

Comportamento espectral associado a parâmetros agronômicos de soja (*Glycine max*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*)

ALFREDO JOSÉ BARRETO LUIZ¹
MARIANA GIANNOTTI MENDONÇA DE BARROS²
ANTÔNIO ROBERTO FORMAGGIO²
JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHANIO²

¹Embrapa Meio Ambiente (doutorando no INPE)

²INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - 12201-097 - São José dos Campos - SP, Brasil
e-mail: {barreto, mariana, formagio, epiphani}@ltd.inpe.br

Abstract The spectral reflectance of soybean and bean were studied in laboratory conditions during five consecutive weeks. The reflectance factor values were measured in the spectral ranges corresponding to bands 1, 2, 3 and 4 from TM sensor of Landsat-5 satellite. They were compared with simultaneous measures of the agronomic parameters: green weight (PV), amount of chlorophyll (TC) and leaf area index (LAI). The bands 3 and 4, as well the normalized difference vegetation index (DN) were high and significantly correlated with soybean PV and bean TC. Based on this experience, suggestions are provided in order to reduce risks and improve results for any future radiometry investigation of vegetable species in laboratory conditions.

Keywords: remote sensing, soybean, bean, radiometry.

1. Introdução e Objetivos

Com o objetivo de estudar o ambiente terrestre, o sensoriamento remoto utiliza-se de sensores e equipamentos para registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que compõem a superfície terrestre (Novo, 1989), entre elas as culturas agrícolas. Para tanto, torna-se essencial o conhecimento e a disponibilização de dados espectrais de culturas agrícolas, visando alcançar a compreensão das interações entre energia e matéria. Price (1994) afirma que uma das dificuldades em estudar as assinaturas espectrais de espécies é ainda a pouca disponibilidade de exemplares de cada espécie nas bibliotecas espectrais. Nesse sentido, foi realizado um estudo sobre o comportamento espectral da soja (*Glycine max*) e do feijão (*Phaseolus vulgaris*) com o objetivo principal de analisar as relações existentes entre variáveis agronômicas e espectrais de interesse para o sensoriamento remoto em agricultura.

O conhecimento de como a radiação solar interage com a vegetação é necessário para interpretar e processar dados de sensoriamento remoto provenientes da agricultura (Knippling, 1970). Uma maneira de abordar a agricultura é a avaliação qualitativa das coberturas vegetais por meio de medidas espectrais utilizando índices de vegetação (Chen, 1986). Segundo Huete (1988) inúmeros índices de vegetação vem sendo desenvolvidos para caracterizar as coberturas

vegetais, sendo que o mais comum é utilizar razões das reflectâncias ou radiâncias da vegetação no vermelho e no infravermelho próximo.

Esses índices vêm sendo relacionados com propriedades particulares da vegetação como quantidade de biomassa, porcentagem de cobertura, índice de área foliar e radiação fotossinteticamente ativa absorvida (Middleton, 1991; Huete, 1988; Asner, 1998). Porém, existem limitações nessas relações devido às influências atmosféricas e diferenças no substrato solo (Huete, 1988). É então importante, como salientaram Epiphanyo e Huete (1995), o desenvolvimento de relações estáveis entre índices de vegetação e variáveis agrônomicas.

Portanto, há que se atentar, às variáveis que influenciam a resposta espectral de uma vegetação. Segundo Knippling (1970) a reflectância de uma vegetação é similar à reflectância de uma folha, mas modificada pela desuniformidade da radiação solar incidente, estrutura da planta, área foliar, sombra e refletividade do substrato ou fundo. Colwell (1974) aborda este fato relacionando estes componentes que estão misturados em um alvo de vegetação e atentando para o fato destes estarem orientados em ângulos diferentes com relação à fonte de iluminação, provocando uma variação nos valores de irradiância. Segundo Asner (1998), os atributos estruturais das plantas ocasionam variações nas características de reflectância das vegetações por orientarem o espalhamento em um espaço tridimensional, permitindo aos fótons interagirem com múltiplas superfícies de folhas, material lenhoso e solos. Neste contexto surge a necessidade de analisar alguns parâmetros importantes para o entendimento da reflectância da vegetação, sejam estes: área foliar, distribuição angular de folhas, reflectância do solo, ângulo zenital solar, ângulo de visada e ângulo azimutal (Colwell, 1974).

