessem as propriedades reflexivas relacionadas à estrutura do dossel.

Os padrões de desenvolvimento parabólicos exibidos pelas variáveis MFT, IAF, EST2 (RR) e EST4 (RNIR) estão coerentes com dados da literatura (Hinzman et al, 1986; Baret, 1986; Baret et al., 1987; Daughtry et al., 1980; e Formaggio, 1989).

#### 4.1.2 - TESTE DO EFEITO DE CULTIVAR

Foram feitas análises de variância procurando avaliar o efeito de cultivar sobre os parâmetros MFT, MST, H2O, IAF, EST1, EST2 e EST4, com os dados agrupados pelas missões de 2 a 11. Estes resultados estão representados na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA DO EFEITO DE CULTIVAR  
SOBRE PARÂMETROS ESPECTRAIS E AGRONÔMICOS POR MISSÃO

Missão	MFT	MST	H2O	IAF	EST1	EST2	EST4
2	5.2	19.5	36.4	49.1	1.6*	10.0	7.0
3	73.0	46.4	32.1	75.3	0.1*	6.3	2.7*
4	21.9	78.4	51.1	42.7	0.6*	0.5*	2.9*
5	61.3	47.0	59.5	30.5	39.4	35.9	44.5
6	72.0	75.1	11.9	55.8	0.6*	0.1*	58.2
7	48.1	87.1	86.0	22.0	5.6	13.6	0.4*
8	20.6	59.2	0.9*	15.1	0.1*	6.7	8.0
9	99.9	50.5	29.8	45.3	26.6	2.3*	80.5
10	80.3	24.7	87.5	89.0	2.1*	5.5	4.8*
11	88.5	50.3	12.0	0.9*	0.1*	0.6*	5.8

\* -> nível de significância menor que 5%

Observa-se que diferenças de cultivar não influíram significativamente sobre as variáveis agrônomicas, a não ser em observações isoladas como a H<sub>2</sub>O na 8ª missão e o IAF na 11ª. Esse último efeito deve-se às diferenças de taxa de senescência observada entre as cultivares, ficando algumas com área verde remanescente até aquela época, conforme foi observado visualmente.

Entretanto, os dados espectrais sofreram acentuadamente os efeitos de cultivar, principalmente a banda EST1, que atingiu significância menor que 5% durante quase todo o ciclo. Uma vez que os dados biofísicos analisados e os FRBD responderam diferentemente ao efeito de cultivar, sob o ponto de vista do modelo, as cultivares devem diferir em parâmetros espectrais (Rh e Th) e/ou estruturais (DAF e distribuição dos componentes) do dossel.

Apresentam-se no Apêndice B as médias e o agrupamento por análise de Duncan das cultivares nos casos significativos a 5%. A ordem geral dos agrupamentos obtidos para as faixas do visível (EST1 e EST2) estão em concordância com observações visuais da coloração das cultivares, registradas em caderneta e em películas fotográficas. Visualmente, a cultivar Anahuac mostrou as folhas relativamente esbranquiçadas e apresentou, de fato, as maiores reflectâncias nas bandas do VIS. Quanto à EST4 (infravermelho), a cultivar BH-1146, que teve as maiores reflectâncias no NIR, foi a que apresentou maior acúmulo de MST. As plantas da cultivar BH-1146 se destacaram nas observações no campo também pela sua altura, tendo sido as únicas parcelas a sofrer acamamento precoce, antes da maturação até (descartando-se então os dados destas parcelas).

A partir da apreciação dos resultados apresentados até aqui (4.1, 4.1.1 e 4.1.2), verifica-se que os dados agronômicos variaram em função da fase do desenvolvimento dos dosséis, havendo diferenças menores entre as parcelas. Devido a diferenças de comprimento de ciclo, a dispersão tende a aumentar nas fases finais. O mesmo ocorre com os dados espectrais, embora estes tenham sofrido efeito de cultivar. As bandas do VIS (EST1 e EST2) mostraram-se especialmente sensíveis à cultivar observada (Tabela 4.1), apesar de se observarem nos gráficos das Figuras 4.8 e 4.9 grandes diferenças entre fases distintas.

#### 4.1.3 - RELAÇÕES ENTRE DADOS ESPECTRAIS E AGRONÔMICOS

Os dados MFT, MST, H2O, H, IAF, EST1, EST2 e EST4 foram estudados sob a perspectiva de se encontrarem relações que indiquem o prosseguimento da discussão. Foram elaborados diagramas de dispersão, juntamente com análises de correlação simples, obtendo-se a Tabela 4.2.

TABELA 4.2 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES (r)  
ENTRE 5 VARIÁVEIS AGRONÔMICAS E 3 VARIÁVEIS ESPECTRAIS

	MFT	MST	H2O	IAF	H
EST1	-0.139	0.192	-0.335	-0.284	-0.523
EST2	-0.166	0.042	-0.472	-0.616	-0.596
EST4	0.225	0.020	0.396	0.671	0.433

A banda EST1 mostrou uma leve relação com a H (altura de planta). Essa relação se dá através da porcentagem de sombras na cena, fortemente correlacionada à H, conforme estudo preliminar (Valeriano, 1990). Isso vem explicar a depressão no meio do desenvolvimento de EST1, apresentado anteriormente na Figura 4.8. Com a banda EST2 ocorre o mesmo, porque a altura de plantas atua (entre outros fatores) através do sombreamento da cena.

As relações mais fortes entre dados agrônômicos e espectrais foram obtidas com as bandas EST2 e EST4, tradicionais indicadoras de parâmetros quantitativos do dossel. A única variável agrônômica que se destacou nesse estudo foi o IAF. As demais variáveis não apresentaram relação clara com os dados espectrais. Observando-se o desenvolvimento de IAF e de EST4 (Figuras 4.6 e 4.10), já se poderia esperar tal correlação, positiva. A curva de desenvolvimento de EST2 mostra-se o inverso da de EST4 e a correlação de EST2 com o IAF é também forte porém negativa. As duas bandas respondem claramente e de forma inversa ao IAF, como se pode ver nos diagramas de dispersão mostrados mais adiante (Figuras 4.11 e 4.12).

Para avaliar a importância de cada dado nas relações espectro-agronômicas, foi feita ainda uma análise de correlação canônica, agrupando os dados espectrais na variável canônica SPC e os dados biofísicos na variável canônica AGRO. Uma variável canônica é um polinômio que agrupa um conjunto de variáveis de tal modo que este polinômio tenha a melhor correlação possível com as variáveis de um outro conjunto. A análise canônica altera o sistema de variáveis (eixos) original (que é 1:1:1:...) para criar o sistema de maior correlação com distribuição original dos dados. As principais variáveis canônicas foram assim estabelecidas, em termos de seus coeficientes normalizados:

$$\text{AGRO} = -1,51 (\text{MFT}) + 1,97 (\text{MST}) + 0,89 (\text{H}_2\text{O}) - 0,45 (\text{IAF}) \quad (4.1)$$

$$\text{SPC} = 0,62 (\text{EST1}) - 0,06 (\text{EST2}) - 0,87 (\text{EST4}) \quad (4.2)$$

O que se tem em (4.2), na prática, é a definição de um índice de vegetação, em forma polinomial, específico para se estudarem os parâmetros agronômicos relacionados nessa análise, nas condições vigentes durante este experimento. Por analogia, poder-se-ia dizer que AGRO é um índice agronômico para estimativa de reflectância do dossel.

Determinando a correlação entre os dados agronômicos e essas variáveis canônicas, obteve-se o quadro de correlações apresentado na Tabela 4.3, pela qual observa-se que o IAF apresenta grande peso em ambas variáveis canônicas. Isto significa que, no sistema de eixos representado por cada variável canônica, os dados se distribuem principalmente ao longo do eixo referente ao IAF, sendo também o IAF o parâmetro que mais causa variação em SPC.

TABELA 4.3 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO (r) ENTRE DADOS AGRONÔMICOS E AS VARIÁVEIS CANÔNICAS AGRO E SPC

	AGRO	SPC
MFT	-0.52	-0.42
MST	0.02	0.02
H <sub>2</sub> O	-0.26	-0.21
IAF	-0.90	-0.72

Determinando a correlação entre os dados espectrais e as variáveis canônicas, obteve-se o quadro de correlações apresentado na Tabela 4.4.

TABELA 4.4 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO (r) ENTRE DADOS ESPECTRAIS E AS VARIÁVEIS CANÔNICAS AGRO E SPC

	AGRO	SPC
EST1	0.44	0.55
EST2	0.68	0.85
EST4	-0.65	-0.81

Observa-se na Tabela 4.4 que as bandas EST2 e EST4 apresentaram forte sensibilidade à variável AGRO, comparando-se com EST1. A banda EST1, além de não responder muito à variação de AGRO, exerce pouco peso na variável SPC. De fato, os estudos espectrais com fins de análises quantitativas são tradicionalmente feitos com as bandas R e NIR, não sendo tão comum o emprego de reflectância na região do verde (como EST1), conforme recomendam os resultados de Perry e Lautenschlager (1984).

Comparando-se as Tabelas 4.1 e 4.2, observa-se também que a ordem das bandas estudadas em relação ao efeito de cultivar é invertida para o efeito do IAF. Ou seja, as bandas mais sensíveis à diferença de cultivar são as bandas menos dependentes do IAF. Sugere-se que a banda do NIR não seria adequada para discriminação de cultivares enquanto o efeito de fatores quantitativos do dossel (IAF, no caso) estiver atuando. Por outro lado, as bandas do visível, por terem menor transmitância através de folhas, representam a reflectância exibida pelas primeiras camadas da vegetação, que está muito mais ligada ao genótipo das plantas, e não sofrem tanto efeitos quantitativos.

## 4.2 - RELAÇÕES ENTRE RR (EST2) E RNIR (EST4) E O IAF

### 4.2.1 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No diagrama de dispersão da Figura 4.11, observa-se que as relações entre o IAF e os FRBD foram tipicamente não lineares. Observou-se tendência assintótica em ambas reflectâncias, sendo mais forte para a RR (curva inferior), que estabiliza sob baixos valores de IAF (em torno de 3,0). A variação de RNIR em função de IAF mostrou-se com tendências a saturar com IAF maiores do que para RR. Isto é esperado devido à maior transmitância nessa faixa do espectro, com uma conseqüente extensão do mecanismo de múltiplas camadas para as folhas inferiores do dossel.

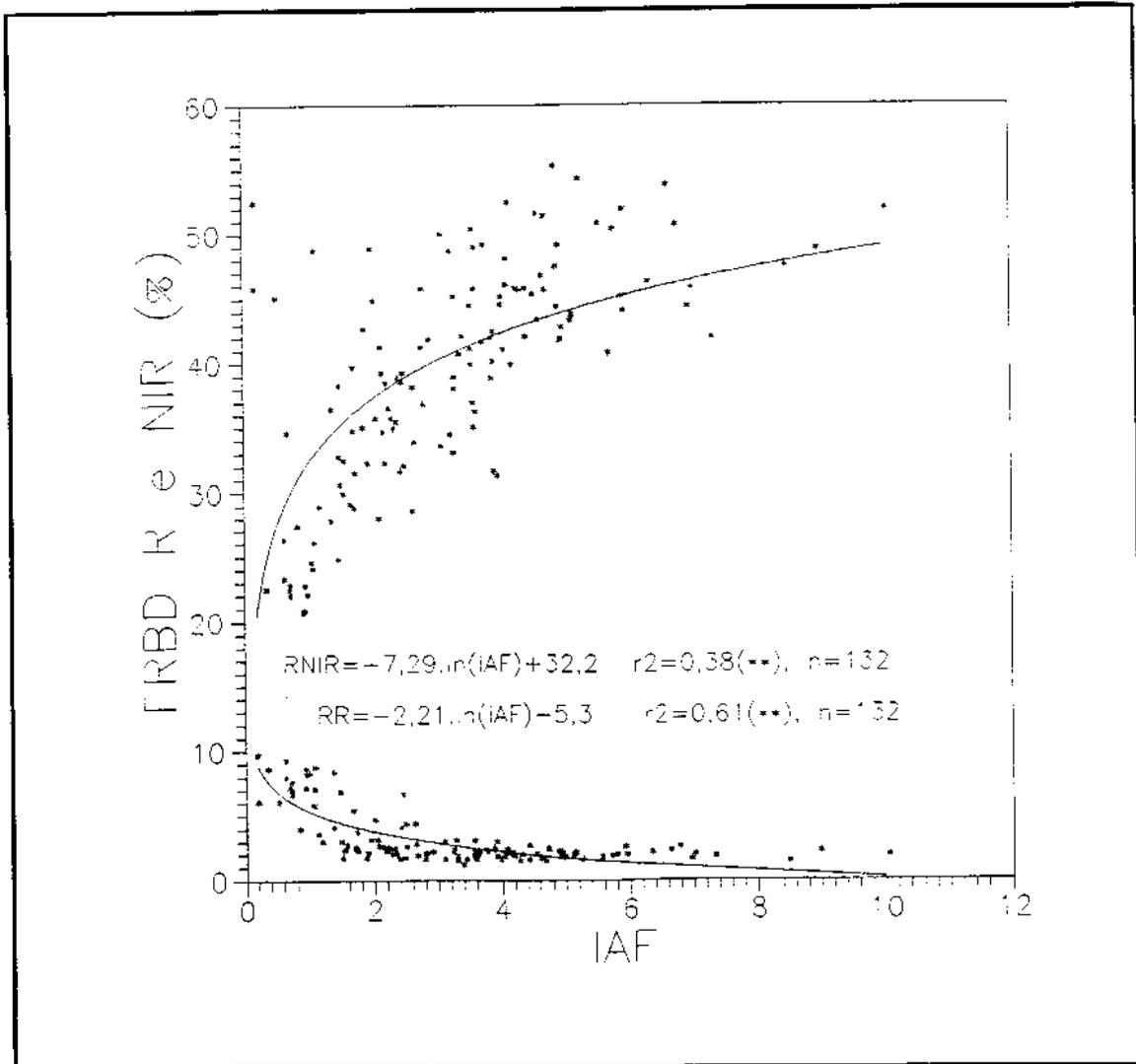


Fig. 4.11 - Diagrama de dispersão entre IAF e os FRBB (RR e RNIR) com respectivas curvas de regressão logarítmica para dados ao longo de todo o ciclo.

Com base no coeficiente de determinação obtido para a regressão, a RR mostrou-se mais dependente de IAF, tendo 61% de sua variação explicada pela variação de IAF, enquanto que para a RNIR, tem-se 38%. Os dados de RR se comportaram melhor em relação ao modelo logarítmico, comparados com os de RNIR. Isto indica que outras variáveis (sem ser o IAF) envolvidas nos mecanismos de reflectância atuam mais na RNIR do que na RR. A RR, embora cesse sua va-

riação com IAF relativamente pequeno, mostra-se mais dependente do IAF, sem haver tanta dispersão dos dados.

