

COMPARAÇÃO ENTRE O FATOR DE REFLECTÂNCIA BIDIRECIONAL DE UM DOSSEL DE MUDAS DE *Eucalyptus grandis* E O FATOR DE REFLECTÂNCIA DIRECIONAL HEMISFÉRICO DE SUAS FOLHAS ISOLADAS

Flávio Jorge Ponzoni¹, Alessandra Rodrigues Gomes¹, Francisco Dario Maldonado¹, Hiromi Suzana Yamasaki Sassagawa¹, Izaya Numata¹, Luciana Spinelli de Araújo¹

RESUMO: Medidas radiométricas foram realizadas em um dossel de mudas de *Eucalyptus grandis* e em folhas isoladas, extraídas desse mesmo dossel, considerando três estágios de desenvolvimento: folhas maduras, intermediárias e novas. Do dossel foram determinados Fatores de Reflectância Bidirecional (FRB) em diferentes horários do dia (08:00 até 15:00h, com intervalos de 1 hora) e das folhas foram determinados os Fatores de Reflectância Direcional Hemisféricos (FRDH) das faces ventrais. Foi aplicada a Análise de Variância (ANOVA) para comparar os valores de FRB e FRDH nos diferentes horários para avaliar a influência da geometria de iluminação nas relações entre estes dois parâmetros em regiões espectrais específicas, definidas então por: Banda 1 (450 a 520 nm), Banda 2 (520 a 600 nm), Banda 3 (630 a 690 nm) e Banda 4 (760 a 900 nm). Os resultados indicaram que, para as características estruturais do dossel em questão, a geometria de iluminação não exerceu influência nas relações entre FRB e FRDH em todas as bandas espectrais consideradas. Os valores de FRDH provenientes das folhas novas apresentaram maior semelhança com os FRBs do dossel na região do visível, independentemente dos horários de coleta de dados, indicando ter sido essa porção do dossel a melhor iluminada. Na região do infravermelho, devido ao espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética, não foram identificadas semelhanças entre FRB e FRDH em todos horários.

Palavras-chave: radiometria da vegetação, comportamento espectral da vegetação

COMPARISON BETWEEN THE BIDIRECTIONAL REFLECTANCE FACTOR OF A *Eucalyptus grandis* SEEDLING CANOPY AND THE HEMISPHERICAL DIRECTIONAL REFLECTANCE FACTOR OF ITS DETACHED LEAVES

ABSTRACT: *Radimetric measurements were performed on an Eucalyptus grandis seedling canopy and in detached leaves from that canopy, considering three growing stages: old, intermediate and young leaves. From the canopy it was determined the Bidirectional Reflectance Factors (FRB) in different times of the day (from 08:00 am to 3:00 pm, in 1 by 1 hour) and from the up size of the leaves it was determined the Hemispherical Directional Reflectance Factors (FRDH). ANOVAs statistical procedure was applied in order to compare FRB and FRDH in all collecting times to evaluate the illumination geometry influence in both parameters relationship in specific spectral regions: Band 1*

¹Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas,1758; CEP: 12227-010 São José dos Campos, flavio@ltd.inpe.br

(450 a 520 nm), Band 2 (520 a 600 nm), Band 3 (630 a 690 nm) and Band 4 (760 a 900 nm). The results showed that for that specific canopy (structural characteristics) the illumination geometry did not influence the relationship between FRB and FRDH in all bands and different time of day. The FRDH from the younger leaves were frequently similar to the FRB in the visible region, independently of the time of the day, which indicated that the superior portion of the canopy was better illuminated. In the near infrared, due the multiple scattering, it was not identified any similarity between FRB and FRDH along the time.

Key words: Vegetation radiometry, vegetation spectral behaviour

1. INTRODUÇÃO

A busca do conhecimento do processo de interação entre a radiação eletromagnética e a vegetação tem sido motivada principalmente pela necessidade de se correlacionar os padrões ou mesmo dados radiométricos presentes em imagens orbitais, com parâmetros relevantes (de interesse) da vegetação. Colwell (1974) comentou que os primeiros esforços nesse sentido apresentaram resultados anômalos ou contraditórios e atribuiu esse fato à não consideração das verdadeiras relações de causa e efeito envolvidas nesse processo de interação.