Este trabalho foi realizado com a intenção de investigar a existência e a magnitude das correlações entre os valores simulados, a partir de medidas radiométricas de laboratório, das bandas 1, 2, 3 e 4 do TM/Landsat e do índice de vegetação da diferença normalizada (DN) com os parâmetros agrônomicos índice de área foliar (IAF), peso verde (PV) e teor de clorofila (TC), nas culturas do feijão e da soja, também conduzidas em ambiente artificial relativamente controlado. Pretendia-se ainda averiguar a influência do ângulo azimutal de iluminação, em relação às linhas de plantio das culturas, sobre as medidas de reflectância.

2. Material e Método

As culturas foram semeadas em três caixas de madeira com 10 cm de profundidade, 70 cm de largura e 100 cm de comprimento, cheias de solo peneirado. A área destinada a cada espécie correspondia exatamente à metade de cada caixa, no sentido do comprimento ($50 \times 70 = 3500$ cm²). Foram colocadas duas sementes a cada 4 cm, em oito linhas espaçadas de 8 cm. As irrigações foram diárias, com exceção dos dois dias anteriores a cada medição, tempo que se julgou suficiente para que fosse atingido um equilíbrio na umidade do solo, de forma a minimizar as influências sobre as medidas radiométricas.

A instalação do experimento foi realizada no dia 28 de junho de 1999, e as medições radiométricas foram feitas aos 17, 24, 31, 38 e 46 dias após o plantio (DAP). As caixas foram mantidas suspensas 15 cm acima de um gramado, em terreno aberto, sob uma armação com cobertura plástica transparente colocada a 100 cm do solo.

As medições radiométricas foram realizadas no Laboratório de Radiometria (LARAD) do Departamento de Sensoriamento Remoto (DSR) do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) com o espectrorradiômetro Spectron SE-590. As caixas com as plantas eram levadas uma a uma para o local, apenas durante o tempo necessário para se fazerem as medidas, que duravam em torno

de 10 minutos por caixa. Como fonte de iluminação foi utilizada uma lâmpada de luz branca de 250 W, apoiada em um tripé e direcionada para o alvo com um ângulo de 35° em relação ao nadir (simulando o ângulo zenital solar médio, na latitude de 23° Sul, no verão, no horário de passagem do satélite Landsat) do qual estava distante 115cm.

Embora o Spectron SE-590 permita a obtenção de 256 bandas em uma faixa que varia de 350 a 1150 nm, com resolução espectral de 10 nm, no presente trabalho foram utilizados apenas os valores entre 400 e 900 nm, pois esse intervalo abrange as bandas de interesse: 1, 2, 3 e 4 do sensor TM (**tabela 1**). O sensor foi posicionado a nadir, a 60 cm acima da borda superior das caixas contendo as culturas, ajustado para um campo de visada (FOV) de 15°, o que resultou em uma área observada de raio igual ao espaçamento entre fileiras de plantas (8cm).

Tabela 1. Faixas espectrais referentes às quatro primeiras bandas do sensor TM à bordo do satélite Landsat-5

Bandas	Intervalo de comprimento de onda (nm) e designação comum
1	450 – 520 azul
2	520 – 600 verde
3	630 – 690 vermelho
4	760 – 900 infravermelho próximo

Com as bandas 3 e 4 foi calculado o índice de vegetação da diferença normalizada (DN):

$$DN = \frac{(banda\ 4 - banda\ 3)}{(banda\ 4 + banda\ 3)}$$

Para simular a variação do ângulo azimutal solar, cada caixa era colocada primeiramente de forma que as linhas de plantio ficassem paralelas aos raios luminosos, o que correspondia a 0°; depois ela era rotacionada até as linhas ficarem inclinadas em relação à trajetória da luz para se fazerem as medidas correspondentes a 45°; e, finalmente, girava-se a caixa de maneira que as linhas ficassem perpendiculares à direção da iluminação, e tomavam-se as medidas relativas ao ângulo de 90°. Para cada posição, em cada cultura, nas três caixas, foram feitas três medições. Imediatamente antes e após as mensurações sobre as plantas de cada caixa, eram tomadas medidas de uma placa de referência Spectralon, para serem posteriormente utilizadas na calibração das demais medidas. Os dados foram analisados utilizando o programa computacional Espectro sobre o qual pode-se obter informações completas em Steffen et al. (1996).