Na Figura 4.12 são apresentados os diagramas de dispersão entre os FRBD e o IAF com as curvas de regressão pelo modelo logarítmico para a fases antes (a) e após (b) o florescimento. Observa-se que o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) decresce da primeira para a segunda fase em ambas as bandas. Embora as regressões obtidas permanecessem significativas a 1% de nível de confiança, o coeficiente do termo dependente de IAF respectivo a cada FRBD decresce. Isto indica uma menor variação das reflectâncias em função de IAF durante a fase final.

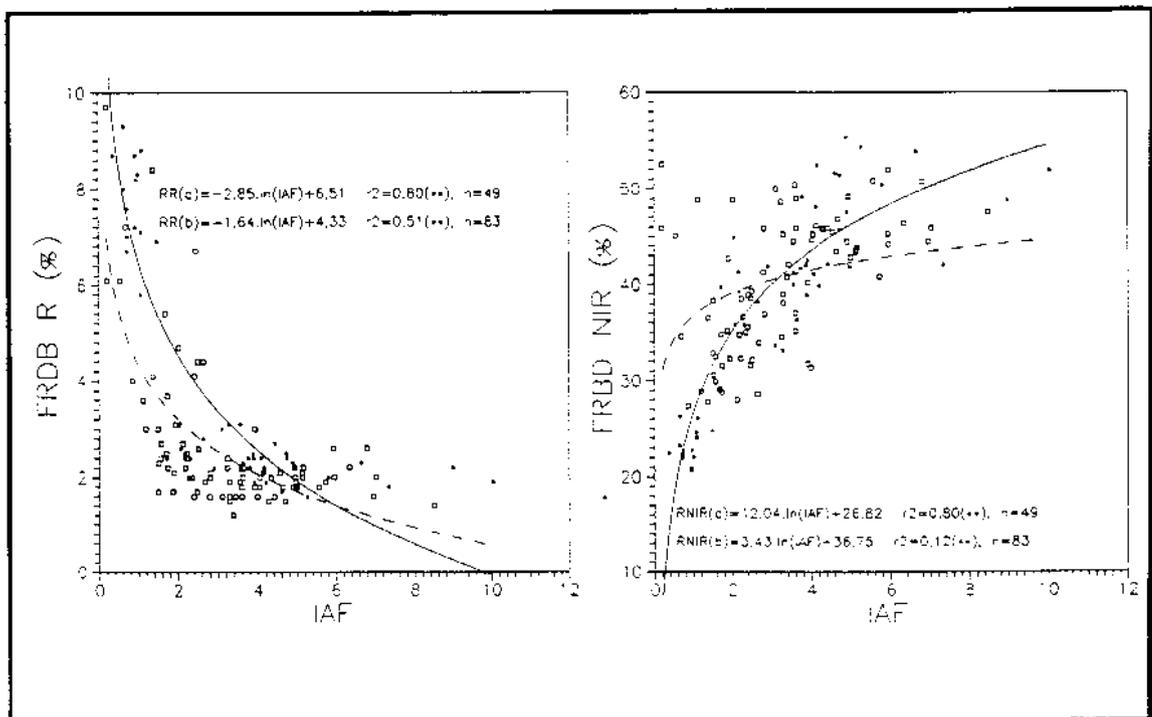


Fig. 4.12 - Diagrama de dispersão entre IAF e os FRBD (RR e RNIR)

Curvas de regressão logarítmica para dados antes (—) e depois (---) do florescimento.

Observa-se que o valor de IAF para a saturação de RR tende a ser maior na primeira fase, indicando também que a queda inicial de IAF, logo após o florescimento, dificilmente poderia ser percebida através dessa banda. Somente quando o IAF se aproxima de zero (com o amarelamento das folhas superiores) é que a RR responde. A degeneração das propriedades reflexivas das folhas ocorre de baixo para cima do dossel, ficando verdes as folhas superiores, até se atingir o IAF nulo. Como consequência, as bandas do VIS (como no caso, RR) respondem como se o IAF decrescesse mais lentamente do que de fato.

A diminuição da variação de RNIR em função de IAF pode ser explicada através da evolução das características morfológicas do dossel. Da germinação até o florescimento, ocorre o crescimento de biomassa verde, correspondente a um aumento de IAF. Nesta fase, a resposta espectral modifica-se drasticamente por se estar alterando o alvo observado, de solo exposto a dossel vegetal totalmente verde. Esta alteração não ocorre do mesmo modo após o florescimento, quando se tem o processo de senescência do dossel. Embora o valor do IAF diminua, o efeito sobre a RNIR é amenizado, sugerindo que a diminuição da área foliar verde não corresponda à redução do efeito da estrutura de mesófilo ou de dossel. Assim, a senescência causaria diminuição de absorção do fluxo no VIS antes de se perderem as propriedades reflexivas que são devidas à estrutura do dossel e a do mesófilo das folhas.

#### 4.2.2 - ABORDAGEM PELO MODELO

##### 4.2.2.1 - TESTE DO MODELO SAIL

O modelo SAIL foi aplicado caso a caso, levando-se em conta a situação dos parâmetros de entrada em cada momento de aquisição (iluminação, Rg, IAF e distribuição da área pelos componentes do dossel). Desta forma, foram elaborados arquivos de resultados do modelo (FRBDc) para os comprimentos de onda 650nm (RRc) e 800nm (RNIRc). Esses resultados foram comparados aos FRBD medidos (FRBD0), através dos diagramas de dispersão e análise de regressão.

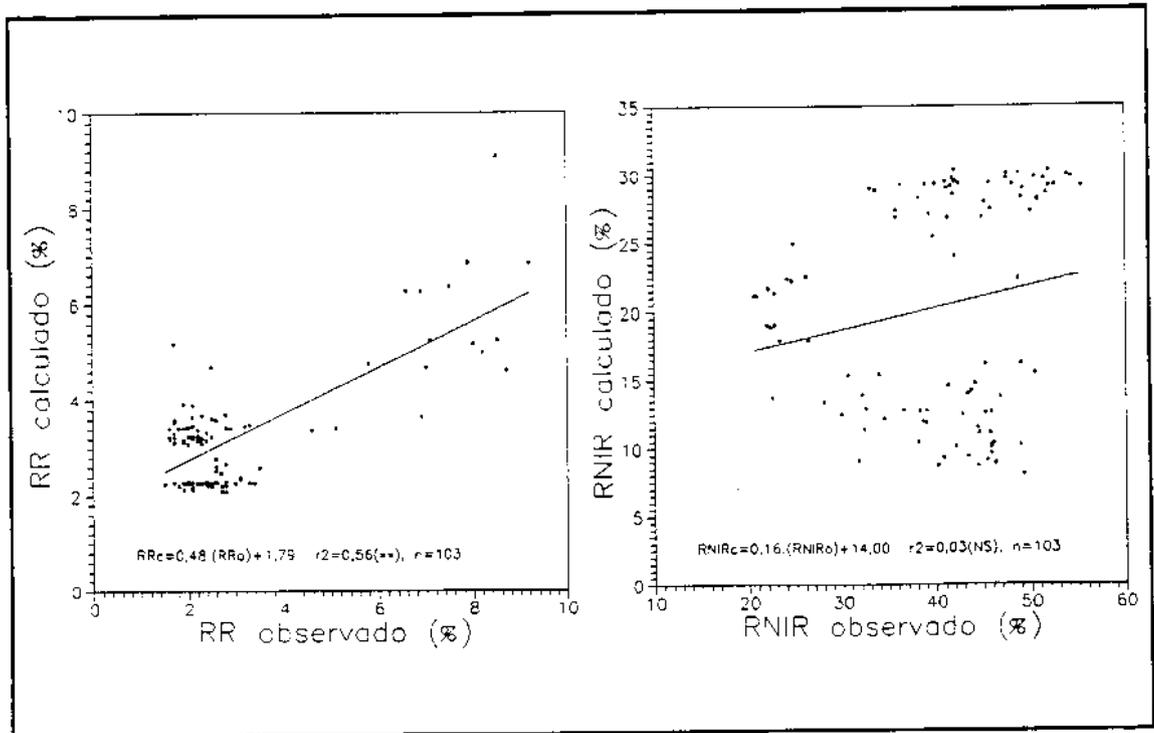


Fig. 4.13 - Diagramas de dispersão e curvas de regressão linear entre os FRBDc (SAIL) e os FRBD0, com dados ao longo de todo o ciclo.

Observando a Figura 4.13, na faixa do vermelho (RR) o desempenho do modelo pode ser considerado satisfatório, uma vez que foi obtida uma função linear e crescente com os dados medidos. Ocorre um agrupamento de dados em torno do valor mínimo medido de RRo (correspondente ao longo período em que RRo permanece praticamente constante). Os dados restantes, embora pouco numerosos, sugerem linearidade. Porém, o diagrama de dispersão entre RNIRc e RNIRo revela forte discrepância entre os respectivos resultados. O coeficiente de determinação foi praticamente nulo e a regressão não foi significativa para esta banda.

Parte dos pontos de RNIR (Figura 4.13) sugere uma relação inversa entre o modelo e a realidade, enquanto outra parte sugere relação direta. Identificando-se os pontos do primeiro grupo, constatou-se que representam os dados provenientes de parcelas com presença de espigas. Nessa condição, o dossel é descrito no modelo como tendo três camadas, sendo a camada superior formada pelas espigas.

Retirando-se desta análise os pontos referentes a parcelas com espigas e tratando novamente os dados restantes, ocorre um aumento do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,56 para 0,84 e de 0,03 para 0,71, entre as RR e as RNIR, respectivamente (Figura 4.14). Além disso, a regressão entre RNIRo e RNIRc atinge 1% de significância.

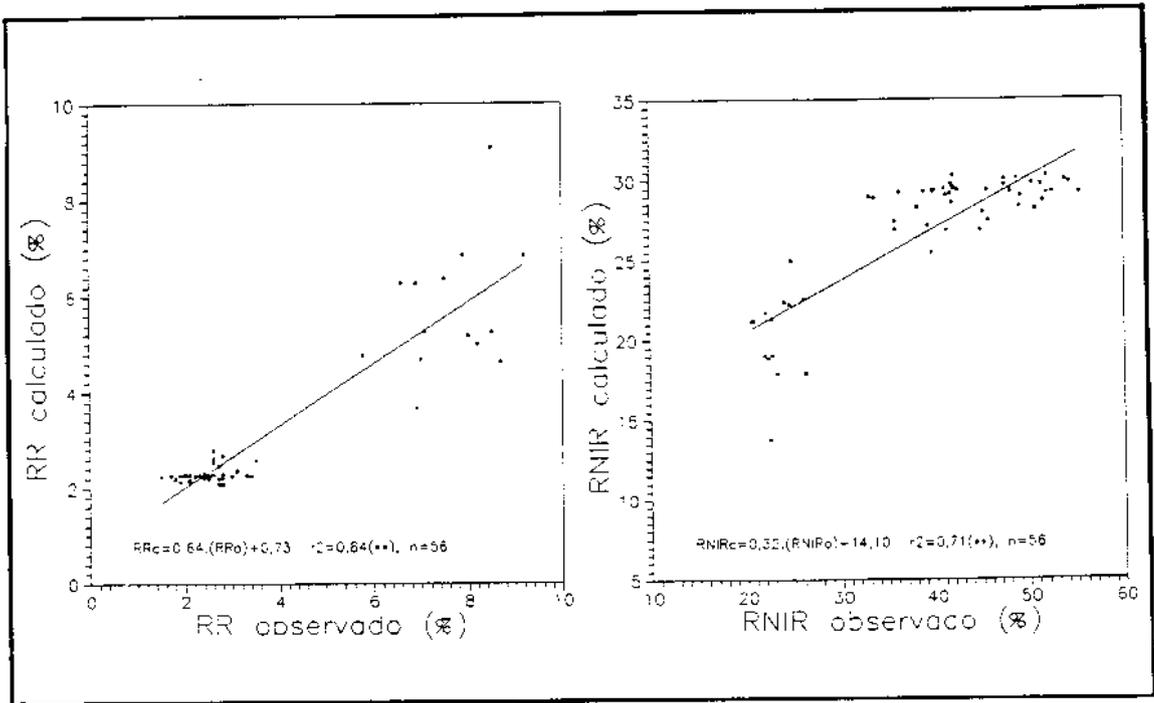


Fig. 4.14 - Diagramas de dispersão e curvas de regressão linear entre os FRBDC (SAIL) e os FRBDO, com dados para parcelas sem espigas.

Deve ser observado que, em valor absoluto, o resultado do modelo varia em menor proporção do que os FRBD medidos, em ambos comprimentos de onda, sendo esse efeito mais acentuado para a RNIR. Desse modo, o modelo tende a superestimar os pequenos FRBD e subestimar os grandes. Esta observação pode ser feita também sobre os resultados de Badhwar et al (1985) para o modelo SAIL. Isto pode ser atribuído, entre outros motivos, aos parâmetros de entrada que não foram controlados experimentalmente, como DAF, Rh e Th.

Outra observação digna de nota é o fato da inclusão da terceira camada (espigas) ter prejudicado o desempenho do modelo, havendo possibilidade do erro se localizar em mais do que um ponto no processo de obtenção dos dados. A determinação da DAF para o modelo e a estimativa

de área das espigas são muito difíceis devido à complexidade de sua forma. Os dados espectrais atribuídos às espigas também são de baixa qualidade uma vez que provêm de uma espiga verde. Por estas razões nem o programa do modelo nem o próprio modelo ainda não podem ser colocados em questão quanto ao mau desempenho relativo às espigas.

#### 4.2.2.2 - SIMULAÇÕES

Algumas simulações do modelo foram feitas, afim de dar suporte para o prosseguimento da discussão. Para essas simulações, foi escolhido o conjunto de dados de entrada correspondentes à situação da parcela 10, durante a missão 5. A simulação dos dados de IAF, Rg, I'o e zs foi feita dentro do intervalo de variação observado no próprio experimento. Para os dados de Rh e DAF, a variação dos valores para simulação foi feita arbitrariamente, uma vez que não se dispõe de dados próprios.

A variação dos dados de iluminação (I'o e zs), dentro do intervalo observado, não causou diferenças nos resultados do modelo, portanto as simulações destes parâmetros não serão apresentadas. Embora a porcentagem de luz difusa ( $100\% - I'o$ ) tenha variado de 5 a 84%, aproximadamente, a RRC e a RNIRC sofreram mudanças menores que 1% da reflectância da parcela. Já a variação de zs não foi muito grande (de  $38^\circ$  a  $56^\circ$ ) e o modelo também não respondeu a esta simulação. Desse modo, apesar das simulações serem feitas sob uma única situação de geometria de iluminação, puderam ser comparadas aos diferentes FRBD, em vista da variação observada de zs e I'o não influir no modelo.