A predição e a compreensão da aparência assumida por um dossel vegetal ou de um dado radiométrico proveniente desse mesmo dossel, presentes em uma imagem orbital, não podem ser feitas única e exclusivamente tomando-se como base a reflectância espectral de alguns elementos da vegetação (folhas, flores, galhos, troncos, frutos, etc.). As geometrias de iluminação e visada (parâmetros geométricos que caracterizam a bidirecionalidade da radiância medida pelos sensores remotamente situados), a densidade destes elementos da vegetação (muitas vezes expressa pelo Índice de Área Foliar - IAF), suas orientações espaciais e as características espectrais do solo no qual a vegetação se desenvolve são outros fatores que exercem influência sobre a reflectância espectral da vegetação. Apesar disso, é inegável que as propriedades espectrais das folhas que constituem um dossel são os fatores mais influentes na sua reflectância, por ser a folha o principal elemento da planta sob

ponto de vista da interação da Radiação Eletromagnética (REM) com a vegetação.

Goel (1988) mencionou que a caracterização espectral de folhas isoladas tem sido realizada fundamentalmente em laboratórios, com fontes de iluminação posicionadas próximo da vertical (normal à superfície de uma das faces da folha), ou utilizando ainda esferas integradoras que permitem a determinação de fatores de reflectância e/ou transmitância direcional hemisféricos (a fonte é colimada, mas a incidência da REM sobre o sensor se dá de forma difusa) das faces ventral ou dorsal das folhas. Os objetivos dessas caracterizações incluem estudos de fitossanidade (Ponzoni, 1996), de deficiências minerais (Ponzoni & Gonçalves, 1997), de identificação taxonômica etc. Os parâmetros utilizados nessas caracterizações têm sido considerados como parâmetros de entrada dos chamados Modelos de Reflectância da Vegetação que visam prever valores de reflectância do dossel mediante o conhecimento de parâmetros geométricos, biofísicos e espectrais dos elementos da vegetação e do solo (Ponzoni, 1993).

Ponzoni (1993), estudando o *modelo Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves* (SAIL), concluiu ser este modelo muito sensível às variações das propriedades espectrais das folhas, subestimando a influência dos demais parâmetros sobre a reflectância da vegetação. Major et al. (1992) avaliaram a sensibilidade deste modelo SAIL e concluíram que as simulações da reflectância de um dossel foram sensíveis às variações da reflectância e da transmitância direcional hemisféricas das folhas e que os efeitos dos demais parâmetros foram coerentes, mas não

tão evidentes quanto esperado. Estes resultados comprovam um certo desconhecimento sobre a real participação das propriedades espectrais das folhas sobre a reflectância espectral dos dosséis dos quais estas fazem parte, sobretudo quando consideram-se variações nas geometrias de iluminação e visada.

O objetivo deste trabalho foi comparar valores de Fatores de Reflectância Bidirecional (FRB) de um dossel constituído por mudas de *Eucalyptus grandis* com valores de Fatores de Reflectância Direcional Hemisférica (FRDH) de folhas extraídas destes mesmos dosséis em três diferentes estágios de desenvolvimento (maduras, intermediárias e novas) que se posicionavam em três diferentes níveis de profundidade no dossel (inferior, intermediário e superior, respectivamente), ao longo de diferentes horários do dia para avaliar, ainda, a influência da geometria de iluminação sobre as relações de FRB e FRDH.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Medidas radiométricas sobre o dossel

Foi elaborado um dossel nas dependências do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/São José dos Campos, SP) composto por 576 mudas de *Eucalyptus grandis*, com aproximadamente 35 cm de altura cada uma, mantidas em tubetes, distanciadas entre si em aproximadamente 5 cm, dispostas em seis bandejas de polietileno preto, as quais foram arranjadas no terreno procurando manter a orientação das fileiras das mudas segundo a direção leste-oeste. As dimensões aproximadas deste dossel no terreno foi de 2,0m x 0,8m.