Para analisar as correlações, além dos parâmetros espectrais das culturas, foram coletados simultaneamente os parâmetros agronômicos: área foliar (AF), peso verde (PV), teor de clorofila (TC), e número de plantas (n). O TC foi coletado através do medidor de clorofila SPAD-502, que obtém o valor do teor de clorofila das folhas por um método não destrutivo, baseado na razão das transmitâncias em dois comprimentos de onda (650 e 940nm). O PV foi determinado em balança mecânica com precisão de 0,1g. O índice de área foliar (IAF) foi calculado multiplicando-se a AF média por planta pelo número de plantas em cada caixa e dividindo-se pela área destinada a cada espécie (3500 cm²) na caixa. A maioria das medidas foram realizadas em três plantas por espécie e por caixa, nas mesmas datas das medições radiométricas. O número de plantas era obtido contando-se todas as plantas com folhas definitivas de quatro das oito fileiras em cada caixa e multiplicando-se a contagem por dois. A AF foi obtida através do medidor Li-Cor, separando todas as folhas definitivas de uma planta e passando-as simultaneamente pelo

aparelho; em cada data tomavam-se seis medidas de um disco padrão com área conhecida de 50 cm², sendo três após as medidas de feijão e três após as de soja, usadas para calibração.

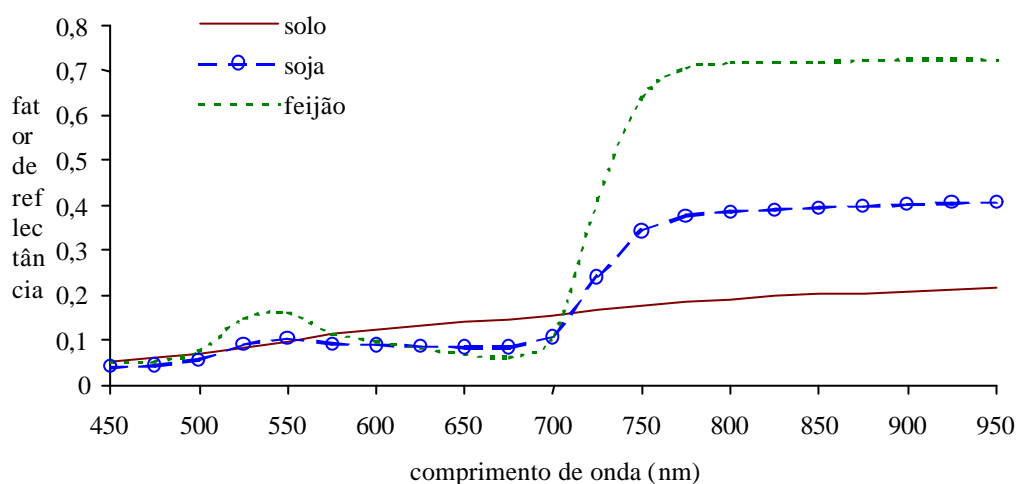
Para induzir o efeito de senescência, aos 40 DAP foi interrompida a irrigação, o que resultou na presença de plantas amareladas, com perda de folhas e até mortas na última medição.

3 Resultados e Discussão

Foram observadas temperaturas muito baixas nas primeiras duas semanas após o plantio, o que atrasou a germinação do feijão (69% aos 17 DAP, 72% aos 24 DAP e o máximo de 77% somente aos 31 DAP) e afetou muito o percentual de germinação da soja (0% aos 17 DAP, 25% aos 24 DAP, 34% aos 31 DAP e o máximo de 35% aos 38 DAP). Algumas medições na soja não foram realizadas pois não havia material vegetal suficiente.

Os resultados obtidos nas medições radiométricas foram calibrados e agrupados, através do programa Espectro, de acordo com as bandas TM1, 2, 3 e 4, nos intervalos já apresentados na **tabela 1** e assinalados na **figura 1**.

Figura 1. Espectros médios do feijão e da soja (aos 38 dias após o plantio) e do solo (antes da germinação).