Torna-se importante ressaltar que a observação de ausência do efeito de zs e de I'o sobre o modelo não deve ser aplicada para dosséis de trigo com pequeno IAF.

Além disso, o intervalo de  $z_s$  testado permite averiguar seu efeito somente na dispersão dos dados medidos, não servindo para maiores generalizações.

A simulação de diferenças de IAF foi feita juntamente com outros parâmetros ( $R_g$ , DAF e  $R_h$ ), para se observarem os efeitos destes em combinação com o IAF.

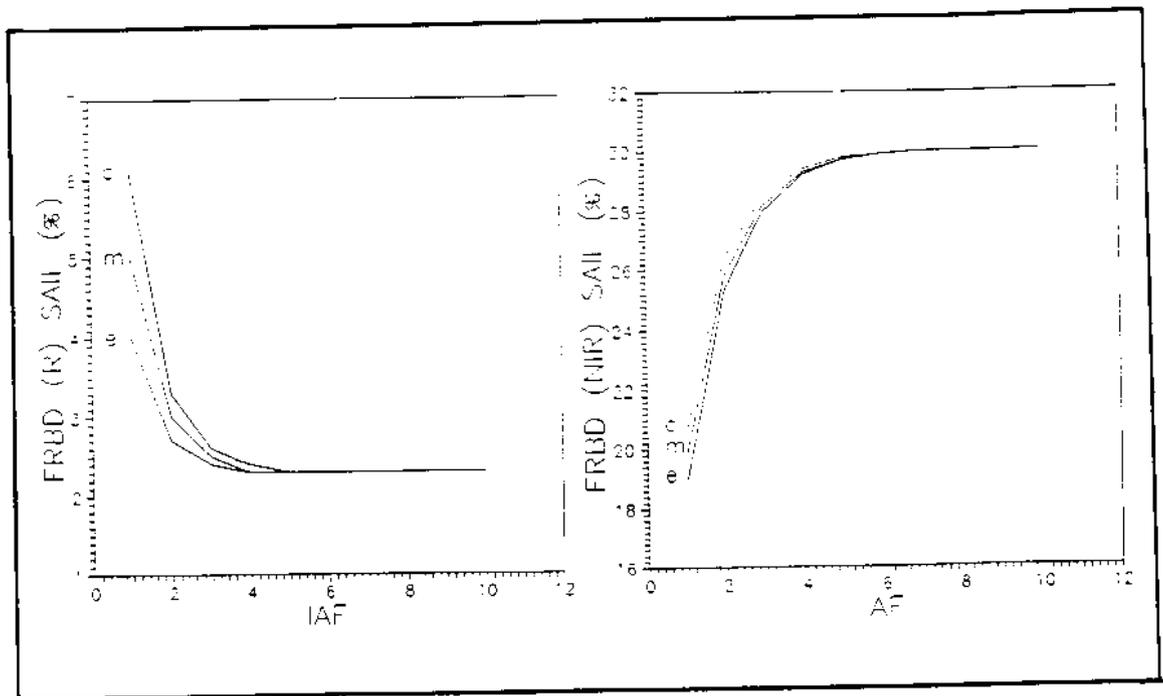


Fig. 4.15 - Simulação SAIL da variação de RRc e RNIRc em função de IAF para diferenças de  $R_g$   
 (c) solo claro ( $R_g(R)=17,00\%$  e  $R_g(NIR)=21,00\%$ ),  
 (e) solo escuro ( $R_g(R)=8,50\%$  e  $R_g(NIR)=12,50\%$ )  
 e (m) solo médio ( $R_g(R)=12,75\%$  e  $R_g(NIR)=16,75\%$ ).

Na Figura 4.15, estão apresentados os gráficos da variação de RR e RNIR em função de IAF sob três situações de  $R_g$  (as extremas e a mediana). Com aumento de IAF, as curvas tendem a convergir rapidamente, porém só se tornam rigorosamente idênticas com IAF acima de 4,0 para RR e 5,0 para RNIR.

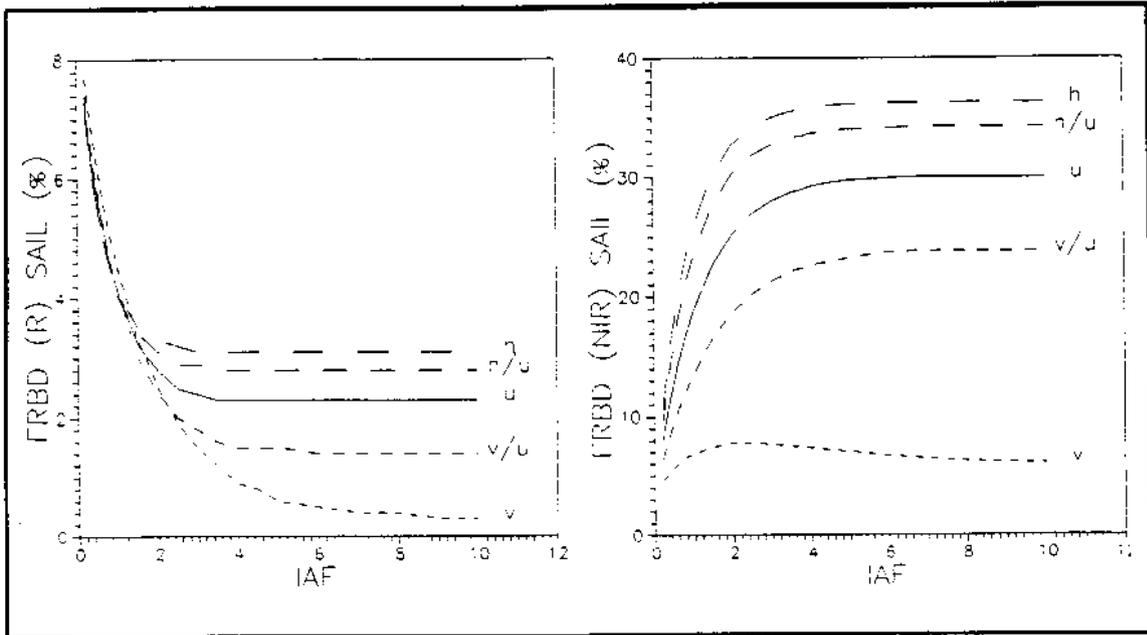


Fig. 4.16 - Simulação SAIL da variação de RRC e RNIRc em função de IAF para diferentes DAF.

(u) DAF uniforme; com folhas dispostas em  $z_1$   
 (h) horizontal; (v) vertical; (u/v)  $z_1=65^\circ$ ; e  
 (u/h)  $z_1=25^\circ$ .

Fazendo a mesma simulação, de IAF, para dosséis de arquitetura diferente, obtêm-se os resultados representados nos gráficos da Figura 4.16. Nela pode-se observar que os dosséis planófilos tiveram reflectâncias maiores, além de apresentarem IAF de saturação menor. Dados observados em outro trabalho (Jackson e Pinter Jr., 1986) confirmam esta tendência. O IAF crítico variou de 2,0 até 7,0 no R e de 4,0 até 10,0 no NIR, aproximadamente, quando foi simulado um dossel completamente horizontal e outro completamente vertical, respectivamente. No caso do dossel vertical, ocorre o fato interessante do aumento de IAF causar diminuição da RNIR. Isto faz sentido, pois o modelo respondeu em função do crescente sombreamento causado por um aumento da área de folhas verticais, para o  $z_s$  da situação corrente (parcela 10, missão 5,  $z_s=46^\circ$ ), e uma visada a

nadir.

Pode-se observar também que as diferenças de FRBDC são maiores entre dosséis uniformes e verticais do que entre uniformes e horizontais, sugerindo maior sensibilidade do modelo à DAF quanto mais eretas forem as folhas do dossel. Esta tendência se mantém na simulação de Rh (R e NIR), apresentada nos gráficos da Figura 4.17.

Verifica-se que a variação dos FRBDC em função do IAF é claramente não-linear, com estabilização dos resultados a partir de um certo IAF. As curvas de regressão obtidas experimentalmente também apresentaram o mesmo aspecto, conforme se observa comparando-se a Figura 4.16 às Figuras 4.11 e 4.12. Essa comparação permite também descartar DAF totalmente erectófila (folhas verticais somente) para descrever o trigo, visto a relação invertida em RNIR.

A variação de Rh de folhas teve relação linear com o FRBDC (Figura 4.17), b com o modelo respondendo mais fracamente para o dossel vertical, de modo geral. Para RRc, especialmente, a inclinação da reta é maior para o dossel horizontal do que para o dossel uniforme. Presume-se que essa diferença em relação à RNIRc se deva às diferenças nas propriedades espectrais das folhas, principalmente na Th.

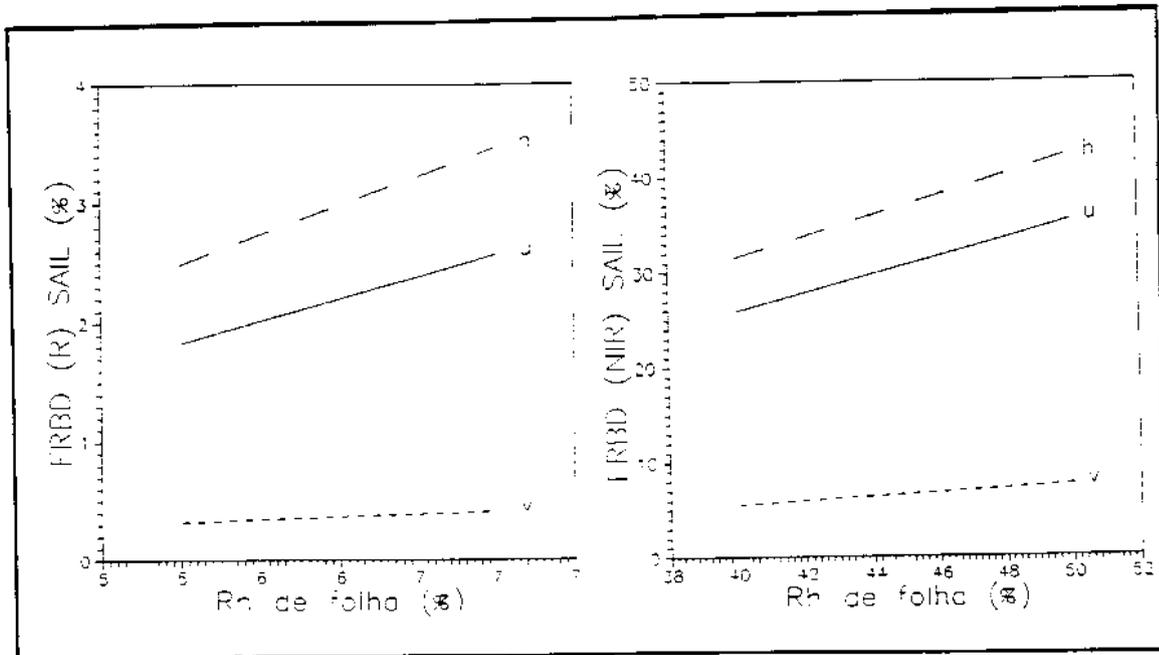


Fig. 4.17 - Simulação SAIL da variação de RR e RNIR em função de Rh para diferentes DAF.

(u) DAF uniforme, e com folhas dispostas (h) horizontalmente e (v) verticalmente.

A partir dos resultados da simulação de Rh, considera-se que os dados espectrais dos elementos de dossel são cruciais para estudos mais detalhados do comportamento espectral do trigo. O controle desses parâmetros torna-se obrigatório para testes definitivos e inversão segura do modelo, uma vez que suas magnitudes alteram diretamente a FRBD. Pelo modelo, mesmo havendo transmitância alta (NIR), mudanças em Rh correspondem linearmente a diferenças no FRBD (conforme observaram também Badhwar et al, 1985), quando se tem IAF constante (Figura 4.17). O efeito de Rh deve ser considerado também no caso de mudanças devido a distúrbios fisiológicos ou simplesmente à senescência, como ocorreu de fato.

CAPÍTULO 5CONCLUSÕES

O objetivo principal desse trabalho foi levantar bases para o avanço dos estudos sobre as relações entre parâmetros agronômicos e a reflectância espectral da cultura do trigo. O estudo abrangeu combinadamente a abordagem experimental e a aplicação do modelo SAIL de reflectância espectral de dosséis vegetais. São relatadas a seguir as principais conclusões deste estudo da reflectância espectral da cultura do trigo, inferências obtidas através do modelo, bem como recomendações necessárias para o prosseguimento do estudo do comportamento espectral da vegetação.

Verificou-se que os dados agronômicos estiveram ligados à fenologia dos dosséis, havendo pouca diferença entre as cultivares. Devido a diferenças de duração dos ciclos de desenvolvimento, a dispersão dos dados foi maior nas fases finais. O mesmo ocorre com os dados espectrais, embora estes tenham sofrido efeito de cultivar. As bandas do VIS (EST1 e EST2) mostraram-se especialmente sensíveis à cultivar observada, apesar das diferenças serem grandes entre fases distintas. O efeito de cultivares sobre a reflectância do trigo foi atribuído à diferença de arquitetura das plantas e de comportamento espectral dos seus componentes, uma vez que este efeito não se manifestou sobre o IAF.

As parcelas apresentaram variações na resposta espectral correspondentes às alterações biofísicas ocorridas durante o ciclo de desenvolvimento. Em especial, destaca-se o padrão de desenvolvimento parabólico exibido pelas variáveis IAF, RR (EST2) e RNIR (EST4).

Os dados espectrais que estiveram mais relacionados às variáveis biofísicas foram a RR e a RNIR. Desse modo, confirma-se a recomendação de se utilizar bandas na região do vermelho e do infravermelho próximo para avaliação das condições de desenvolvimento do trigo.

O IAF apresentou-se como a principal variável agrônômica que influi na resposta espectral do trigo. As simulações feitas no modelo permitiram concluir que o efeito do IAF está sujeito a interações com outros parâmetros como Rh, Rg e DAF, embora ele tivesse atuado sempre de forma dominante nas condições experimentais.

O relacionamento de IAF com RR e RNIR mostrou ser curvilíneo, com os modelos de regressão logarítmica se assemelhando notavelmente com a resposta do modelo para dosséis com DAF de uniforme a planófila. Há uma diferença entre as relações observadas antes e depois do florescimento, devido à maneira que ocorre a variação de IAF em cada fase. O resultado é que a variação de IAF influi sobre os FRBD, durante o crescimento, mais drasticamente do que durante a maturação e a senescência.

Considerando a aplicação dos FRBD em estimativas de IAF, conclui-se que, com IAF alto, a estimativa é prejudicada pelo fato de se observar comportamento assintótico, havendo saturação da relação com a reflectância. A região do infravermelho apresenta-se mais adequada, com a reflectância saturando a IAF maiores do que na região do vermelho. Para ambas as bandas, durante a fase de crescimento os FRBD mostram-se mais claramente dependentes do IAF.