Foram realizadas medições radiométricas sobre o dossel em oito diferentes horários do dia 25.06.97, iniciando às 08:00 horas, com intervalos regulares de uma hora entre as baterias de medidas. Assim, foram realizadas baterias de medidas às 8:00, 9:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00 e 15:00 horas. Essas medições foram realizadas utilizando o espectroradiômetro

GER 2100, atuando de 400 a 2.500 nm. O objetivo desse procedimento foi avaliar o efeito das diferentes geometrias de iluminação sobre a comparação entre os valores de Fatores de Reflectância Bidirecional (FRB) provenientes do dossel e os Fatores de Reflectância Direcional Hemisférica (FRDH) provenientes das folhas que os compunham. O espectroradiômetro era mantido sobre o dossel, apontado verticalmente para baixo a aproximadamente 1,5 m acima da porção superior do dossel (topo), o que definiu um elemento de resolução no topo do dossel de aproximadamente 7 x 4 cm. Intercaladamente a cada medida radiométrica sobre o dossel, foi realizada uma medida de uma placa de referência de Sulfato de Bário (BaSO_4) para posterior determinação dos valores de FRB. Em cada um dos horários mencionados, foram realizadas 19 medidas radiométricas do dossel (cada uma delas seguida de uma medida da placa de referência), procurando coletar dados de toda a sua extensão.

O IAF médio deste dossel foi estimado por meio da seleção arbitrária de 24 mudas, as quais foram subdivididas em seis grupos de quatro mudas. Destas quatro mudas, foram extraídas todas as suas folhas que, imediatamente, foram dispostas na esteira do instrumento LI-COR 3200 Areameter, que permitiu a determinação da área acumulativa das folhas destas quatro mudas. Uma vez que cada grupo de quatro mudas ocupava uma área de 100 cm^2 no canteiro, a determinação do IAF médio do dossel foi feita segundo as seguintes equações:

$$IAF_i = \frac{\text{Área das folhas do grupo } i \text{ (cm}^2\text{)}}{100 \text{ cm}^2} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6.$$

$$IAF \text{ médio} = \Sigma IAF_i / 6$$

Vale salientar que a determinação deste IAF médio foi feita após a realização das medidas radiométricas sobre o dossel.

A estimativa do IAF teve como objetivo permitir avaliar a densidade do dossel, uma vez que esse parâmetro biofísico exerce influência sobre a reflectância do dossel (GOEL, 1988). A

consideração de diferentes geometrias de iluminação foi outro fator que reforçou a necessidade de se conhecer a densidade do dossel, uma vez que seus efeitos são diferenciados entre dosséis densos e outros menos densos (Ponzoni, 1993; Goel, 1988).

2.2. Medidas radiométricas sobre as folhas

Foram selecionadas aleatoriamente 50 mudas pertencentes ao dossel, as quais foram retiradas das bandejas e levadas ao Laboratório de Radiometria do INPE (LARAD). As medidas radiométricas foram realizadas mediante a utilização do espectrorradiômetro SPECTRON SE-590, atuando na amplitude espectral compreendida entre 400 a 1100nm, e tendo acoplada uma esfera integradora LI-COR 1800, que permitiu o registro da radiância direcional hemisférica da face ventral das folhas. Foram selecionadas de cada muda, uma folha localizada na porção inferior (folhas mais maduras), outra na porção intermediária (folhas intermediárias) e, finalmente, outra folha da porção superior (folha mais nova), das quais foram coletados os dados radiométricos. Para a determinação dos valores de FRDH destas folhas, foram coletados dados radiométricos de uma placa de referência de BaSO₄ existente no interior da esfera, ao início e ao final da coleta de dados das folhas mencionadas. O resultado foram arquivos contendo, seqüencialmente, um vetor com valores de radiância direcional hemisférica da placa, um vetor referente à radiância direcional hemisférica da face ventral da folha madura, outro vetor referente à radiância direcional hemisférica da folha intermediária, outro vetor com os valores de radiância direcional hemisférica da folha nova e, finalmente, um último vetor contendo os valores da radiância direcional hemisférica da placa de referência. Por meio do aplicativo ESPECTRO, desenvolvido pelo LARAD, foram então compostos outros arquivos contendo os FRDHs de cada uma das folhas mencionadas.