Na **figura 1** estão representados os perfis espectrais médios da soja e do feijão aos 38 DAP, quando ambos estavam no máximo do desenvolvimento alcançado nas condições do experimento, e o espectro do solo usado como substrato, obtido antes da germinação das plantas. Nota-se que o feijão alcançou vigor e desenvolvimento muito superiores aos da soja, o que está refletido nos mínimos de absorção no azul e no vermelho e nos máximos no verde e principalmente no infravermelho próximo. Como a soja nunca alcançou um recobrimento total do solo (IAF máximo de 0,98 aos 38 DAP), sempre que se tratar neste artigo da resposta da soja, na realidade estaremos nos referindo a uma mistura de sinais oriundos da soja e do solo.

Na **tabela 2** são apresentados os valores do coeficiente de correlação entre os parâmetros espectrais e agrônômicos do feijão e da soja e, adicionalmente, a correlação das bandas e da DN entre si. A DN foi o parâmetro espectral que melhor se correlacionou com os parâmetros

agronômicos, seguida das bandas 3 e 4, o que era de se esperar, pois a primeira é uma combinação das últimas. Com relação aos parâmetros agrônômicos, os únicos que apresentaram correlação significativa com as medidas espectrais foram o TC para o feijão e o PV para a soja e, por isso, somente os valores correspondentes a eles são aqui registrados. No caso do feijão o resultado é bastante razoável, primeiro porque a clorofila é um dos principais responsáveis pelo espectro típico de absorção/reflectância das folhas verdes, pelo menos nas três primeiras bandas do TM; e, em segundo, porque as medidas do TC foram realizadas com um aparelho baseado nos mesmos princípios de interações entre a radiação eletromagnética e a matéria, no qual está baseado o espectrorradiômetro e o sensor TM.

Tabela 2. Valores do coeficiente de correlação entre parâmetros espectrais e agrônômicos do feijão e da soja

		TM1	TM2	TM3	TM4	DN	N
Feijão	TM2	0,913**					45
	TM3	0,132 ^{ns}	0,228 ^{ns}				45
	TM4	0,840**	0,761**	-0,357 *			45
	DN	0,466**	0,346 *	-0,798**	0,838**		45
	PV	-0,014 ^{ns}	0,127 ^{ns}	-0,321 *	0,200 ^{ns}	0,283 ^{ns}	45
	TC	0,650**	0,472 *	-0,619**	0,800**	0,813**	27
	IAF	0,019 ^{ns}	0,235 ^{ns}	-0,156 ^{ns}	0,181 ^{ns}	0,161 ^{ns}	45
Soja	TM2	0,950**					45
	TM3	0,913**	0,800**				45
	TM4	-0,427**	-0,188 ^{ns}	-0,729**			45
	DN	-0,767**	-0,588**	-0,946**	0,893**		45
	PV	-0,274 ^{ns}	0,327 ^{ns}	-0,720**	0,774**	0,824**	27
	TC	0,112 ^{ns}	-0,282 ^{ns}	0,134 ^{ns}	-0,280 ^{ns}	-0,278 ^{ns}	27
	IAF	-0,004 ^{ns}	-0,096 ^{ns}	-0,331 ^{ns}	0,298 ^{ns}	0,407 ^{ns}	18

^{ns} não significativo, * significativo a 5%, ** significativo a 1%

Já no caso da soja os resultados devem ser observados com cautela pois, como se pode ver pela **tabela 3**, haviam muito poucos dados disponíveis para a realização das análises, o que prejudicou a interpretação. Apesar disso, a ocorrência de significância nas correlações entre parâmetros radiométricos e o PV da soja é mais um indicativo no sentido de confirmar a possibilidade de estimarem-se características das culturas agrícolas através do sensoriamento remoto, mesmo em situação de estresse.

Apesar das correlações entre as medidas radiométricas e os parâmetros agrônômicos não terem sido sempre significativas, é importante ressaltar que todos os parâmetros foram correlacionados entre si para o feijão (PV e TC = -0,39*; PV e IAF = 0,87**; TC e IAF = -0,41*), e quase todos para a soja (PV e TC = -0,49*; PV e IAF = 0,62**). O valor absoluto do coeficiente de correlação entre o TC e o IAF da soja, na realidade, foi maior que o do feijão (TC e IAF = -0,46), mas não alcançou a significância devido ao pequeno número de elementos da amostra. Isso é importante no sentido que, se essas variáveis medidas diretamente nas plantas são correlacionadas entre si e se no presente trabalho, mesmo com todas as limitações, foi possível encontrar associação entre pelo menos uma delas, em cada espécie, com as medidas

radiométricas, pode-se esperar a obtenção de relações muito melhor definidas com o aprimoramento dos procedimentos experimentais.