Observou-se também que a ordem das bandas estudadas em relação ao efeito de cultivar foi invertida para o efeito do IAF. Ou seja, as bandas mais sensíveis à diferença de cultivar foram as bandas menos dependentes do IAF. Concluiu-se que a banda do NIR não é adequada para discriminação de cultivares enquanto o efeito de fatores quantitativos do dossel (IAF, no caso) estiver atuando. Pelo modelo, mesmo com transmitância alta (NIR), mudanças em Rh correspondem linearmente a diferenças no FRBD, quando se tem IAF constante. Por outro lado, as bandas do visível, por terem menor transmitância, representam a reflectância exibida pelas primeiras camadas da vegetação, que está muito mais ligada ao genótipo das plantas, e não sofrem tanto os efeitos quantitativos.

A aplicação do modelo mostrou-se muito pres-  
tativa para um acompanhamento teórico da parte experimental das análises. Em geral, o modelo confirmou as relações espectro-agronômicas observadas no experimento de campo. Outra importante contribuição do modelo neste estudo foi permitir investigações sobre parâmetros não controlados no experimento.

O teste do modelo SAIL para o trigo revelou falhas quando foi considerada a terceira camada, constituída de espigas. São várias as possíveis fontes de erro, não se discutindo, portanto, o desempenho do próprio modelo em relação às espigas. Conseqüentemente, sua aplicação nas simulações foi restringida a duas camadas.

Foram encontradas dificuldades no levantamento de dados de entrada para o modelo, destacando-se os dados de arquitetura da planta referentes à distribuição angular de folhas, de palhas e de espigas. Recomenda-se o desenvolvimento de metodologias apropriadas para uma deter-

minação, quanto mais prática e precisa possível, levando-se em conta as condições de amostragem no campo.

Os dados de reflectância e transmitância hemisférica dos componentes do dossel são apontados como cruciais para se poder observar o desempenho do modelo quanto ao aspecto de magnitude da reflectância. Além disso, recomenda-se que qualquer análise quantitativa da vegetação baseada em FRBD tenha os valores desses parâmetros como referência, principalmente quando se observarem parcelas de materiais genéticos diferentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aase, J.K. Relationship between leaf area and dry matter in winter wheat. *Agronomy Journal*, 70(4):563-565, 1978.
- Aase, J. K.; Siddoway, F. H.; Millard, J. P. Spring wheat-leaf phytomass and yield estimates from airborne scanner and hand-held radiometer measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 5(5):771-781, 1984.
- Allen, W. A.; Richardson, A. J. Interaction of light with a plant canopy. *Journal of the Optical Society of America*, 58(8):1023-1028, 1968.
- Allen, W. A.; Gayle, T. V.; Richardson, A. J. Plant-canopy irradiance specified by the Duntley equations. *Journal of the Optical Society of America*, 60(3):372-376, 1970.
- Asrar, G.; Fuchs, M.; Kanemasu, E. T.; Hatfield, J. L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, 76(2):300-306, 1984.
- Badhwar, G., D.; Verhoef, W.; Bunnik, N., J., J. Comparative study of Suits and SAIL canopy reflectance models. *Remote Sensing of Environment*, 17(2):179-195, 1985.
- Baret, F. **Contribution au suivi radiométrique de cultures de cereales.** (Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université) - University de Paris-Sud, Centre d'Orsay., 1986. 182p.

Baret, F.; Champion, I.; Guyot, G.; Padaire, A. Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer. **Remote Sensing of Environment**, 22(3):367-378, 1987.

Baret, F. Un modele simplifie de reflectance et d'absorbance d'un couvert vegetal. **Colloque Internationale Signatures Spectrales d'objects en télédetection**. Bordeaux, 4., 18-22 Jan. 1988.

Bauer, M. E.; Daughtry, C. S. T.; Biehl, L. L.; Kanemasu, E. T.; Hall, F. G. Field spectroscopy of agricultural crops. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 24(1):65-75, 1986.

Best, R. G.; Harlan, J. C. Spectral estimation of green leaf area index of oats. **Remote Sensing of Environment**, 17(1):27-36, 1985.

Chance, J., E. Applications of Suits spectral model to wheat. **Remote Sensing of Environment**, 6(2):147-150, 1977.

Chance, J., E.; LeMaster, E., W. Suits reflectance models for wheat and cotton: theoretical and experimental tests. **Applied Optics**, 16(2):407-412, 1977.

\_\_\_\_\_ Plant canopy light absorption model with application to wheat, **Applied Optics**. 17(16):2629-2636, 1978.

Daughtry, C.S.T.; Bauer, M.E.; Creceius, D.W.; Hixson, M.M. Effects of management practices on reflectance of spring wheat canopies, **Agronomy Journal** 72(6):1055-1060, 1980.

- Demetriades-Shah, T. H.; Court, M. N. Oblique view reflectance for assessing nitrogen status of incomplete canopies. *International Journal of Remote Sensing*, 8(7):1049-1050, 1987.
- Duggin, M. J. The field measurement of reflectance factors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46(5):643-647, 1980.
- Dusek, D. A.; Jackson, R. D.; Musick, J. T. Winter Wheat Vegetation Indices Calculated from Combinations of Seven Spectral Bands, *Remote Sensing of Environment*, 18(3):255-267, 1985.
- Esau, K. *Anatomia das plantas com sementes*. 10. ed. São Paulo, Edgar Blucher, 1974.
- Formaggio, A. R. *Características agronômicas e espectrais para sensoriamento remoto de trigo e de feijão*. (Tese de doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989. 180 p.
- Gausman, H. N.; Allen, W. A.; Wiegand, C. L.; Escobar, D. E.; Rodrigues, R. R.; Richardson, R. R. *The leaf mesophyll of twenty crops, their light spectra, and optical and geometrical parameters*. Westlaco, TX, USDA, 1973. (USDA nº 1465 Technical Bulletin).
- Goel, N. S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, 3:1-212, 1987.

- Goel, N. S.; Deering, D. W. Evaluation of a canopy reflectance model for LAI estimation through its inversion. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 23(5):674-684, 1985.
- Goel, N., S.; Thompson, R., L. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. V. Estimation of leaf angle using measured canopy reflectances. **Remote Sensing of Environment**, 16(1):69-85, 1984.
- Goel, N. S.; Strebel, D. E. Simple Beta Distribution Representation of Leaf Orientation in Vegetation Canopies. **Agronomy Journal**, 76(5):800-803, 1984.
- Grant, L.; Daughtry, C. S. T.; Vanderbilt, V. C. Variations in the Polarized Leaf Reflectance of Sorghum bicolor. **Remote Sensing of Environment**, 21(3):333-339, 1987.
- Hatfield, J. L.; Kanemasu, E. T.; Asrar, G.; Jackson, R. D.; Pinter Jr., R. J.; Reginato, R. J.; Idso, S. B. Leaf-area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat. **International Journal of Remote Sensing**, 6(1):167-175, 1985.
- Hinzman, L. D.; Bauer, M. E.; Daughtry, C. S. T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. **Remote Sensing of Environment**, 19(1):47-61, 1986.
- Idso, S. A.; DeWit, C. T. Lights relations in plant canopies. **Applied Optics**, 9(1):177-184, 1970.

- Jackson, R. D.; Pinter Jr., P. J. Spectral response of architecturally different wheat canopies. **Remote Sensing of Environment**, 20(1):43-56, 1986.
- Knipling, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, 1(2):155-159, 1970.
- LeMaster, E., W.; Chance, J., E.; Wiegand, C., L. Seasonal verification of the Suits spectral reflectance model for wheat. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 46(1):107-117, 1980.
- Perry, C. R.; Lautenschlager, L. F. Functional equivalence of spectral vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, 14(1-3):169-182, 1984.
- Pinter Jr., P. J.; Jackson, R. D.; Idso, S. B.; Reginato, R. J. Diurnal patterns of wheat spectral reflectances. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 21(2):156-163, 1983.
- Pinter Jr., P. J.; Jackson, R. D.; Ezra, C. E.; Gausman, H. W. Sun-angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. **International Journal of Remote Sensing**, 6(12):1813-1825, 1985.
- Ripple, W. J. Relationships of spectral reflectance to leaf water stress. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 52(10):1669-1675, 1986.

- Rudorff, B.F.T.; Batista, G.T.; Godoy JR., M.; SÁ, L. R.; Steffen, C.A.; Bertolucci, C.L.; Freitas, E.S.; Zimback, C.R.; Azenha, A.C.; Oviedo, A.F.P.; Pissiliate Jr., E.; Pissiliate, S.H.S.T. **Relatório da campanha de medidas radiométricas do trigo na região de Assis - safra 1988.** São José dos Campos, 1989. (INPE-4949-RPE/598).
- Rudorff, B.F.T.; Batista, G.T. **Resposta espectral do trigo e sua relação com parâmetros agrônômicos.** São José dos Campos, 1989. (INPE-4950-RPE/599).
- Sinclair, T., R.; Schreiber, M., M.; Hoffer, R., M.M. Diffuse reflectance hypothesis for the pathway of solar radiation through leaves. *Agronomy Journal*, 65(2):276-283, 1973.
- Smith, J. A.; Oliver, R. E.; Berry, J. K. A comparison of two Photographic Techniques for estimating foliage angle distribution. *Australian Journal of Botany*, 25:545-553, 1977.
- Suits, G. H. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment*, 2(2):117-125, 1972.
- Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2):127-150, 1979.
- Valeriano, M. M. **Relatório da campanha de medidas radiométricas sobre trigo irrigado no Distrito Federal - Safra 1989.** Convênio INPE/Fundação Banco do Brasil. São José dos Campos, ago. 1990.

- Vanderbilt, V. C.; Grant, L. Light polarization measurements: a method to determine the specular and diffuse light scattering properties of both leaves and plant canopies. **Colloque Internationale Signatures Spectrales d'objects en télédétection**, Bordeaux, 2., 12-16 Sept. 1983.
- Verhoef, W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, 16(2):125-141, 1984.
- Wiegand, C. L.; Richardson, A. J. Spectral component analysis rationale, and results for three crops. **International Journal of Remote Sensing**, 8(7):1011-1032, 1987.



APÊNDICE A

DADOS DE CAMPO

n	P	M	ID	V	MFT	MST	MSf	MSc
1	1	1	13	1	*	8.5	8.5	0.0
2	2	1	13	2	*	7.6	7.6	0.0
3	3	1	13	3	*	9.3	9.3	0.0
4	4	1	13	4	*	4.3	4.3	0.0
5	5	1	13	5	*	3.6	3.6	0.0
6	6	1	13	6	*	4.7	4.7	0.0
7	7	1	13	7	*	9.6	9.6	0.0
8	8	1	13	3	*	9.3	9.3	0.0
9	9	1	13	4	*	4.3	4.3	0.0
10	10	1	13	5	*	3.6	3.6	0.0
11	11	1	13	6	*	4.7	4.7	0.0
12	12	1	13	7	*	9.6	9.6	0.0
13	13	1	13	2	*	7.6	7.6	0.0
14	14	1	13	1	*	8.5	8.5	0.0
15	1	2	21	1	130	30.8	26.5	4.4
16	2	2	21	2	211	33.1	26.6	6.5
17	3	2	21	3	301	39.3	30.8	8.5
18	4	2	21	4	213	28.8	23.8	5.0
19	5	2	21	5	160	20.9	16.8	4.1
20	6	2	21	6	230	31.0	25.6	5.4
21	7	2	21	7	341	43.5	32.7	10.8
22	8	2	21	3	229	32.2	24.6	7.6
23	9	2	21	4	139	20.3	17.4	2.9
24	10	2	21	5	164	23.2	18.2	5.0
25	11	2	21	6	116	17.4	14.4	3.0
26	12	2	21	7	164	24.0	19.2	4.9
27	13	2	21	2	144	16.6	13.7	2.9
28	14	2	21	1	68	10.4	8.7	1.7
29	1	3	30	1	454	72.0	56.0	16.0
30	2	3	30	2	648	74.0	48.0	26.0
31	3	3	30	3	435	70.5	50.5	20.0
32	4	3	30	4	419	83.5	73.5	10.0
33	5	3	30	5	603	80.5	63.0	17.5
34	6	3	30	6	637	94.6	75.6	19.0
35	7	3	30	7	663	86.0	66.5	19.5
36	8	3	30	3	520	89.0	64.0	25.0
37	9	3	30	4	510	73.0	58.5	14.5
38	10	3	30	5	427	56.5	44.0	12.5
39	11	3	30	6	517	84.5	64.5	20.0
40	12	3	30	7	445	62.0	49.0	13.0
41	13	3	30	2	442	67.5	51.0	16.5
42	14	3	30	1	428	67.0	51.0	16.0
43	1	4	35	1	1110	140.0	98.5	41.5
44	2	4	35	2	1205	160.5	108.0	52.5
45	3	4	35	3	1025	120.5	81.0	39.5
46	4	4	35	4	1050	130.0	102.0	28.0
47	5	4	35	5	1080	130.0	94.5	35.5
48	6	4	35	6	995	119.5	87.5	32.0
49	7	4	35	7	1440	161.5	123.0	38.5
50	8	4	35	3	915	129.5	91.5	38.0
51	9	4	35	4	860	104.0	80.5	23.5
52	10	4	35	5	765	93.0	71.5	21.5
53	11	4	35	6	665	139.7	102.2	37.5
54	12	4	35	7	875	112.0	84.0	28.0
55	13	4	35	2	925	113.0	78.0	35.0
56	14	4	35	1	960	123.0	89.5	33.5
57	1	5	50	1	1950	310.8	112.4	167.9
58	2	5	50	2	2175	349.5	107.5	219.0
59	3	5	50	3	2205	324.8	110.0	191.3
60	4	5	50	4	2190	275.2	135.0	120.9
61	5	5	50	5	2260	249.0	107.0	127.0