Relembrando que foram realizadas dezoito medidas radiométricas sobre o dossel e para evitar a ocorrência de diferentes números de amostras entre estas medidas e aquelas realizadas sobre as folhas (tratamentos), foram selecionados aleatoriamente dezoito arquivos de folhas contendo seus respectivos valores de FRDHs. Com base neles, procedeu-se à comparação estatística entre os FRBs e os FRDHs.

2.3. Análise estatística

Foi aplicada a Análise de Variância (ANOVA), tendo como fontes de variação os FRBs e os FRDHs, procurando identificar diferenças significativas entre ambos ao nível de 5% de probabilidade, considerando um delineamento inteiramente casualizado. Para tanto, foram determinados valores médios tanto de FRB, quanto de FRDH em quatro bandas espectrais assim denominadas: Banda 1 → 450 a 520 nm; Banda 2 → 520 a 600 nm; Banda 3 → 630 a 690 nm e Banda 4 → 760 a 900 nm. Dado que as resoluções espectrais de ambos os instrumentos (GER 2100 e SPECTRON SE-590) eram diferentes, procedeu-se à compatibilização dos dados, degradando a resolução espectral do SPECTRON SE-590 por meio do cálculo de médias aritméticas dos valores de FRDH ao longo de toda a amplitude espectral compreendida entre 400 a 1100 nm, para que os novos vetores resultantes tivessem então uma resolução de 8 nm, compatível com aquela do espectrorradiômetro GER 2100. Esse procedimento foi adotado antes do cálculo dos valores médios por banda espectral.

As ANOVAs foram aplicadas em cada banda e para cada um dos estágios de desenvolvimento das folhas (maduras, intermediárias e novas) individualmente, procurando identificar em quais destes haveria maior ou menor proximidade entre os valores de FRB e FRDH. Considerando que foram realizadas medidas ao longo de diferentes horários do dia, as ANOVAs foram ainda aplicadas para os dados provenientes de cada um dos horários e os resultados foram ana-

lisados relativamente para constatar ou não a influência da geometria de iluminação nas relações entre FRB e FRDH.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Espectros adquiridos

A Figura 1 apresenta a representação gráfica dos valores de FRB do dossel e dos valores de FRDH médio das folhas (maduras, intermediárias e novas) adquiridos durante as campanhas de coleta de dados em campo e em laboratório, respectivamente.

Como pode ser observado, os valores de FRB do dossel não apresentaram qualquer tendência ao longo dos horários, indicando não ter havido influência marcante da variação da geometria de iluminação sobre eles. Vale salientar que o experimento foi concebido para um dossel bastante denso, apesar de suas pequenas proporções. A quase que inexistente diferenciação estrutural vertical do dossel elaborado neste trabalho pode ter influenciado na também inexistente dinâmica dos valores de FRB ao longo dos horários de coleta de dados. Trabalhos como os de Kimes (1984), Pinter et al. (1985) e Jackson et al. (1979) fundamentaram-se na dinâmica do que chamaram “reflectância dos dosséis”, em função de variáveis de iluminação, visada, geometrias de plantios e ainda de diferenças na

arquitetura de dosséis. Suas conclusões fundamentaram-se na trajetória da radiação eletromagnética dentro do dossel, ora incidindo nas porções mais profundas do dossel, ora nas porções mais superiores. Para o caso deste trabalho, essas porções foram caracterizadas pela existência de folhas maduras (porção inferior), folhas intermediárias (porção intermediária) e folhas novas (porção superior), sendo que tais porções encontravam-se distanciadas em alguns poucos centímetros.

Ranson et al. (1986) realizaram experimentos com dosséis apresentando diferentes níveis de densidades e concluíram que dosséis densos apresentam tendência de refletirem muito na região do infravermelho, refletindo pouco na região do visível.

