

**Influência do ângulo de visada na resposta espectral da cultura do feijão
(*Phaseolus vulgaris* L.)**

Priscylla Ferraz ¹
Rubens Angulo Filho ¹
Sônia Maria De Stefano Piedade ¹
Rodrigo Otávio Câmara Monteiro ¹

¹ Universidade de São Paulo – USP/ESALQ
Caixa Postal 9 - 13418-900 - Piracicaba - SP, Brasil
{ferraz, ruangulo, soniamsp, rocamara}@esalq.usp.br

Abstract: The objective of this research was to evaluate the influence of the viewing angles (0°, 30° and 45°), on the spectral behavior of bean crop, as well as on the relationship between Leaf Area Index (LAI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The experiment was installed in the “Fazenda Areão”, of the ESALQ/USP, in Piracicaba, SP, from March to June, 2005. The experimental design was the randomized blocks, with three treatments (viewing angle) and three blocks. Nine field campaigns were carried out with the SPECTRON SE-590 spectroradiometer. Bands TM₃ e TM₄ were simulated from the determined reflectance factors and, with these bands, vegetation indices were generated. According to the results, it was concluded that the variation in the viewing angle significantly affected ($p \leq 0,05$) the reflectance factor in the TM₃ and TM₄ bands, for every day of measurement. Regarding the relationships between LAI and NDVI, the linear model showed good fit ($p \leq 0,05$).

Palavras-chave: remote sensing, reflectance, spectral behavior, sensoriamento remoto, reflectância, comportamento espectral.

1 Introdução

Com o avanço da tecnologia e a necessidade de um maior controle sobre os fatores que influenciam o pleno desenvolvimento das culturas, tornou-se necessário estimar algumas de suas variáveis biofísicas, para que sirvam como dados de entrada para os atuais modelos de crescimento e de produtividade agrícola. Assim sendo, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto e particularmente a utilização de valores espectrais, podem contribuir em muito para a melhoria desse processo, ao servir como bons indicadores das condições gerais de vigor da cultura.

Uma importante técnica utilizada na agricultura é a espectrorradiometria, pois permite obter medidas ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas, sob condições mais favoráveis, em termos de influência atmosférica, do que os dados coletados por sensores remotos a bordo de satélites (DEERING, 1980).

Apesar da complexidade dos sistemas vegetados, tem-se procurado avaliar alguns parâmetros espectrais descritores das condições de desenvolvimento desses sistemas (EPIPHANIO; FORMAGGIO, 1991; EPIPHANIO; LEONARDI; FORMAGGIO, 1994). Para Ponzoni (2001), os índices de vegetação servem como indicadores do crescimento e vigor da vegetação, e podem ser utilizados para diagnosticar vários parâmetros biofísicos, com os quais apresentam altas correlações, incluindo índice de área foliar.

Os índices mais comuns são aqueles provenientes de medidas da reflectância de dosséis de vegetação, nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético.

Huete (1997) verificou que sensores terrestres proporcionam informações básicas para a calibração e entendimento de dados orbitais.

Juntamente com o objetivo de entender a relação existente entre características do dossel e índices de vegetação, faz-se necessário conhecer a estabilidade desses índices quanto às condições de iluminação e detecção do alvo, sendo que os alvos agrícolas, onde a reflectância mostra-se dependente das posições do Sol e do sensor. Esses sensores principalmente quando não visam a nadir, podem produzir dados espectrais adquiridos numa geometria muito particular.

Como os sensores a bordo de satélites podem adquirir imagens sob diferentes ângulos de visada, torna-se necessário o conhecimento do efeito dessa variável sobre a resposta espectral das culturas. Tem-se como exemplo, os sensores HRV/SPOT ($\pm 27^\circ$ perpendicular à trajetória), o sensor AVHRR/NOAA ($\pm 56^\circ$ perpendicular à trajetória) e o sensor CCD/CBERS ($\pm 32^\circ$ perpendicular à trajetória), com a capacidade de orientar seu campo de visada podendo coletar informações de alvos da superfície terrestre fora da posição perpendicular à linha de deslocamento do satélite.

Diante deste contexto, estabeleceu-se a hipótese de que com a mudança do ângulo de visada, haveria diferença entre os valores do fator de reflectância medido.

Assim, a presente pesquisa avaliou a influência de três ângulos de visada (0° , 30° e 45°), na resposta espectral da cultura do feijão, como também, nas relações entre Índice de Área Foliar (IAF) e o Índice de Vegetação Diferença Normalizada (NDVI).