n	P	M	ID	V	MFT	MST	MSf	MSc
62	6	5	50	6	2530	330.5	147.5	162.0
63	7	5	50	7	2460	305.5	165.0	106.5
64	8	5	50	3	2460	367.7	128.1	225.1
65	9	5	50	4	2485	310.3	144.2	131.5
66	10	5	50	5	2145	295.0	140.5	127.5
67	11	5	50	6	1985	270.5	124.1	137.6
68	12	5	50	7	1825	255.9	128.9	104.8
69	13	5	50	2	3380	447.0	184.0	233.0
70	14	5	50	1	2205	332.0	133.0	170.0
71	1	6	57	1	2090	450.0	120.9	258.6
72	2	6	57	2	2425	547.7	136.8	299.8
73	3	6	57	3	2795	685.4	159.4	395.4
74	4	6	57	4	2390	365.1	155.6	188.2
75	5	6	57	5	3000	548.9	144.0	365.9
76	6	6	57	6	3070	594.7	172.7	383.1
77	7	6	57	7	2910	507.7	270.7	227.8
78	8	6	57	3	1620	431.3	90.2	247.8
79	9	6	57	4	2490	525.7	157.9	312.7
80	10	6	57	5	2355	380.6	132.0	222.7
81	11	6	57	6	1915	339.0	111.9	212.8
82	12	6	57	7	2155	445.6	132.4	263.3
83	13	6	57	2	2955	595.5	155.6	399.9
84	14	6	57	1	1910	381.3	95.9	248.1
85	1	7	62	1	2560	693.2	146.3	419.8
86	2	7	62	2	3040	905.0	160.6	552.1
87	3	7	62	3	2370	629.9	115.1	390.2
88	4	7	62	4	3240	852.8	192.8	542.4
89	5	7	62	5	2870	670.0	120.5	364.9
90	6	7	62	6	3540	732.5	161.2	374.3
91	7	7	62	7	3050	733.3	206.4	337.4
92	8	7	62	3	2190	696.5	107.2	399.3
93	9	7	62	4	2580	539.4	152.3	276.4
94	10	7	62	5	2890	636.8	142.8	348.6
95	11	7	62	6	3580	995.0	178.5	550.3
96	12	7	62	7	2470	560.8	129.3	294.8
97	13	7	62	2	2310	433.1	107.6	267.4
98	14	7	62	1	4380	852.8	187.1	546.6
99	1	8	69	1	4210	1058.2	188.7	644.9
100	2	8	69	2	2020	628.1	107.0	356.3
101	3	8	69	3	2690	922.0	139.6	508.5
102	4	8	69	4	2090	610.2	127.9	287.5
103	5	8	69	5	2660	564.5	128.1	283.4
104	6	8	69	6	2940	752.1	139.3	373.3
105	7	8	69	7	2540	598.3	156.6	262.6
106	8	8	69	3	2410	767.8	110.0	457.6
107	9	8	69	4	3140	917.1	145.3	471.9
108	10	8	69	5	2740	712.3	124.3	388.2
109	11	8	69	6	2670	684.6	107.1	372.7
110	12	8	69	7	3650	860.9	210.9	401.5
111	13	8	69	2	2320	663.9	103.5	428.2
112	14	8	69	1	3370	765.0	146.4	484.5
113	1	9	78	1	2470	461.3	100.7	687.4
114	2	9	78	2	2810	598.6	79.1	825.7
115	3	9	78	3	3300	700.1	126.5	946.4
116	4	9	78	4	3730	590.7	209.8	961.1
117	5	9	78	5	2600	329.3	86.7	632.0
118	4	9	78	6	3500	672.5	107.9	704.7
119	7	9	78	7	3380	460.3	122.2	499.3
120	8	9	78	3	2770	448.5	92.8	552.8
121	9	9	78	4	2720	293.7	55.8	427.2
122	10	9	78	5	3590	450.2	132.7	786.7

n	P	M	ID	V	MFT	MST	MSf	MSc
123	11	9	78	6	2930	478.8	90.5	621.2
124	12	9	78	7	2780	403.1	100.8	630.1
125	13	9	78	2	3060	379.4	80.4	846.3
126	14	9	78	1	3910	410.1	134.9	004.1
127	1	10	83	1	2200	1103.7	69.7	588.0
128	2	10	83	2	3330	1619.0	86.9	777.8
129	3	10	83	3	3050	1600.2	122.8	824.2
130	4	10	83	4	4580	1745.9	146.8	868.4
131	5	10	83	5	2230	1033.7	89.7	560.1
132	6	10	83	6	2990	1224.5	100.3	599.0
133	7	10	83	7	3530	1569.6	174.4	784.8
134	8	10	83	3	2690	1264.0	94.7	553.9
135	9	10	83	4	1410	830.3	76.9	372.6
136	10	10	83	5	1950	665.4	94.5	308.2
137	11	10	83	6	2130	998.0	76.9	486.2
138	12	10	83	7	3150	1236.6	136.4	574.7
139	13	10	83	2	4500	618.5	*	*
140	14	10	83	1	2490	1114.0	82.9	734.7
141	1	11	90	1	2950	735.7	44.7	839.1
142	2	11	90	2	3010	858.5	0.0	550.5
143	3	11	90	3	3260	777.7	61.7	745.1
144	4	11	90	4	1860	385.2	60.7	317.9
145	5	11	90	5	3700	761.1	105.4	1016.4
146	6	11	90	6	3250	843.7	72.0	579.4
147	7	11	90	7	3310	790.8	96.2	928.4
148	8	11	90	3	2930	656.2	75.9	450.6
149	9	11	90	4	3170	679.5	65.0	707.3
150	10	11	90	5	2200	364.6	69.4	336.8
151	11	11	90	6	2790	542.2	101.0	459.6
152	12	11	90	7	2930	723.0	90.8	673.1
153	13	11	90	2	1990	484.9	18.4	417.7
154	14	11	90	1	2910	702.2	24.3	691.8
155	6	12	97	6	2570	1142.0	*	*
156	7	12	97	7	4600	1992.0	*	*
157	8	12	97	3	2250	1079.0	*	*
158	10	12	97	5	2780	1024.0	*	*
159	11	12	97	6	3380	1478.0	*	*
160	12	12	97	7	5400	2536.0	*	*
161	6	13	106	6	2730	1680.0	*	*
162	7	13	106	7	1790	1114.0	*	*
163	8	13	106	3	1900	1303.0	*	*
164	10	13	106	5	2250	1498.0	*	*
165	11	13	106	6	2180	1216.0	*	*
166	12	13	106	7	1670	1163.0	*	*

n - nº da observação

M - missão

V - variedade

MST - matéria seca total

MSc - matéria seca de colmo

P - parcela

ID - idade (dias após plantio)

MFT - matéria fresca total

MSf - matéria seca de folhas

n	MSP	MSe	IAF	IAC	H	H2O
1	0.0	0.0	*	0.00	*	*
2	0.0	0.0	*	0.00	*	*
3	0.0	0.0	*	0.00	*	*
4	0.0	0.0	*	0.00	*	*
5	0.0	0.0	*	0.00	*	*
6	0.0	0.0	*	0.00	*	*
7	0.0	0.0	*	0.00	*	*
8	0.0	0.0	*	0.00	*	*
9	0.0	0.0	*	0.00	*	*
10	0.0	0.0	*	0.00	*	*
11	0.0	0.0	*	0.00	*	*
12	0.0	0.0	*	0.00	*	*
13	0.0	0.0	*	0.00	*	*
14	0.0	0.0	*	0.00	*	*
15	0.0	0.0	0.73	0.00	*	76
16	0.0	0.0	1.06	0.00	*	84
17	0.0	0.0	1.08	0.00	*	87
18	0.0	0.0	1.10	0.00	*	86
19	0.0	0.0	0.73	0.00	*	87
20	0.0	0.0	0.94	0.00	*	87
21	0.0	0.0	1.48	0.00	*	87
22	0.0	0.0	0.94	0.00	*	86
23	0.0	0.0	0.64	0.00	*	85
24	0.0	0.0	1.00	0.00	*	86
25	0.0	0.0	0.72	0.00	*	85
26	0.0	0.0	0.64	0.00	*	85
27	0.0	0.0	0.96	0.00	*	88
28	0.0	0.0	0.36	0.00	*	85
29	0.0	0.0	2.15	0.20	25	84
30	0.0	0.0	3.56	0.23	25	89
31	0.0	0.0	1.72	0.16	20	84
32	0.0	0.0	2.05	0.10	15	80
33	0.0	0.0	3.89	0.23	15	87
34	0.0	0.0	3.63	0.17	20	85
35	0.0	0.0	2.91	0.14	20	87
36	0.0	0.0	3.27	0.15	20	83
37	0.0	0.0	3.56	0.12	15	86
38	0.0	0.0	2.65	0.11	15	87
39	0.0	0.0	3.09	0.12	20	84
40	0.0	0.0	2.17	0.10	20	86
41	0.0	0.0	2.31	0.15	25	85
42	0.0	0.0	2.07	0.10	25	84
43	0.0	0.0	4.74	0.35	30	87
44	0.0	0.0	4.16	0.30	30	87
45	0.0	0.0	3.78	0.32	30	88
46	0.0	0.0	4.73	0.21	20	88
47	0.0	0.0	4.90	0.23	20	88
48	0.0	0.0	4.97	0.22	20	88
49	0.0	0.0	5.80	0.28	20	89
50	0.0	0.0	3.75	0.23	30	86
51	0.0	0.0	4.43	0.23	20	88
52	0.0	0.0	3.88	0.14	20	88
53	0.0	0.0	4.20	0.30	20	79
54	0.0	0.0	3.92	0.19	20	87
55	0.0	0.0	4.13	0.29	30	88
56	0.0	0.0	4.08	0.19	30	87
57	14.5	0.0	4.89	0.81	60	84
58	12.5	0.0	4.61	1.10	80	84
59	13.2	0.0	*	0.96	75	85
60	7.6	0.0	*	0.62	40	87
61	6.5	0.0	*	*	60	89

n	MS <sub>D</sub>	MS <sub>E</sub>	IAF	IAC	H	H2O
62	10.5	0.0	7.34	0.65	45	87
63	19.0	0.0	5.27	0.66	50	88
64	4.1	0.0	*	1.09	65	85
65	13.8	0.0	*	0.56	40	88
66	16.5	0.0	6.64	0.76	45	86
67	1.8	0.0	*	0.56	50	86
68	11.1	0.0	*	0.50	45	86
69	20.0	0.0	10.05	1.24	80	87
70	19.0	0.0	8.98	0.84	70	85
71	23.0	47.5	3.63	1.24	80	78
72	31.4	79.7	3.29	1.99	100	77
73	40.1	90.5	4.99	1.85	100	75
74	21.3	0.0	5.96	0.88	60	85
75	39.0	0.0	6.78	1.54	60	82
76	38.9	0.0	4.95	1.27	60	81
77	59.2	0.0	8.49	0.81	65	83
78	16.4	76.9	2.79	1.05	100	73
79	41.3	13.8	4.98	1.28	65	79
80	25.9	0.0	5.93	1.40	60	84
81	14.3	0.0	3.62	0.80	60	82
82	44.8	5.1	3.10	1.03	65	79
83	40.0	0.0	5.57	1.63	100	80
84	18.4	18.9	3.24	1.11	85	80
85	40.8	86.3	5.13	2.26	110	73
86	56.5	135.8	4.13	2.48	120	70
87	36.6	88.0	3.29	1.50	115	73
88	62.2	100.0	7.02	0.96	75	74
89	67.9	116.7	4.32	1.84	90	77
90	53.8	143.2	5.14	1.78	75	79
91	40.8	140.0	4.69	1.18	80	76
92	42.7	147.3	2.47	1.44	110	68
93	28.4	69.5	4.05	0.98	75	79
94	24.5	120.9	5.16	1.76	90	78
95	55.2	211.0	4.92	1.84	75	72
96	51.0	83.7	3.59	1.00	80	77
97	19.9	38.2	4.43	1.66	120	81
98	28.2	90.9	5.96	2.98	110	81
99	72.4	152.2	6.35	3.14	120	75
100	33.8	131.0	3.43	1.88	110	69
101	74.6	199.3	3.92	2.62	110	66
102	62.1	132.7	2.80	1.57	95	71
103	46.6	106.4	4.63	2.65	95	79
104	50.6	188.9	3.55	1.39	85	74
105	75.4	103.7	4.28	1.51	85	76
106	30.2	170.0	3.29	2.02	115	68
107	74.7	225.2	4.94	2.92	90	71
108	33.7	166.1	4.55	1.80	95	74
109	24.3	180.5	4.04	1.45	85	74
110	75.2	173.3	6.96	2.00	90	76
111	30.3	101.9	3.38	2.19	135	71
112	46.2	87.9	5.72	3.13	120	77
113	58.5	402.8	2.23	*	110	81
114	76.8	521.8	1.49	*	125	79
115	82.5	617.6	2.21	*	95	79
116	167.1	423.6	2.81	*	85	84
117	45.3	284.0	1.90	*	80	87
118	105.5	567.0	1.74	*	75	81
119	88.4	371.9	3.59	*	85	86
120	56.7	391.8	2.18	*	95	84
121	-109.2	184.5	1.87	*	85	89
122	64.0	386.2	3.60	*	80	87

n	MSp	MSe	IAF	IAC	H	H2O
123	66.3	412.5	2.34	*	75	84
124	75.3	327.8	2.39	*	85	86
125	66.2	313.2	1.13	*	125	88
126	55.9	354.2	3.98	*	110	90
127	50.3	395.7	1.57	1.50	110	50
128	88.4	665.9	2.01	2.40	120	51
129	64.5	588.7	2.41	1.76	105	48
130	142.7	588.0	3.92	2.55	95	62
131	52.0	331.9	1.50	1.38	100	54
132	93.8	431.4	2.11	1.66	90	59
133	118.1	492.3	3.23	1.88	95	56
134	54.1	561.3	1.94	2.05	110	53
135	87.5	293.3	1.56	1.25	85	41
136	48.1	214.6	2.50	1.08	100	66
137	47.6	387.3	1.51	1.16	90	53
138	88.4	437.1	2.27	1.87	95	61
139	*	618.5	*	*	130	86
140	45.5	250.9	2.67	1.57	120	55
141	118.8	616.9	0.69	*	*	75
142	218.8	639.7	0.00	*	*	71
143	153.7	624.0	1.38	*	*	76
144	89.7	295.5	1.67	*	*	79
145	96.0	665.1	2.49	*	*	79
146	137.7	706.0	0.84	*	*	74
147	105.1	685.7	1.19	*	*	76
148	102.3	552.9	2.45	*	*	78
149	158.0	521.5	1.37	*	*	79
150	54.4	310.2	2.63	*	*	83
151	63.1	479.1	1.73	*	*	81
152	106.7	616.3	1.71	*	*	75
153	73.8	411.1	0.10	*	*	76
154	126.3	575.9	0.53	*	*	76
155	*	*	*	*	*	56
156	*	*	*	*	*	57
157	*	*	*	*	*	52
158	*	*	*	*	*	63
159	*	*	*	*	*	56
160	*	*	*	*	*	53
161	*	*	*	*	*	38
162	*	*	*	*	*	38
163	*	*	*	*	*	31
164	*	*	*	*	*	33
165	*	*	*	*	*	44
166	*	*	*	*	*	30

n - nº da observação

MSe - matéria seca de espigas

IAC - índice de área de colmos

H<sub>2</sub>O - umidade da planta (%)