Outro aspecto importante refere-se à orientação espacial assumida pelas folhas que, para o caso do dossel aqui considerado, aproximava-se de um dossel do tipo planófilo, no qual suas folhas apresentam orientação próxima da horizontal. Goel (1988) afirmou que um dossel denso, que apresenta folhas predominantemente na posição horizontal, apresenta pouca variação de sua reflectância em função dos ângulos de iluminação e visada.

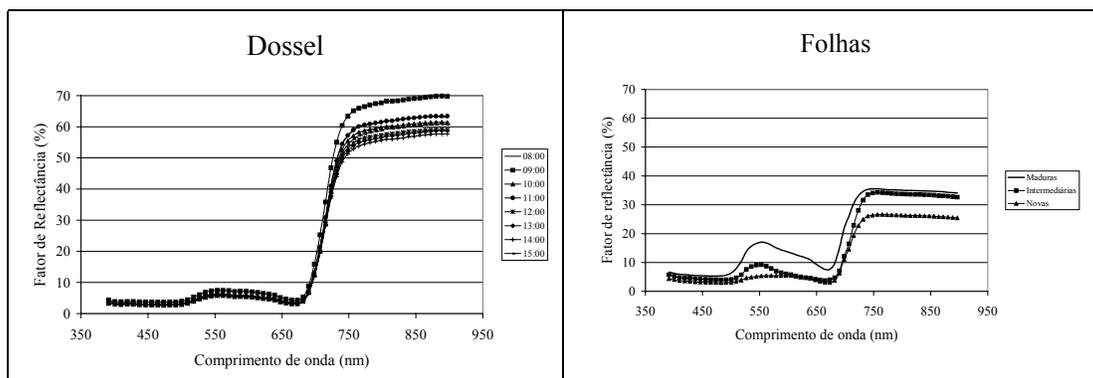


Figura 1. Representação gráfica dos valores de FRB e de FRDH.

Figure 1. Graphic representation of FRB and FRDH

Os FRDHs das folhas apresentaram algumas diferenças bastante pronunciadas na região do visível, com as folhas maduras apresentando valores mais elevados em relação às demais folhas (intermediárias e novas). Gates & Tantrapporn (1952) verificaram que a reflectância de uma folha decresce com a idade na região do visível. Este fato pode ser atribuído ao desenvolvimento da clorofila, que aumenta em quantidade rapidamente nos estágios iniciais do desenvolvimento da folha, aumentando mais lentamente nos estágios subseqüentes, até que a coloração verde característica da espécie seja atingida. Após esse estágio de desenvolvimento, há o aumento da reflectância decorrente do início da senescência, caracterizado pela degradação dos pigmentos fotossintetizantes.

Na região do infravermelho próximo, as folhas diferiram pouco entre si, destacando-se a reflectância ligeiramente inferior das folhas novas, decorrente de uma possível maior compactação de suas estruturas internas, compara-

do com as demais. Gausman *et al.* (1969) realizaram experimentos com plantas de algodão que haviam sido submetidas a um crescimento em ambiente com umidade controlada. Em geral, a reflectância aumentou e a transmitância decresceu no intervalo de 500 nm a 2.500 nm para as folhas maduras. Depois de um período de 12 dias, verificou-se um decréscimo na reflectância e um acréscimo na transmitância dessas mesmas folhas. Durante esse período de tempo, as folhas dobraram o número de espaços intercelulares e suas espessuras aumentaram em 14%, aproximadamente. A reflectância na região do infravermelho próximo para as folhas mais velhas, após os 12 dias, aumentou porque também aumentou o número de espaços intercelulares no mesófilo.

A Figura 2 apresenta gráficos nos quais é possível comparar os valores de FRDH das folhas com os valores de FRB do dossel em cada um dos horários de coleta de dados.