2 Material e métodos

O experimento foi conduzido no período de 14 de março a 24 de junho de 2005 em uma área de 42,4 m x 100,0 m, na “Fazenda Areão”, pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), sob responsabilidade do Departamento de Engenharia Rural, localizada no município de Piracicaba, SP. O material utilizando foi o cultivar de feijão

Pérola (linhagem LR 720982 CPL53). O espaçamento adotado foi de 0,40 m entre linhas com a orientação das fileiras no sentido norte-sul.

O solo no qual foi instalado o experimento é classificado, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos desenvolvido pela EMBRAPA (1999), como um Nitossolo Vermelho Eutrófico.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados com três tratamentos referentes aos ângulos de visada (nadir, 30°, 45°) e constituído de três blocos (repetições).

Foram realizadas nove campanhas radiométricas, durante o ciclo da cultura, tendo início no dia 30 de março de 2005, 16 dias após o plantio, e encerradas no dia 14 de junho de 2005, dez dias antes da colheita.

Para a análise da variância, foram escolhidas cinco datas (D₁, D₂, D₃, D₄ e D₅) representativas do ciclo do feijoeiro, referentes aos estádios fenológicos V₂, V₄, R₈ e R₉ (**Tabela 1**).

Tabela 1 – Datas representativas das fases do ciclo do feijoeiro

Leitura	Data	Dias após a semeadura	Dia Juliano	Estádio Fenológico	Características
1	30/03	16	89	V ₂	50 % - folhas primárias
2	14/04	31	104	V ₄	50 % - 3ª folha trifoliolada
3	17/05	64	137	R ₈	50 % - enchimento de vagens
4	31/05	78	151	R ₉	Maturação - secagem
5	07/06	85	158	R ₉	Maturação - secagem

Após ser realizada a análise de variância, os tratamentos foram comparados pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

As medidas radiométricas foram realizadas aproximadamente a cada 10 dias, sendo realizadas sempre no mesmo horário (12:00 horas), uma vez que a resposta máxima no FR na região do visível ocorre para o meio dia solar ou para azimutes relativos próximos de zero grau, quando as entrelinhas estão completamente iluminadas (LORD et al., 1988). Neste horário, foram obtidas medidas radiométricas nos ângulos de 0° (nadir), 30° e 45°, nos três pontos de leitura (blocos).

Na radiometria de campo foi utilizado um espectrorradiômetro portátil, SPECTRON SE-590, desenvolvido pela Spectron Engineering Incorporation, Denver, Colorado, EUA. A regulagem do ângulo de visada desejado (0°, 30° ou 45°), foi feita no encaixe da placa que sustenta as duas unidades detectoras, com o mastro.

O campo de visada dos ângulos nadirais 0°, 30° e 45°, possuem, respectivamente, um diâmetro de 0,79 m de circunferência (0,49 m² de área), 1,06 m (0,66 m² de área) e 1,60 m (0,99 m² de área) do diâmetro maior da elipse, conforme mostra a **Figura 1**.

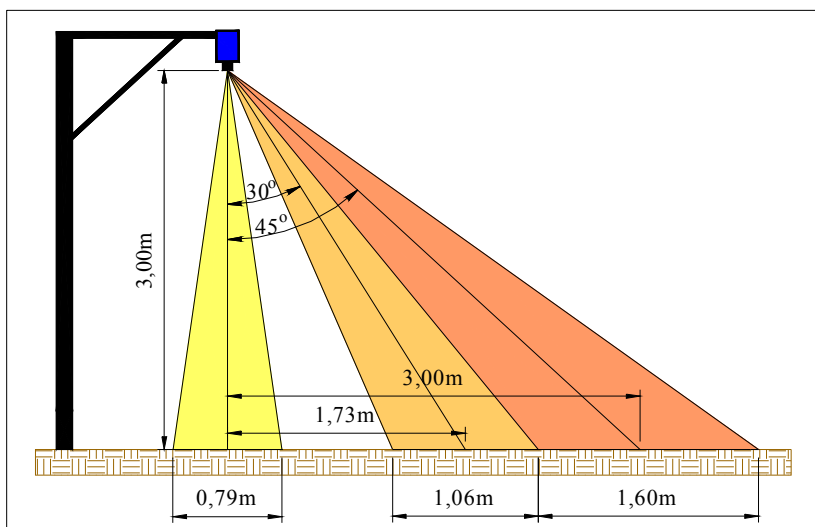


Figura 1 - Medidas do campo de visada dos ângulos zenitais 0°, 30° 45°.