MSp - matéria seca de palha

IAF - índice de área foliar

H - altura de planta

n	ESTAGIO	PROD	EST1	EST2	EST3	EST4	EST5
1	1.00	3247	4.6	9.7	15.9	16.2	16.3
2	1.00	2918	4.8	8.4	17.5	17.7	17.7
3	1.00	3270	5.7	10.8	19.4	19.7	19.7
4	1.00	3793	6.1	10.7	18.6	18.8	18.8
5	1.00	4143	5.6	9.9	17.3	17.7	18.0
6	1.00	4419	5.2	9.1	15.8	16.2	16.5
7	1.00	4260	5.4	9.5	17.6	17.8	17.8
8	1.00	3544	4.6	9.7	15.2	15.4	15.3
9	1.00	4520	4.9	9.4	15.7	15.9	15.9
10	1.00	4081	5.9	11.3	19.5	19.9	19.9
11	1.00	4280	5.7	10.4	18.1	18.4	18.5
12	1.00	4417	5.8	10.2	18.3	18.7	18.6
13	-1.00	2844	4.7	7.8	14.6	14.8	14.8
14	1.00	3308	5.8	10.3	18.9	19.4	19.3
15	*	3247	5.1	6.7	22.1	22.0	21.7
16	*	2918	5.6	5.8	24.6	24.6	24.5
17	*	3270	5.6	7.1	24.0	24.1	23.7
18	*	3793	7.4	8.8	26.1	26.1	25.8
19	*	4143	5.9	7.0	22.7	22.8	22.7
20	*	4419	5.7	7.2	20.6	20.7	20.7
21	*	4260	6.1	6.9	24.9	24.8	24.2
22	*	3544	5.5	8.7	21.0	20.9	20.4
23	*	4520	7.3	9.3	26.3	26.3	25.4
24	*	4081	6.0	8.3	22.1	22.1	21.9
25	*	4280	5.7	7.6	22.3	22.4	21.9
26	*	4417	6.2	8.0	23.3	23.3	22.6
27	*	2844	6.3	8.2	22.8	22.8	22.2
28	*	3308	6.2	8.7	22.3	22.5	22.5
29	6.00	3247	5.8	2.5	41.4	41.3	40.3
30	6.00	2918	6.4	2.2	41.7	41.2	39.7
31	5.00	3270	6.1	2.4	40.0	39.7	38.5
32	3.00	3793	7.9	3.1	45.2	44.9	44.0
33	5.00	4143	6.9	2.4	39.5	38.9	38.0
34	5.00	4419	5.3	2.3	36.3	36.3	35.6
35	5.00	4260	6.0	2.2	42.2	41.9	40.9
36	5.00	3544	5.7	3.1	33.5	33.1	32.2
37	3.00	4520	7.6	3.1	40.5	40.0	39.5
38	5.00	4081	7.0	2.8	38.3	38.2	37.9
39	5.00	4280	5.6	3.0	33.7	33.6	32.9
40	5.00	4417	5.9	2.4	39.4	39.3	38.8
41	6.00	2844	6.2	2.4	35.9	35.8	34.7
42	6.00	3308	6.0	2.6	35.9	35.8	35.1
43	7.00	3247	5.8	2.4	45.7	45.7	44.6
44	7.00	2918	6.8	2.2	53.1	52.5	51.0
45	7.00	3270	6.1	2.2	49.4	49.2	48.1
46	4.00	3793	7.6	2.5	51.5	51.4	46.1
47	6.00	4143	6.5	2.2	47.8	47.5	46.1
48	6.00	4419	5.1	1.8	42.2	41.8	40.9
49	6.00	4260	5.9	2.0	50.7	50.4	49.5
50	7.00	3544	5.8	2.4	42.2	41.7	40.2
51	4.00	4520	7.1	2.7	42.9	42.1	40.3
52	6.00	4081	7.0	2.5	42.6	42.0	40.2
53	6.00	4280	4.9	1.9	39.8	39.9	39.0
54	6.00	4417	5.4	1.9	42.8	42.5	41.1
55	7.00	2844	6.0	2.1	48.4	48.1	46.7
56	7.00	3308	6.2	2.4	41.3	41.1	40.0
57	10.00	3247	5.8	2.3	54.9	55.3	53.7
58	10.00	2918	4.6	1.7	51.3	51.6	50.0
59	10.20	3270	4.5	1.7	45.8	46.3	45.6
60	8.00	3793	6.0	2.0	53.9	54.2	53.1
61	9.00	4143	6.2	2.3	52.1	52.2	51.2

n	ESTAGIO	PROD	EST1	EST2	EST3	EST4	EST5
62	9.00	4419	4.6	1.8	41.8	42.0	40.8
63	8.00	4260	4.6	1.6	53.9	54.3	53.0
64	10.20	3544	4.6	1.8	44.2	44.4	43.2
65	8.00	4520	6.6	2.3	55.8	55.7	54.2
66	9.00	4081	6.7	2.3	53.8	53.8	52.3
67	9.00	4280	5.0	1.9	49.0	49.4	48.1
68	8.00	4417	4.8	1.6	52.9	53.4	52.7
69	10.00	2844	5.6	1.9	51.8	51.9	50.5
70	10.00	3308	6.1	2.2	48.7	48.8	47.9
71	10.30	3247	4.8	2.2	48.1	49.0	47.8
72	10.30	2918	4.0	1.6	44.2	45.2	44.6
73	10.30	3270	4.1	1.8	41.7	42.8	41.9
74	10.00	3793	5.5	2.0	50.9	51.9	50.2
75	10.10	4143	6.3	2.6	50.1	50.7	49.7
76	10.10	4419	4.9	2.0	48.3	49.1	48.4
77	10.00	4260	3.9	1.4	46.6	47.5	46.2
78	10.30	3544	3.9	1.6	40.7	41.3	40.7
79	10.10	4520	5.1	1.9	41.9	42.0	40.5
80	10.10	4081	6.1	2.6	45.1	45.2	43.3
81	10.10	4280	4.8	2.0	44.9	45.8	45.0
82	10.00	4417	4.1	1.6	49.2	50.0	48.9
83	10.10	2844	4.7	1.8	50.1	50.8	49.1
84	10.10	3308	5.7	2.4	48.0	48.7	47.0
85	10.40	3247	4.4	2.1	42.2	43.3	42.4
86	10.51	2918	4.7	2.1	45.0	46.1	45.4
87	10.40	3270	4.2	1.9	38.0	39.0	38.4
88	10.50	3793	5.2	2.0	45.2	45.8	44.5
89	10.50	4143	4.9	2.0	44.8	45.7	44.9
90	10.50	4419	4.9	2.0	42.8	43.5	42.5
91	10.20	4260	3.7	1.5	45.5	46.8	45.9
92	10.50	3544	3.6	1.7	37.5	38.6	38.2
93	10.50	4520	5.3	2.0	44.6	45.2	44.2
94	10.50	4081	5.5	2.2	43.1	43.8	42.7
95	10.50	4280	4.3	1.8	43.3	44.4	43.8
96	10.40	4417	4.1	1.6	49.2	50.4	50.1
97	10.50	2844	4.2	1.6	44.9	45.8	44.4
98	10.50	3308	4.9	2.0	43.3	44.1	43.1
99	*	3247	4.6	2.2	45.3	46.3	45.2
100	*	2918	3.2	1.6	40.8	42.1	41.8
101	*	3270	3.8	1.8	39.0	40.2	39.6
102	*	3793	5.0	2.0	44.8	45.8	45.2
103	*	4143	4.2	1.8	42.4	43.4	42.6
104	*	4419	4.3	1.9	43.2	44.5	43.8
105	*	4260	3.5	1.5	44.1	45.8	45.4
106	*	3544	3.4	1.5	37.2	38.1	37.5
107	*	4520	5.5	2.2	47.8	49.2	47.9
108	*	4081	5.2	2.1	44.7	45.4	43.6
109	*	4280	4.0	1.8	43.5	44.6	44.0
110	*	4417	3.8	1.6	43.1	44.4	43.5
111	*	2844	3.0	1.2	39.8	40.8	40.3
112	*	3308	4.3	1.9	40.3	40.8	40.2
113	10.54	3247	4.8	2.4	37.9	38.5	37.8
114	10.54	2918	4.8	3.0	32.0	32.8	32.8
115	10.54	3270	4.8	2.5	31.4	32.3	32.6
116	10.54	3793	4.6	2.1	36.0	36.9	36.9
117	10.54	4143	4.5	2.1	41.7	42.7	42.7
118	10.54	4419	4.0	2.2	30.5	31.5	31.4
119	10.54	4260	3.7	1.8	36.0	37.0	36.9
120	10.54	3544	4.6	2.2	34.1	34.7	33.6
121	10.54	4520	4.0	1.7	34.4	35.1	34.8
122	10.54	4081	4.2	2.1	34.3	35.1	34.5

n	ESTAGIO	PROD	EST1	EST2	EST3	EST4	EST5
123	10.54	4280	4.1	2.0	34.0	35.0	34.8
124	10.54	4417	3.5	1.6	34.6	35.5	35.3
125	10.54	2844	7.7	3.6	48.2	48.8	47.2
126	10.54	3308	3.8	1.6	30.8	31.3	31.2
127	11.10	3247	4.5	2.7	31.6	32.5	32.7
128	11.10	2918	8.2	4.7	47.5	48.9	49.1
129	11.10	3270	6.4	4.1	37.6	38.9	39.1
130	11.10	3793	5.3	3.0	30.9	31.7	32.0
131	11.10	4143	3.6	1.7	37.1	38.3	38.4
132	11.10	4419	4.2	2.7	27.1	28.0	28.3
133	11.10	4260	4.0	2.2	33.3	34.5	34.7
134	11.10	3544	4.9	3.1	31.3	32.3	31.8
135	11.10	4520	4.6	2.4	29.0	29.9	30.0
136	11.10	4081	4.4	2.6	31.2	32.1	32.0
137	11.10	4280	4.3	2.3	29.6	30.6	31.0
138	11.10	4417	4.1	2.0	35.4	36.6	36.5
139	11.10	2844	8.5	4.3	51.9	52.9	52.3
140	11.10	3308	3.8	1.9	32.9	33.9	34.0
141	11.20	3247	9.3	7.2	33.8	34.6	34.6
142	11.20	2918	12.3	9.7	41.5	52.5	42.8
143	11.20	3270	10.5	8.4	35.4	36.5	36.6
144	11.20	3793	7.2	5.4	28.3	29.1	29.1
145	11.20	4143	7.2	4.4	38.2	39.3	39.7
146	11.20	4419	5.4	4.0	26.4	27.4	27.4
147	11.20	4260	4.6	3.0	27.9	28.9	29.3
148	11.20	3544	8.4	6.7	30.9	31.6	31.4
149	11.20	4520	6.0	4.1	27.2	27.8	27.7
150	11.20	4081	5.8	4.4	27.8	28.6	28.7
151	11.20	4280	5.2	3.7	27.8	28.8	28.8
152	11.20	4417	4.7	2.5	33.9	34.8	34.8
153	11.20	2844	10.2	6.1	44.9	45.8	45.8
154	11.20	3308	9.7	6.1	44.0	45.1	44.9
155	11.30	4419	5.5	6.2	21.5	22.4	23.4
156	11.30	4260	8.6	7.2	32.5	33.3	33.6
157	11.30	3544	9.3	14.8	27.1	28.3	29.4
158	11.30	4081	10.2	14.4	33.9	35.3	36.6
159	11.30	4280	5.5	7.9	18.2	19.1	19.9
160	11.30	4417	6.8	4.7	29.4	30.2	29.8
161	11.40	4419	8.0	12.8	18.5	19.5	20.7
162	11.40	4260	11.0	15.8	23.3	24.6	26.0
163	11.40	3544	10.7	15.3	23.2	24.1	25.2
164	11.40	4081	8.2	13.9	20.2	21.4	22.9
165	11.40	4280	9.6	16.7	24.1	25.4	27.3
166	11.40	4417	9.0	14.6	19.8	20.9	22.1

n - nº da observação  
 PROD - produtividade

ESTAGIO - estágio  
 EST - reflectância espectral

APÊNDICE B

ANÁLISE DE DUNCAN PARA CULTIVARES

Resultados da análise de Duncan a 10% de significância:

Missão 2 - RG (EST1)

grupo/Média	cultivar
a 7,35	Anahuac
b 6,15	BR-10
b 5,95	Candeias
b 5,95	BH-1146
b 5,70	BR-12
b 5,65	BR-24
b 5,55	BR-16

Missão 4 - RR (EST2)

grupo/Média	cultivar
a 2,60	Anahuac
b a 2,40	BR-24
b c 2,35	Candeias
b c 2,30	BR-16
d c 2,15	BH-1146
d e 1,95	BR-10
e 1,85	BR-12

Missão 3 - RG (EST1)

grupo/Média	cultivar
a 7,75	Anahuac
b 6,95	Candeias
c 6,30	BH-1146
d c 5,95	BR-10
d 5,90	BR-24
d 5,90	BR-16
e 5,45	BR-12

Missão 4 - RNIR (EST4)

grupo/Média	cultivar
a 50,30	BH-1146
b 46,75	Anahuac
b 46,45	BR-10
b 45,45	BR-16
b 44,75	Candeias
c b 43,40	BR-24
c 40,85	BR-12

Missão 3 - RNIR (EST4)

grupo/Média	cultivar
a 42,45	Anahuac
b a 40,60	BR-10
b c 38,55	BR-24
b c 38,55	Candeias
b c 38,50	BH-1146
d c 36,40	BR-16
d 34,95	BR-12

Missão 6 - RG (EST1)

grupo/Média	cultivar
a 6,20	Candeias
b 5,30	Anahuac
b 5,25	BR-24
c b 4,85	BR-12
c d 4,35	BH-1146
d 4,00	BR-16
d 4,00	BR-10

## Missão 4 - RG (EST1)

grupo/Média		cultivar
a	7,35	Anahuac
b a	6,75	Candeias
b c	6,40	BH-1146
b c	6,00	BR-24
b c	5,95	BR-16
d c	5,60	BR-10
d	5,00	BR-12

## Missão 6 - RR (EST2)

grupo/Média		cultivar
a	2,60	Candeias
b	2,30	BR-24
c	2,00	BR-12
c	1,95	Anahuac
d	1,70	BR-16
d	1,70	BH-1146
d	1,50	BR-10

Obs. médias com mesma letra não diferem significativamente a 10% de probabilidade. Médias de duas repetições (n=2). Resultados da análise de Duncan a 10% de significância:

## Missão 7 - RNIR (EST4)

grupo/Média		cultivar
a	48,60	BR-10
b	45,95	BH-1146
b	45,50	Anahuac
b	44,75	Candeias
b	43,95	BR-12
b	43,70	BR-24
c	38,80	BR-16

## Missão 10 - RG (EST1)

grupo/Média		cultivar
a	8,20	BH-1146
b	5,65	BR-16B
c b	4,95	Anahuac
c b	4,25	BR-12
c b	4,15	BR-24
c b	4,05	BR-10
c	4,00	Candeias

## Missão 8 - H2O

grupo/Média		cultivar
a	76,00	Candeias
a	76,00	BR-10
a	75,50	BR-24
a	74,00	BR-12
b	70,00	Anahuac
b	69,50	BH-1146
b	66,50	BR-16

## Missão 11 - IAF

grupo/Média		cultivar
a	2,56	Candeias
b a	1,92	BR-16
b	1,52	Anahuac
b	1,45	BR-10
b c	1,29	BR-12
d c	0,61	BR-24
d	0,14	BH-1146

Missão 8 - RG (EST1)  
grupo/Média cultivar

a	5,25	Anahuac
a	4,70	Candeias
a	4,45	BR-24
a	4,15	BR-12
b	3,65	BR-10
b	3,60	BR-16
b	3,10	BH-1146

Missão 11 - RG (EST1)  
grupo/Média cultivar

a	11,25	BH-1146
b	9,50	BR-24
b	9,45	BR-16
c	6,60	Anahuac
c	6,50	Candeias
d c	5,30	BR-12
d	4,65	BR-10

Missão 9 - RR (EST2)  
grupo/Média cultivar

a	3,30	BH-1146
b	2,35	BR-16
c b	2,10	Candeia
c b	2,10	BR-12
c b	2,00	BR-24
c b	1,90	Anahuac
c	1,70	BR-10

Missão 2 - RR (EST2)  
grupo/Média cultivar

a	7,90	BH-1146
a	7,55	BR-16
a	6,65	BR-24
b	4,75	Anahuac
c b	4,40	Candeias
c b	3,85	BR-12
c	2,75	BR-10

Obs. médias com mesma letra não diferem significativamente a 10% de probabilidade. Médias de duas repetições (n=2).