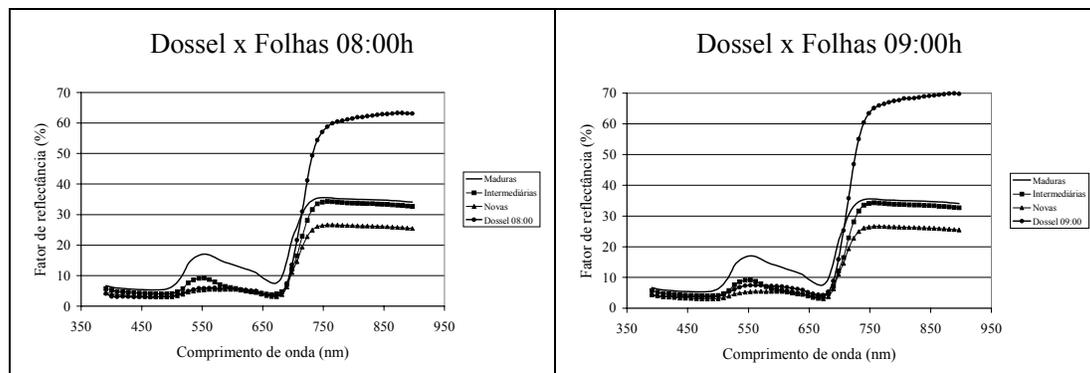
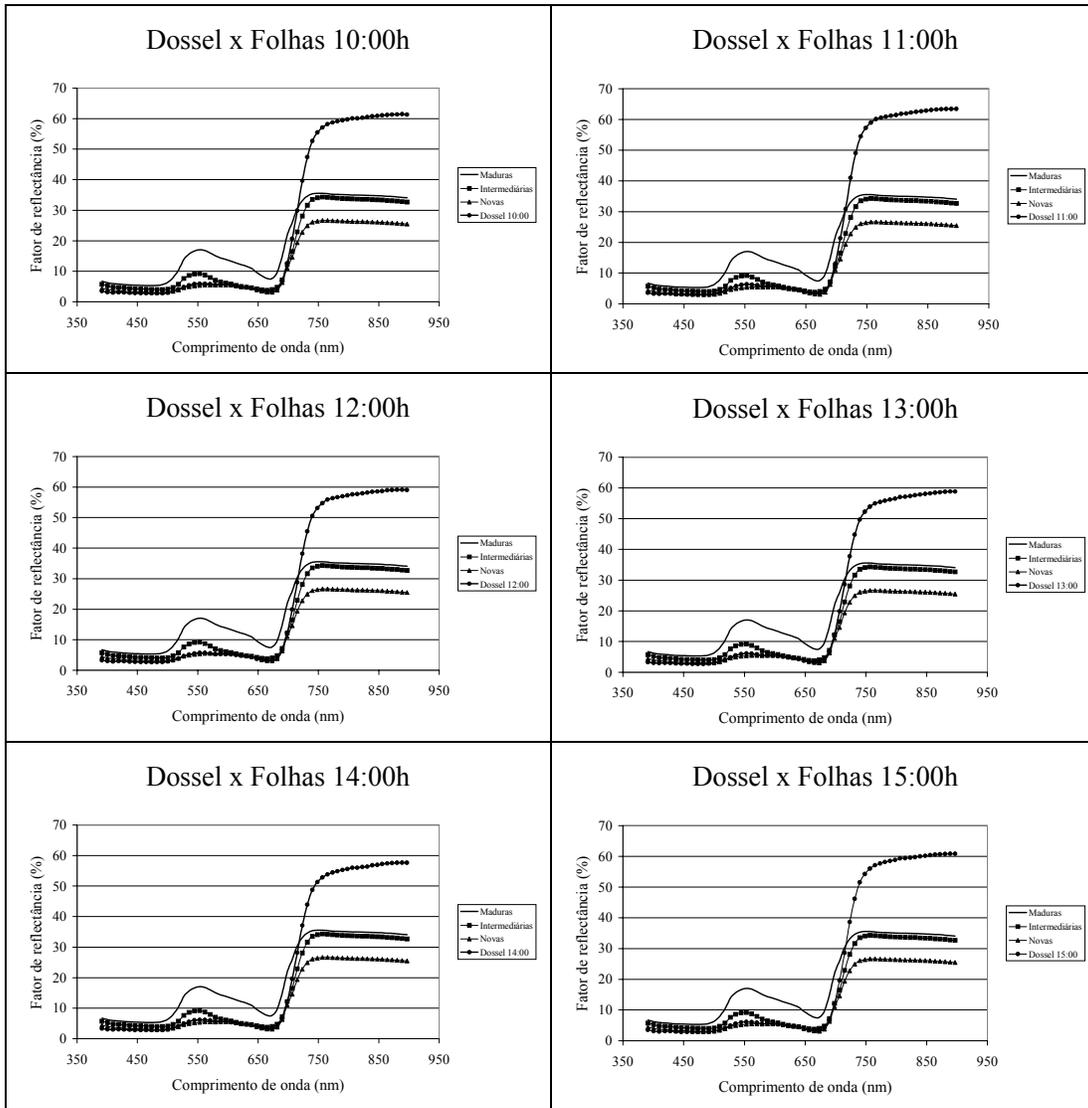