As medidas radiométricas foram sempre trabalhadas com o objetivo de se conhecer os valores do fator de reflectância (FR) médio, correspondente às bandas TM₃ e TM₄ do satélite Landsat, bem como os valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI) de cada uma das campanhas realizadas. O valor de NDVI foi calculado por meio da seguinte equação:

$$NDVI = (TM_4 - TM_3) / (TM_4 + TM_3)$$

Onde:

TM₄ - é o fator de reflectância medida na faixa espectral do infravermelho próximo (760 nm a 900 nm);

TM₃ - é o fator de reflectância medida na faixa espectral do vermelho (630 nm a 700 nm).

Após a coleta dos dados, procedeu-se à calibração dos dados coletados, por meio de um programa computacional denominado “ESPECTRO”.

As medidas do índice de área foliar (IAF) foram realizadas por meio de um método não destrutivo, utilizando-se o equipamento Plant Canopy Analyzer, LAI-2000 da LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska, EUA.

Para estimar o IAF, as medidas de radiação difusa, acima e abaixo do dossel do feijão, foram tomadas nas mesmas posições dentro da área experimental em três pontos pré-estabelecidos. As coletas foram realizadas uma vez por semana, desde o estágio de floração até a maturação.

Pretendendo-se conhecer o comportamento do NDVI obtido a partir do FR das bandas TM₃ e TM₄, para os diferentes ângulos de visada, plotou-se os dados num gráfico de maneira a visualizar a variação destes durante o ciclo da cultura. Para a relação NDVI-IAF, determinou-se através da análise de variância da regressão o grau de significância do modelo linear para cada ângulo de visada e seus respectivos coeficientes de correlação.

3 Resultados e discussão

Na **Tabela 2** estão contidos os valores das médias dos FR nas bandas TM₃ e TM₄, para os ângulos de visada 0°, 30° e 45°, analisados pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Tabela 2 - Teste de Tukey para os valores médios do fator de reflectância nas bandas TM₃ e TM₄, nos diferentes ângulos de visada – Piracicaba, SP, 2005

Bandas	Ângulo	D ₁	D ₃	D ₆	D ₇	D ₈
TM ₃	0°	-	0,0500 a	0,0233 a	0,0211 a	0,0267 a
	30°	-	0,0555 ab	0,0255 a	0,0288 a	0,0311 ab
	45°	-	0,0600 b	0,0355 b	0,0444 b	0,0378 b
TM ₄	0°	0,1066 a	0,0866 a	0,2566 a	0,2367 a	0,2111 a
	30°	0,1100 a	0,1044 b	0,3511 ab	0,3667 a	0,2889 ab
	45°	0,1222 b	0,1244 c	0,4277 b	0,5411 b	0,3789 b

Observa-se que, para os FR nas bandas TM₃ e TM₄, o ângulo de 0° difere estatisticamente, em nível de 5% de probabilidade, do ângulo de 45°.

Concordando com Gleriani, não houve diferença significativa entre os ângulos de visada 0° e 30°, mas, ocorreu diferença significativa entre os ângulos de 0° e 45°. Uma possível explicação de acordo com Jensen (2000), seria devido ao retroespelhamento (“backscattering”), pois com o aumento do ângulo de visada o sensor registraria as superfícies que estão diretamente iluminadas, detectando menores superfícies sombreadas e com isso causando um acréscimo no fator de reflectância.

Sandmeier e Itten (1999), trabalhando com grama (*Lolium perenne* L.) e mantendo constante o ângulo nadiral de +35°, obtiveram fotografias individuais do mesmo dossel de grama nos ângulos de 0° (nadir), ± 45° e ±75° off-nadir, onde observaram que a imagem obtida pelo ângulo de +75° aparentou ser a mais clara, tendo em vista o menor grau de sombreamento devido à diminuição da proporção dos componentes inferiores do dossel.

A **Figura 2** mostra a variação do FR observado nas bandas TM₃ e TM₄, ao longo do ciclo da cultura do feijão, em resposta aos ângulos de visada.