Tabela 3. Médias do peso verde (PV), teor de clorofila (TC) e índice de área foliar (IAF) do feijão e da soja, conforme o DAP (dias após o plantio)

		DAP =	17	24	31	38	46	N
feijão	PV (g)		0,9	1,0	1,1	1,3	1,2	9
	TC		-	36,0	36,1	-	32,0	9
	IAF		0,65	1,08	1,33	1,74	1,63	9
soja	PV (g)		-	-	1,0	1,0	0,4	9
	TC		-	31,4	34,1	-	36,2	9
	IAF		-	-	0,40	0,71	-	9

Na análise da influência do ângulo azimutal de iluminação sobre as medidas radiométricas e suas relações com os parâmetros agrônômicos das duas espécies vegetais estudadas, os resultados não permitiram identificar qualquer alteração que possa ser atribuída a este fator. Os valores dos coeficientes de correlação e os níveis de significância sofreram poucas alterações nos três ângulos investigados. Os perfis espectrais apresentados nas **figuras 2 e 3** representam o comportamento das medidas espectrais em função do tempo, que, tanto em forma como em escala, não se alteraram significativamente para os ângulos de iluminação de 45 e 90 graus. Estes resultados contrariam a literatura (Colwell, 1974) e devem ser analisados com cuidado em face das características específicas dos experimentos a que se referem.

Ainda sobre as **figuras 2 e 3** é interessante notar que existiu uma forte diferença na capacidade das medidas em captar a evolução temporal das alterações ocorridas nas plantas. No caso do feijão, que teve um desenvolvimento mais rápido, já na primeira medida aparece um alto valor tanto para a banda 4 como para a DN, e há apenas uma pequena queda destes valores ao final, com a indução de senescência via supressão da irrigação. Já no caso da soja, como o desenvolvimento foi muito mais lento devido às baixas temperaturas, a frequência amostral de uma semana foi suficiente para acompanhar a evolução da cultura com mais detalhes, e pode se perceber maiores variações na curva espectral, tanto no início como no final (provavelmente devido ao estresse inicial, a soja foi muito mais afetada pela suspensão da irrigação, o que resultou em um grande número de plantas mortas no momento da última medição).

Figura 2. Resposta espectral do feijão com ângulo azimutal de iluminação de zero grau

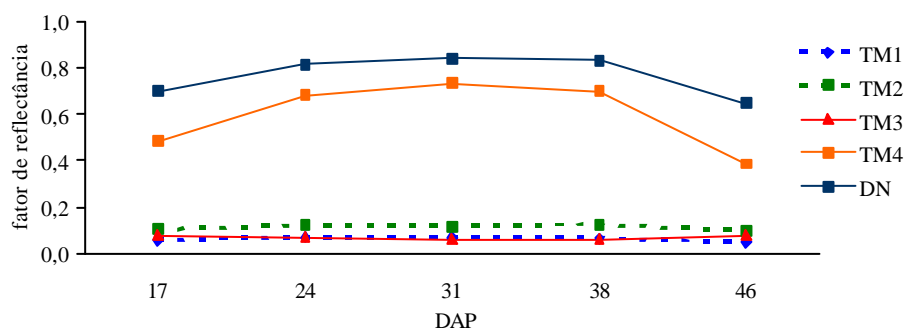
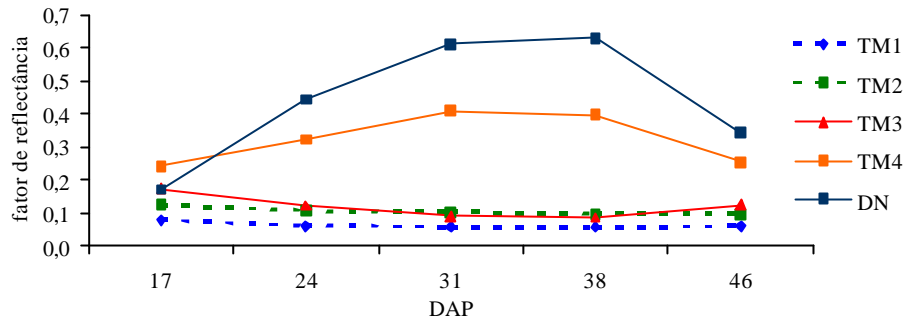