APÊNDICE C

COMPRIMENTOS DE ONDA DO RADIÔMETRO

Comprimentos de onda (lmbd) da saída do radiômetro (em nm)

num lmbd	num lmbd	num lmbd	num lmbd	num lmbd
1 368,4	52 505,6	103 652,5	154 804,3	205 965,8
2 371,0	53 508,4	104 655,5	155 807,4	206 968,9
3 373,6	54 511,2	105 658,4	156 810,4	207 972,1
4 376,2	55 514,0	106 661,4	157 813,6	208 975,2
5 378,8	56 516,8	107 664,3	158 816,8	209 978,4
6 381,4	57 519,6	108 667,2	159 820,1	210 981,5
7 384,0	58 522,4	109 670,2	160 823,3	211 984,7
8 386,6	59 525,2	110 673,1	161 826,5	212 987,8
9 389,2	60 527,9	111 676,0	162 829,7	213 991,0
10 391,7	61 530,7	112 679,0	163 832,9	214 994,1
11 394,3	62 533,5	113 681,9	164 836,1	215 997,3
12 396,9	63 536,3	114 684,9	165 839,3	216 1000,4
13 399,5	64 539,1	115 687,8	166 842,5	217 1003,6
14 402,1	65 541,9	116 690,7	167 845,7	218 1006,7
15 404,7	66 544,7	117 693,7	168 848,8	219 1009,9
16 407,3	67 547,5	118 696,6	169 852,0	220 1013,0
17 409,9	68 550,4	119 699,6	170 855,2	221 1016,2
18 412,5	69 553,3	120 702,5	171 858,4	222 1019,3
19 415,1	70 556,1	121 705,5	172 861,5	223 1022,4
20 417,7	71 559,0	122 708,5	173 864,7	224 1025,6
21 420,3	72 561,9	123 711,5	174 867,9	225 1028,7
22 422,8	73 564,8	124 714,4	175 871,1	226 1031,9
23 425,4	74 567,6	125 717,4	176 874,2	227 1035,0
24 428,0	75 570,5	126 720,4	177 877,4	228 1038,2
24 430,6	76 573,4	127 723,4	178 880,6	229 1041,3
26 433,2	77 576,2	128 726,3	179 883,7	230 1044,5
27 435,8	78 579,1	129 729,3	180 886,9	231 1047,6
28 438,6	79 582,0	130 732,3	181 890,1	232 1050,8
29 441,4	80 585,0	131 735,3	182 893,3	233 1053,9
30 444,2	81 587,9	132 738,2	183 896,4	234 1057,1
31 447,0	82 590,9	133 741,2	184 899,6	235 1060,2
32 449,8	83 593,8	134 744,2	185 902,8	236 1063,4
33 452,6	84 596,7	135 747,1	186 906,0	237 1066,5
34 455,3	85 599,7	136 750,1	187 909,1	238 1069,7
35 458,1	86 602,6	137 753,1	188 912,3	239 1072,8
36 460,9	87 605,5	138 756,1	189 915,4	240 1075,9
37 463,7	88 608,5	139 759,0	190 918,6	241 1079,1
38 466,5	89 611,4	140 762,0	191 921,7	242 1082,2
39 469,3	90 614,4	141 765,0	192 924,9	243 1085,4
40 472,1	91 617,3	142 768,0	193 928,0	244 1088,5
41 474,9	92 620,2	143 771,1	194 931,2	245 1091,7
42 477,7	93 623,2	144 774,1	195 934,3	246 1094,8
43 480,5	94 626,1	145 777,1	196 937,5	247 1098,0
44 483,3	95 629,0	146 780,1	197 940,6	248 1101,1
45 486,1	96 632,0	147 783,2	198 943,8	249 1104,3
46 488,9	97 634,9	148 786,2	199 946,9	250 1107,4
47 491,6	98 637,9	149 789,2	200 950,1	251 1110,6
48 494,4	99 640,8	150 792,2	201 953,8	252 1113,7
49 497,2	100 643,7	151 795,3	202 956,4	- -
50 500,0	101 646,7	152 798,3	203 959,5	- -
51 502,8	102 649,6	153 801,3	204 962,7	- -

APÊNDICE D

PROGRAMA PARA O MODELO SAIL



```

C      REAL F
C      FOR EACH CANOPY LAYER ( FIRST SUBSCRIPT )
C      FOR EACH CANOPY COMPONENT ( THIRD SUBSCRIPT)
C      FRACTION OF LEAVES IN GIVEN LAYER WITH LEAF INCLINATION
C      ANGLE LI(1:13 -- SECOND SUBSCRIPT) -- DEFINES LIDF
C      REAL LAI
C      LEAF AREA INDEX FOR EACH COMPONENT IN EACH LAYER
C      REAL LI
C      13 LEAF INCLINATION DISTRIBUTION FUNCTION ANGLES ( DEGREES)
C      REAL REFL(10.5)
C      LEAF REFLECTANCE FOR EACH COMPONENT AT NLAM INPUT LAMBDA
C      REAL PCLAI(5.5) , LAITOT , RESULT(10)
C      PERCENT OF THE TOTAL LAI FOR EACH COMPONENT IN EACH LAYER
C      THE TOTAL LAI FOR THE SCENE OF INTEREST
C      & RESULTING CALCULATED REFLECTANCES AT <= 10 LAMBDA
C      REAL TRM(10.5)
C      LEAF TRANSMITTANCE FOR EACH COMPONENT AT NLAM INPUT LAMBDA
C      REAL RSOIL(10)
C      SOIL REFLECTANCE AT NLAM INPUT LAMBDA
C      REAL LAMBDA(10)
C      NLAM WAVELENGTH VALUES IN NM
C      REAL SKYFRA(10.5)
C      INTERPOLATED FRACTION OF SKY IRRADIANCE AT 12 LAMBDA
C      FOR EACH VIEW-SUN ANGLE COMBINATION (<=1)
C      REAL PSIA(5) , TTOA(5) , TTSA(5)
C      RELATIVE AZIMUTHS , VIEW AND SOLAR ZENITHS OF INTEREST ( DEG)
C      CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C      INTEGER NLAI , NCOMP , NLAM , NTT
C      REAL F , LAI , LI , REFL(10.5) , PCLAI(5.5) , LAITOT ,
1      RESULT(10) , TRM(10.5) ,
1      RSOIL(10) , LAMBDA(10) , SKYFRA(10.5) , PSIA(5) , TTOA(5) , TTSA(5)
C      COMMON/SAILIN/LAI(5.5) , LI(13) , F(5,13,5) , ROO(5) , TAU(5) , ROOS , EMO ,
1      ESO , TTS , TTO , PSI
C      COMMON/SAILOT/R
C      UNITS:
C      OUTPUT
C      6 -- READ ECHO
C      UNIT 7
C      NLAM          ( I2)
C      LAMBDA(1)    ( F4.0)

```



```

C READ IN AND PRINT OUT THE LAMBDA S
C
  READ (7,1010) NLAM
1010 FORMAT(I2)
  DO 10 I=1,NLAM
    READ (7,1020) LAMBDA(I)
1020   FORMAT(F4.0)
  10 CONTINUE
  WRITE(6,5010) NLAM,(LAMBDA(I),I=1,NLAM)
5010 FORMAT(I2,' WAVELENGTHS (NM) ARE: ',10F6.1, '//)
C
C READ IN NUMBER OF LAYERS AND COMPONENTS AND THE LAI DATA
C
  READ(7,1030,END=70) NLAI,NCOMP,LAITOT
1030 FORMAT(I2,1X,I2,1X,F5.2)
  WRITE(6,5020) LAITOT,NLAI,NCOMP
5020 FORMAT(' TOTAL LAI=',F7.2,5X,' NO. OF LAYERS=',I1,5X,
1      ' NO. OF COMPONENTS=',I1)
  DO 20 IL=1,NLAI
    READ (7,1040,END=70) (PCLAI(IL,I),I=1,NCOMP)
1040   FORMAT(5(1X,F5.2))
    WRITE (6,5030) IL,NCOMP,(PCLAI(IL,I),I=1,NCOMP)
5030   FORMAT(' % LAI IN LAYER ',I1,' FOR COMP. 1 TO ',
1      I1,' ARE: ',5F8.2)
    DO 25 IC=1,NCOMP
      LAI(IL,IC) = LAITOT*PCLAI(IL,IC)/100.
      WRITE(6,5040) IL,IC,LAI(IL,IC)
5040   FORMAT(' LAI IN LAYER ',I1,' FOR COMPONENT ',I1,' IS: ',
1      5F8.2)
    25 CONTINUE
  20 CONTINUE
C
C READ IN THE NUMBER OF TTS VALUES AND THEN READ IN THE VALUES
C
  READ (7,1050) NTT
1050 FORMAT(I2)
  DO 30 IP=1,NTT
    READ(7,1060) PSIA(IP),TTSA(IP),TTOA(IP)
1060   FORMAT(3F6.2)
  30 CONTINUE
  WRITE(6,5050)
5050 FORMAT('/// REL. AZ. ',6X,' SOLAR ZENITH ',3X,' VIEW ZENITH ')
  DO 35 IP=1,NTT
    WRITE(6,5055) PSIA(IP),TTSA(IP),TTOA(IP)
5055   FORMAT(2X,F7.1,10X,F7.1,8X,F7.1)
  35 CONTINUE
C

```

```

C          FOR EACH WAVELENGTH INTERVAL READ IN THE LEAF
C          REFLECTANCE AND TRANSMITTANCE
C
C          DO 40 J=1, NCOMP
C          READ(7,1070,END=70) (REFL(I,J), I=1, NLAM)
C          READ(7,1070,END=70) (TRM(I,J), I=1, NLAM)
1070      FORMAT(12F6.2)
C          DO 45 I=1, NLAM
C          IF( (REFL(I,J)+TRM(I,J)).GE.100.) TRM(I,J) = 99.5-REFL(I,J)
45      CONTINUE
40      CONTINUE
C          WRITE(6,5060)
5060      FORMAT(////, ' COMPONENT', ' LAMBDA', ' REFLECTANCE',
1          ' TRANSMITTANCE')
C          DO 46 J=1, NCOMP
C          WRITE(6,5064)
5064      FORMAT(/)
C          DO 47 K=1, NLAM
C          WRITE(6,5065) J, LAMBDA(K), REFL(K,J), TRM(K,J)
5065      FORMAT(5X, I1, 7X, F4.0, 6X, F6.2, 9X, F6.2)
47      CONTINUE
46      CONTINUE
C
C          READ IN THE 13 LEAF INCLINATION ANGLES (LI) AND THE
C          CORRESPONDING FRAC. OF LEAVES (F) OF EACH COMPONENT IN
C          EACH LAYER INCLINED AT EACH ANGLE
C
C          READ(7,1080,END=70) (LI(I), I=1, 13)
1080      FORMAT(13F6.2)
C          WRITE(6,5554)
5554      FORMAT(' LIDF ANGLES')
C          WRITE(6,5555) (LI(I), I=1, 13)
5555      FORMAT(12X, 13F6.2)
C          WRITE(6,5550)
5550      FORMAT(' FRACTION')
C          DO 50 J=1, NLAI
C          DO 55 K=1, NCOMP
C          READ(7,1090,END=70) (F(J,I,K), I=1, 13)
1090      FORMAT(13F6.2)
C          WRITE(6,5556) (F(J,I,K), I=1, 13)
5556      FORMAT(12X, 13(1X, F5.3))
55      CONTINUE
50      CONTINUE
C

```





```

C REFERENCES
C
C N. J. J. BUNNIK. THE MULTISPECTRAL REFLECTANCE OF SHORTWAVE RADIATION
C RADIATION BY AGRICULTURAL CROPS IN RELATION WITH THEIR
C MORPHOLOGICAL AND OPTICAL PROPERTIES. DEPT. OF THEORETICAL
C PRODUCTION ECOLOGY, AGRIC. UNIV., WAGENINGEN, THE NETHERLANDS.
C MEDEDELINGEN LANDBOUW-HOGESCHOOL, 78-1, (1978) 175 PP.
C
C N. J. J. BUNNIK, W. VERHOF. THE SPECTRAL DIRECTIONAL REFLECTANCE OF
C AGRICULTURAL CROPS. NIWARS PUBLIC. NO. 23, OCT. 1974
C
C CHANCE AND CANTU. A STUDY OF PLANT CANOPY REFLECTANCE MODELS.
C UNPUBLISHED PAPER FROM PAN AMERICAN UNIVERSITY, 1975.
C
C PURPOSE
C CALCULATES CANOPY REFLECTANCE USING MODIFIED SUITS MODEL
C
C EXCEPTIONS
C PROGRAM WILL END WITHOUT CALCULATING ANY REFLECTANCES IF THE
C 3 EIGENVALUES (M, -M, AND KS) ARE NOT UNIQUE
C
C PARAMETERS
C REAL F(I,J,K) - PERCENT OF CANOPY AT EACH LEAF INCLINATION ANGLE
C EACH LAYER OF THE CANOPY, I, AND FOR EACH
C COMPONENT, J, IN EACH LAYER, K.
C REAL ROO(K) - RHO LEAF REFLECTANCE FOR EACH CANOPY COMPONENT
C REAL TAU(K) - TRANSMITTANCE FOR EACH CANOPY COMPONENT
C REAL ROOS - RHO SOIL REFLECTANCE
C REAL EMO - FRACTION OF SKY IRRADIANCE
C REAL ESO - 1-EMO
C REAL TTS - SUN ZENITH ANGLE
C REAL PSI - RELATIVE AZIMUTH ANGLE BETWEEN SUN AND LEAF
C REAL TTO - VIEW ZENITH ANGLE
C
C EXTERNAL REFERENCES
C MMULT FORTRAN
C
C PARAMETERS
C INTEGER N,NC
C N = NUMBER OF LAYERS, NC = NUMBER OF COMPONENTS IN EACH LAYER
C
C LOCAL DECLARATIONS
C REAL RTP(5)
C AVERAGE OF ROO AND TAU -- USED IN CALCULATIONS
C REAL KS(5,5)
C FOR EACH LAYER
C EXTINCTION COEFFICIENT FOR RADIANCE FROM SUN ALSO
C EIGENVALUE TO MATRIX SOLUTION FOR FLUX VECTOR