Figura 2. Representação gráfica dos valores de FRDH e FRB nos diferentes horários

Figure 2. Graphic representation of FRDH and FRB in the different collecting times

Continua...

Continuação Figura 2...



Observando esses gráficos da Figura 2, é possível verificar que os valores de FRB do dossel foram quase sempre inferiores aos dos FRDHs das folhas na região do visível, enquanto que, na região do infravermelho próximo, eles foram significativamente superiores. Isso pode ser explicado pela existência de sombras no interior do dossel que diminuem a incidência de radiação sobre as folhas, ocasionando a diminuição da sua reflectância. Goel (1988) e Kumar (1972) confirmam que a reflectância referente à região do visível de uma folha isolada é sempre maior do que a reflectância do dossel da qual ela faz parte devido ao sombreamento mútuo das folhas. Para a região do infravermelho, os mesmo autores afirmaram que o espalhamento múltiplo da radiação dentro de um dossel entre suas inúmeras folhas aumenta significativamente sua reflectância nessa região espectral, o que foi igualmente confirmado neste trabalho.

Independentemente do horário de coleta de dados, os valores de FRDH mais próximos dos valores de FRB foram aqueles referentes aos das folhas novas, indicando ser a porção superior

do dossel aquela que dominou na reflectância do dossel em qualquer um dos horários, independentemente então da geometria de iluminação. Para uma análise mais segura, foram então aplicadas as ANOVAs, segundo já descrito no item 2.3. A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados alcançados da aplicação das ANOVAs.

As células que se apresentam sombreadas nessa Tabela 1 indicam as bandas espectrais e os horários nos quais não foram identificadas diferenças significativas entre os valores de FRDH e FRB. Como pode ser observado, a reflectância do dossel foi muito semelhante à reflectância das folhas novas somente na região do visível e essa semelhança não foi afetada pela variação da geometria de iluminação. Na região do infravermelho, o espalhamento múltiplo das folhas ocorreu indistintamente entre as camadas, resultando em um fluxo de radiação não diferenciado. Já na região do visível, o predomínio foi das folhas mais novas, localizadas na porção superior do dossel, indicando serem estas as folhas que se mantiveram mais iluminadas em relação às demais, independentemente da geometria de iluminação.

Tabela 1. Resultados da aplicação das ANOVAs
Table 1. ANOVA's application results

Hora	<i>Maduras</i>				<i>Intermediárias</i>				<i>Novas</i>			
	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
08:00												
09:00												
10:00												
11:00												
12:00												
13:00												
14:00												

BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, Salvador, BA.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997. (INPE-6136-PRP/199).

PONZONI, F. J.; GONÇALVES, J. L. de M. **Caracterização espectral de sintomas relacionados às deficiências de nitrogênio (N), fósforo (P) e de potássio (K) em mudas de *Eucalyptus saligna*.** São José dos Campos:

RANSON, K. J.; DAUGHTRY, C. S. T.; BIEHL, L. L. Sun angle, view angle and background effects on spectral response of simulated Balsam Fir canopies. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 52, n. 5, p. 649-658, May 1986.