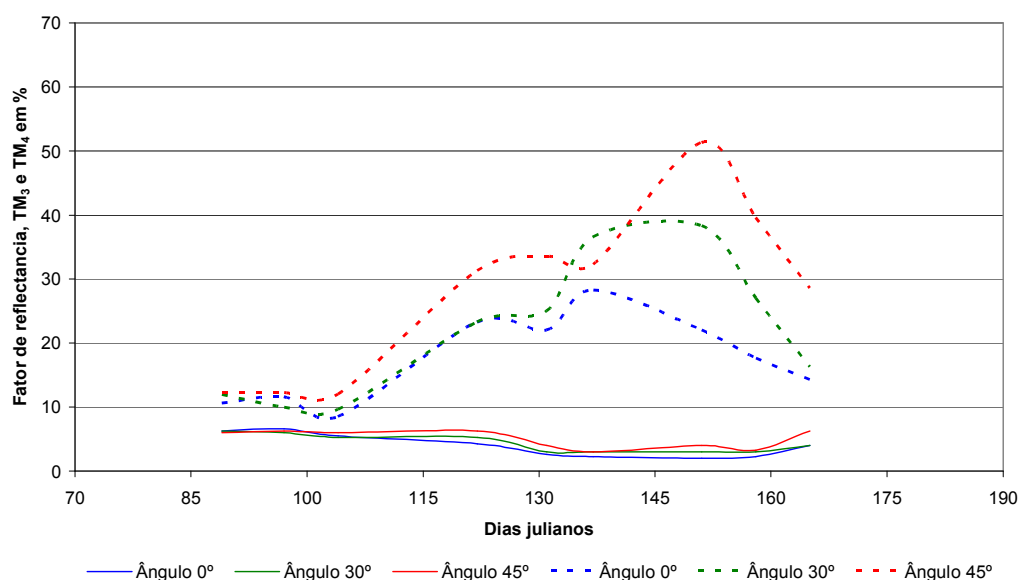


Figura 2. - Variação do fator de reflectância nas bandas TM₃ (curva contínua) e TM₄ (curva tracejada), obtidos ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 12:00 horas, para os ângulos de visada 0°, 30° e 45°.

Observa-se que a variação do FR na banda TM₃, para os diferentes tratamentos, apresentou uma tendência semelhante. Percebe-se, também, que no início do desenvolvimento

da cultura, em função da baixa porcentagem de cobertura vegetal em função da menor absorção da radiação solar, e também devido a grande influência da reflectância do solo, o valor do FR na banda TM_3 é maior.

De acordo com Moreira (1997) é importante ressaltar que, com o aumento do vigor da vegetação, aumentaram os valores de reflectância da banda TM_4 , ocorrendo o inverso com os valores da banda TM_3 . Entretanto, na banda TM_4 verifica-se que houve maior variação nos valores do FR, quando comparados aos valores obtidos na banda TM_3 .

A variação do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI) com os dias do ciclo da cultura, obtidos a partir dos fatores de reflectância nas bandas TM_3 e TM_4 , são apresentados na **Figura 3**.

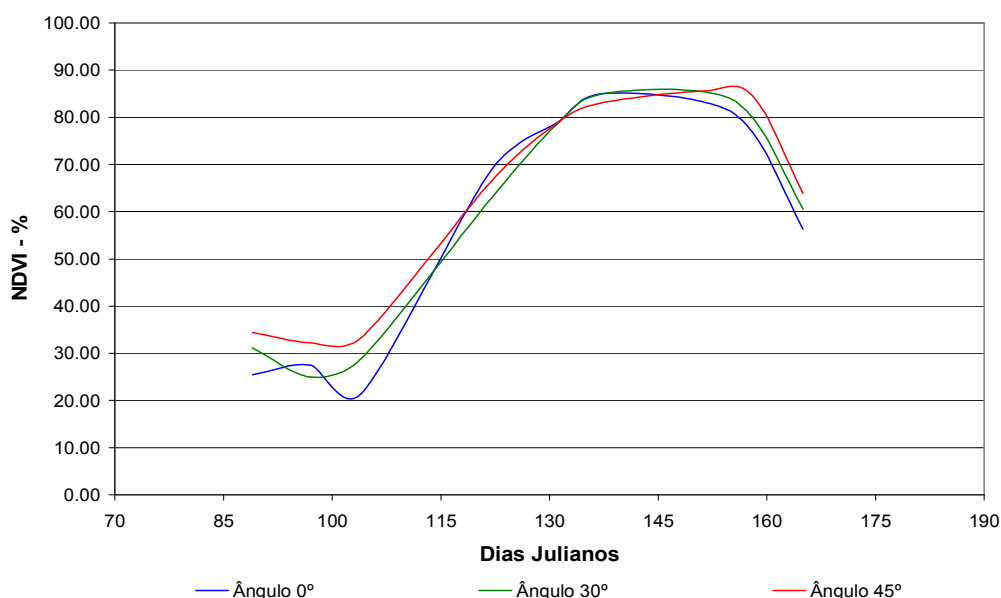


Figura 3 - Índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtido ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 12:00 horas, sob diferentes ângulos de visada - Piracicaba, SP, 2005

Analisando a trajetória do NDVI, nota-se que independente do tratamento, o comportamento ao longo do ciclo da cultura foi semelhante, ou seja, todos apresentaram forma de parábola. Comportamento semelhante também foi encontrado por Formaggio (1989) e Moreira (1997).