```



```

REAL RTP(5), KS(5,5), KO(5,5), KSI, KOI, TKS(5), TKO(5), M(5),
1  MT(3,3,6), MI(3,3), MB(3,3), INTEGR, ATT(5), SIG(5), SB, SF,
2  UB(5), UF(5), W(5), G(5,5), SINTL(13), COSTL(13), COS2TL(13),
3  BTS(13), BTO(13), WH(13,5), WV(13,5), EPM, EMM, ESM, PILI,
4  PILS, SPILI, PROBLO, R, A, B, C, XI1(5), XI2(5)
C
REAL LAI, LI
COMMON/SAILIN/LAI(5,5), LI(13), F(5,13,5), ROO(5), TAU(5), ROOS,
1  EMO, ESO, TTS, TTO, PSI
CCCCCCCCCCCCCCCC
C
COMMON/SAILOT/R
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
FUNCTIONS C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
RAD(X) = X*ATAN(1.)/45.
INTEGR(X) = (1.-EXP(-X))/X
FROO(X,Y,Z) = X - ROOS*(Y+Z)
C
C GET COMMON VARIABLES IN CORRECT FORM
C
PI = RAD(180.)
PSIR = RAD(PSI)
COSPSI = COS(PSIR)
TANTS = TAN(RAD(TTS))
TANTO = TAN(RAD(TTO))
DO 5 IC=1,NC
RTP(IC) = (ROO(IC)+TAU(IC))/2.
5 CONTINUE
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C CALCULATIONS DONE FOR 13 LEAF INCLINATION ANGLES C
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
DO 100 IL=1,13
TTL = LI(IL)
TTLR = RAD(TTL)
SINTL(IL) = SIN(TTLR)
COSTL(IL) = COS(TTLR)
SIN2TL = SINTL(IL)**2
COS2TL(IL) = COSTL(IL)**2
C
C

```

```

C   EXCLUDE THE AZIMUTH AND ZENITH ANGLES FOR WHICH REFLECTANCE
C   AND/OR DETECTION IS NOT PHYSICALLY POSSIBLE
C
      BTS(IL) = PI
      BTO(IL) = PI
      IF (TTL.LT.90.) GO TO 10
      BTS(IL) = PI/2.
      BTO(IL) = PI/2.
      GO TO 20
10   IF (TTL+TTS.GT.90.) BTS(IL)=ACOS(-COSTL(IL)/(SINTL(IL)*TANTS))
      IF (TTL+TTO.GT.90.) BTO(IL)=ACOS(-COSTL(IL)/(SINTL(IL)*TANTO))
20   BTI1 = ABS(BTS(IL)-BTO(IL))
      BTI2 = 2.*PI-BTS(IL)-BTO(IL)
      IF (PSIR.GE.BTI1) GO TO 30
      BT1 = PSIR
      BT2 = BTI1
      BT3 = BTI2
      GO TO 50
30   BT1 = BTI1
      IF (PSIR.GE.BTI2) GO TO 40
      BT2 = PSIR
      BT3 = BTI2
      GO TO 50
40   BT2 = BTI2
      BT3 = PSIR

C   CALCULATE SUMS AND FUNCTIONS USED IN EQUATION FOR REFLECTANCE
C
50   CONTINUE
      DO 55 IC=1,NC
      T1 = PI*ROO(IC)-BT2*RTP(IC)*2.
      T2 = 2.*RTP(IC)*SIN(BT2)
      S = SIN2TL*TANTS*TANTO
      REALBS = BTS(IL)
      CBS = COS(REALBS)
      CBO = COS(BTO(IL))
      Y = CBS*CBO
      WH(IL,IC) = 2.*T1*COS2TL(IL)
      WV2 = 2.*T2*S
      IF (TTL.NE.90.) WV2 = 2.*T2*COS2TL(IL)/Y
      WV1 = (T1*COSPSI+T2*COS(BT1)*COS(BT3))*S
      WV(IL,IC) = WV1+WV2
55   CONTINUE
100  CONTINUE
C
C

```

```

C      INITIALIZE SUMS OVER LEAF INCLINATION ANGLES
C
C      DO 110 I=1,N
CCCCCCCCCCCCCCCC
C      DO 111 J=1,NC
C      CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
          KS(I,J) = 0.
          KO(I,J) = 0.
          G(I,J) = 0.
111      CONTINUE
110      CONTINUE
C
          MT(1,1,1) = 1.
          MT(2,2,1) = 1.
          MT(3,3,1) = 1.
          MT(1,2,1) = 0.
          MT(1,3,1) = 0.
          MT(2,1,1) = 0.
          MT(2,3,1) = 0.
          MT(3,1,1) = 0.
          MT(3,2,1) = 0.
C
C      CALCULATE W, KS, KO, AND G
C
C      DO 120 LAY=1,N
          DO 130 IL=1,13
1          KSI = (2./PI)*((BTS(IL)-PI/2.)*COSTL(IL)+SIN(BTS(IL))*TANTS>
              SINTL(IL))
1          KOI = (2./PI)*((BTO(IL)-PI/2.)*COSTL(IL)+SIN(BTO(IL))*TANTO>
              SINTL(IL))
          DO 135 IC=1,NC
1          W(LAY) = W(LAY)+(WH(IL,IC)+WV(IL,IC))*LAI(LAY,IC)*
              F(LAY,IL,IC)/(2.*PI)
              KS(LAY,IC) = KS(LAY,IC)+KSI*LAI(LAY,IC)*F(LAY,IL,IC)
              KO(LAY,IC) = KO(LAY,IC)+KOI*LAI(LAY,IC)*F(LAY,IL,IC)
              G(LAY,IC) = G(LAY,IC)+F(LAY,IL,IC)*COS2TL(IL)
135      CONTINUE
130      CONTINUE
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C      CALCULATE A. T. SIG. SB. SF. UB. UF. M. XI1. AND XI2
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C

```

```

SIG(LAY) = 0.
ATT(LAY) = 0.
UB(LAY) = 0.
UF(LAY) = 0.
SB = 0.
SF = 0.
TKS(LAY) = 0.
TKO(LAY) = 0.
DO 140 IC=1,NC
  BF = (ROO(IC)-TAU(IC))/2.*LAI(LAY,IC)*G(LAY,IC)
  ATT(LAY) = ATT(LAY)+(1.-RTP(IC))*LAI(LAY,IC)+BF
  SIG(LAY) = SIG(LAY)+RTP(IC)*LAI(LAY,IC)+BF
  SB = SB+KS(LAY,IC)*RTP(IC)+BF
  SF = SF+KS(LAY,IC)*RTP(IC)-BF
  UB(LAY) = UB(LAY)+KO(LAY,IC)*RTP(IC)+BF
  UF(LAY) = UF(LAY)+KO(LAY,IC)*RTP(IC)-BF
  TKS(LAY) = TKS(LAY) + KS(LAY,IC)
  TKO(LAY) = TKO(LAY) + KO(LAY,IC)
140 CONTINUE
M(LAY) = SQRT(ATT(LAY)**2 - SIG(LAY)**2)
IF (M(LAY).EQ.0.OR.M(LAY).EQ.ABS(TKS(LAY))) GO TO 900
XI1(LAY) = (SF*SIG(LAY)-SB*(TKS(LAY)-ATT(LAY)))/
1      (M(LAY)**2-TKS(LAY)**2)
1 XI2(LAY) = (SB*SIG(LAY)+SF*(TKS(LAY)+ATT(LAY)))/
      (M(LAY)**2-TKS(LAY)**2)
C
C WRITE (16,5556) XI1(LAY),XI2(LAY),UB(LAY),UF(LAY),SB,SF
C5556 FORMAT (10X,'XI1=',E11.5,2X,'XI2=',E11.5,2X,'UB=',E11.5,
C 1 2X,'UF=',E11.5,2X,'SB=',E11.5,2X,'SF=',E11.5,/)
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C THIS SECTION CALCULATES THE COEFFICIENTS IN THE
C EQUATION FOR THE FLUX VECTOR (E+, E-, ES)
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
  X2 = XI2(LAY)*SIG(LAY)
  S2 = SIG(LAY)**2
  XS = XI1(LAY)*S2
  EPL = EXP(-M(LAY))
  EML = EXP(M(LAY))
  EKL = EXP(-TKS(LAY))
  AMM = ATT(LAY)-M(LAY)
  APM = ATT(LAY)+M(LAY)
  TM = 2.*M(LAY)
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C

```

```

C      CALCULATE THE INVERSE MATRIX (MI) AND M-BAR (MB)
C      THEN MULTIPLY MATRIX MT NEW MI (FOR THIS LAYER)
C      AND THEN MULTIPLY MATRIX MT NEW MB (FOR NEXT
C      LAYER) -- MT HOLDS THE LARGE MATRIX ....
C      IN THE CHANCE AND CANTU REFERENCE
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
      MI(1,1) = -S2/TM
      MI(1,2) = SIG(LAY)*APM/TM
      MI(1,3) = (XS-X2*APM)/TM
      MI(2,1) = S2/TM
      MI(2,2) = -SIG(LAY)*AMM/TM
      MI(2,3) = (X2*AMM-XS)/TM
      MI(3,1) = 0.
      MI(3,2) = 0.
      MI(3,3) = 1.
      CALL MMULT(MI,MT,LAY,LAY,6)
      MB(1,1) = EPL/APM
      MB(1,2) = EML/AMM
      MB(1,3) = XI1(LAY)*EKL
      MB(2,1) = EPL/SIG(LAY)
      MB(2,2) = EML/SIG(LAY)
      MB(2,3) = XI2(LAY)*EKL
      MB(3,1) = 0.
      MB(3,2) = 0.
      MB(3,3) = EKL
      CALL MMULT(MB,MT,LAY,LAY+1,6)
120 CONTINUE
C
      BO = EMO
      CO = ESO
      AO = -BO*FROO(MT(1,2,N+1),MT(2,2,N+1),MT(3,2,N+1))
      AO = AO - CO*FROO(MT(1,3,N+1),MT(2,3,N+1),MT(3,3,N+1))
      AO = AO / FROO(MT(1,1,N+1),MT(2,1,N+1),MT(3,1,N+1))
      SPILI = 0.
      PROBLE = 1.
C
CCCCCCCCCCCCCCCC
C
      CALCULATE THE FLUX VECTOR FOR LAST LAYER
C      E+=EPM; E-=EMM; ES=ESM. SIGNS ARE
C      CHANGED ON EXPONENTIALS SINCE X IS NEG.
C      DOWNWARD BUT LAI ASSUMES X IS POS.
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC --
C

```

```

DO 200 LAY=1,N
  A = AO*MT(1,1,LAY) + BO*MT(1,2,LAY) + CO*MT(1,3,LAY)
  B = AO*MT(2,1,LAY) + BO*MT(2,2,LAY) + CO*MT(2,3,LAY)
  C = AO*MT(3,1,LAY) + BO*MT(3,2,LAY) + CO*MT(3,3,LAY)
  EPL = EXP(-M(LAY))
  EML = EXP(M(LAY))
  EKL = EXP(-TKS(LAY))
  AMM = ATT(LAY)-M(LAY)
  APM = ATT(LAY)+M(LAY)
  EPM = A*EPL/APM + B*EML/AMM + C*XI1(LAY)*EKL
  EMM = A*EPL/SIG(LAY) + B*EML/SIG(LAY) + C*XI2(LAY)*EKL
  ESM = C*EKL
  A2 = A/APM
  B2 = B/AMM

C
C
C
C
  CALCULATE THE REFLECTANCE OF AN INFINITESIMAL
  INCREMENT OF LAYER LAY

  EP = INTEGR(TKO(LAY)+M(LAY))
  EM = INTEGR(TKO(LAY)-M(LAY))
  EK = INTEGR(TKO(LAY)+TKS(LAY))
  GP = (A*EP/APM + B*EM/AMM + C*XI1(LAY)*EK)*UF(LAY)
  GM = (A*EP/SIG(LAY) + B*EM/SIG(LAY) + C*XI2(LAY)*EK)*UB(LAY)
  GK = C*EK*W(LAY)
  PILI = (GP+GM+GK)*PROBLO
  PROBLO = PROBLO*EXP(-TKO(LAY))
  SPILI = SPILI + PILI
200 CONTINUE
C
  PILS = ROOS*(ESM+EMM)*PROBLO
  T1 = ESM*PROBLO
  T2 = EMM*PROBLO
  PILO = SPILI + PILS
  R = PILO*100
  GO TO 999
900 WRITE (15,2500) LAY
2500 FORMAT (///,'EIGENVALUES NOT UNIQUE IN LAYER',1X,I2)
C
C
C
C2600 WRITE (15,2600) TKS(LAY), M(LAY)
C2600 FORMAT ('KS=',E11.5,3X,'M=',E11.5)
C
999 CONTINUE
  RETURN
  END

C
C
  SUBROUTINE MMULT(M1,M2,IM1,IM2,N)

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C SUBROUTINE MMULT ( M1 , M2 , IM1 , IM2 , N )
C
C PURPOSE
C   MULTIPLIES TWO MATRICES: M1 IS A 3X3XN MATRIX WHERE
C   THE LAST DIMENSION DENOTES A SUBSCRIPT (=IM)
C
C INPUTS/OUTPUTS
C
C EXTERNAL PROCEDURES
C
C EXCEPTIONS
C
C ALGORITHM
C
C PROCEDURE
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
  REAL HOLD(3,3) , M2(3,3,N) , M1(3,3)
  DO 5 III=1,3
    DO 6 JJJ=1,3
      HOLD(III,JJJ) = 0.
  6 CONTINUE
  5 CONTINUE
C
  DO 10 III=1,3
    DO 20 JJJ=1,3
      DO 30 KKK=1,3
        HOLD(III,JJJ) = HOLD(III,JJJ) + M1(III,KKK) * M2(KKK,JJJ,I
  30 CONTINUE
  20 CONTINUE
  10 CONTINUE
C
  DO 40 III=1,3
    DO 50 JJJ=1,3
      M2(III,JJJ,IM2) = HOLD(III,JJJ)
  50 CONTINUE
  40 CONTINUE
  RETURN
  END

```