Figura 3. Resposta espectral da soja com ângulo azimutal de iluminação de zero grau



4 Conclusões

Ficou confirmada a existência de uma estreita associação entre os valores das bandas 3 e 4 do TM/Landsat e do índice de vegetação baseado na sua diferença normalizada (DN) com o peso verde (PV) da soja e com o teor de clorofila (TC) do feijão. Nas condições experimentais não foi possível identificar influência do ângulo azimutal de iluminação sobre as medidas radiométricas realizadas.

Como resultado da experiência obtida na condução e análise deste trabalho, são sugeridos a seguir alguns cuidados para diminuir os riscos e melhorar os resultados em futuros experimentos laboratoriais de radiometria com espécies vegetais cultivadas.

Por causa do desenvolvimento incompleto nas condições do experimento, o peso de cada planta é bem pequeno, da ordem de gramas e até frações de gramas; com base nisso, recomenda-se o uso de balanças eletrônicas de precisão para a obtenção desta variável, associado, se possível, a adoção de um procedimento experimental que permita aumentar o número de plantas passíveis de serem pesadas.

As culturas devem ser preferencialmente semeadas nas épocas normalmente recomendadas para o seu cultivo ou em locais com possibilidade de controle da temperatura e demais condições ambientais, para evitar desuniformidade de germinação e desenvolvimento.

Devem ser utilizadas sementes de variedade conhecida, com alto vigor e elevado percentual de germinação. De preferência, as sementes devem ser tratadas para diminuir os riscos de pragas e doenças. O solo utilizado como substrato deve ser conhecido e ter suas características físico-químicas determinadas.

Deve-se dar preferência a um maior número de unidades amostrais (UA) de tamanho menor (UA = caixa no caso presente), com apenas uma medida de cada variável por UA. Consequentemente, deve-se evitar tanto as UAs grandes, pois dificultam o manuseio em condições de laboratório, como a realização de mais de uma medida da mesma variável por UA, pois isto aumenta o custo e a complexidade das análises sem uma correspondente melhoria na exatidão e interpretabilidade dos resultados.

Nas condições artificiais do experimento, com superadensamento de plantas, irrigação, controle de pragas, doenças e ervas daninhas, etc., a velocidade de mudança dos parâmetros agrônômicos no início do ciclo é muito alta. É recomendável, portanto, que a frequência amostral

seja maior no período que vai do plantio ao recobrimento total do solo pelas plantas, diminuindo a partir de então.

Referências

- ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.64, p. 234-253. 1998.
- CHEN, C. S.; TARDINA, A. T.; BATISTA, G. T. **Índices vegetativos e suas aplicações na agricultura**. São José dos Campos, INPE, 1986. 24p. (INPE 3912 – MD/030).
- COLWELL, J. E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.3, p. 175-183. 1974.
- EPIPHANIO, J. C. N.; HUETE, A. R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effects on FAPAR relationships in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, v.51, p. 351-360. 1995.
- GALLO, K. P.; DAUGHTRY, C. S. T. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. **Agronomy Journal**, v.78, p. 752-756. 1986.
- HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, p. 295-309. 1988.
- KNIPPLING, B. E. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.1, p. 155-159. 1970.
- MIDDLETON, E. M. Solar zenith angle effects on vegetation indices in tallgrass prairie. **Remote Sensing of Environment**, v.38, p. 45-62. 1991.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 308p.
- PRICE, J. C. How unique are spectral signatures? **Remote Sensing of Environment**, v.49, p. 181-186. 1994.
- STEFFEN, C. A.; OLIVEIRA, J. L. DE; GAMA, F. F. **Programa ESPECTRO manual de referência**. São José dos Campos: INPE, 1996. 11p. (INPE 5737 – MAN/07).
- STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C. DE. **SPECTRON SE-590 Manual de referência**. São José dos Campos, INPE, 1988. 15p. (INPE 5647 – MAN/05).