Pode-se observar que no comportamento parabólico do NDVI ao longo do ciclo da cultura, em todos os tratamentos, houve um crescimento constante dos valores, chegando a atingir um pico, onde, a partir deste, iniciou uma queda contínua até o final do ciclo.

Para se avaliar a existência da possível relação entre o NDVI e o IAF, do feijoeiro, foi realizada a análise de variância para regressão linear simples (**Tabela 3**).

Tabela 3 – Resumo dos resultados da análise de variância para regressão simples da relação IAF-NDVI.

Horário	Ângulo	Modelo	R	Teste F
12 horas	0°	$NDVI = 0,2765.IAF + 0,0046$	0,91	0,0048
	30°	$NDVI = 0,2414.IAF + 0,1046$	0,88	0,0089
	45°	$NDVI = 0,2164.IAF + 0,1854$	0,85	0,0144

Examinando-se os parâmetros de regressão obtidos, pode-se afirmar que, dentro das condições estabelecidas neste estudo evidenciou-se uma correlação positiva forte, segundo Shimakura (2002), entre o NDVI e o IAF.

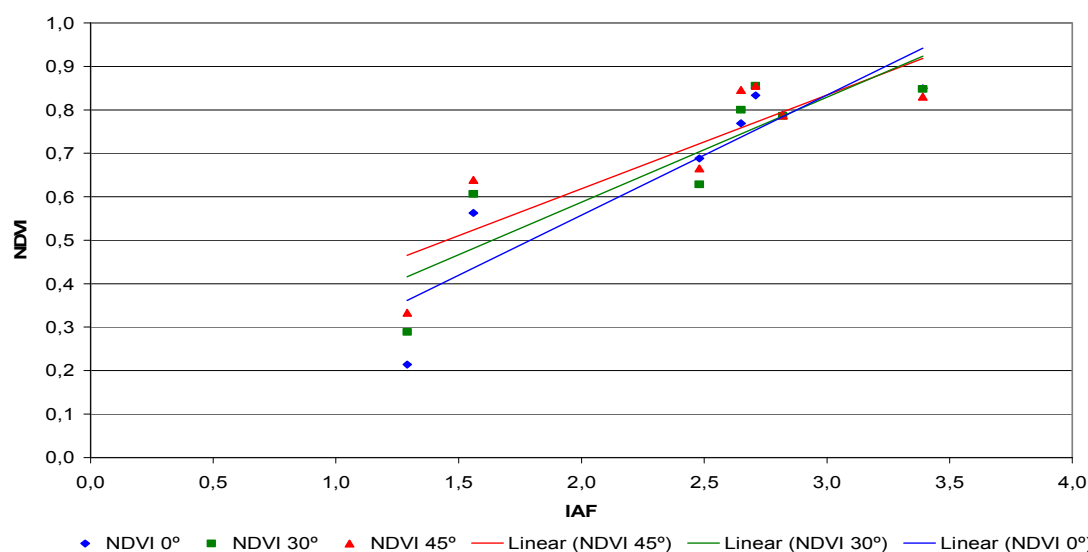


Figura 4 - Regressão dos valores de NDVI com os valores observados para o IAF, no horário das 12:00 horas nos diferentes ângulos de visada

4 Conclusões

De acordo com os objetivos propostos e a análise dos dados obtidos, chegou-se as seguintes conclusões:

A variação do ângulo nadiral de visada influenciou significativamente, ao nível de 5% de probabilidade, os FR nas bandas TM_3 e TM_4 , havendo diferença entre o ângulo 0° e 45°.

O modelo linear apresentou, por sua vez, ajustes adequados para as relações NDVI-IAF, permitindo assim, de maneira significativa, a estimativa do NDVI a partir dos resultados encontrados para o IAF. Desta forma, os modelos para os três ângulos poderiam ser invertidos e utilizados para estimar a variável biofísica NDVI.

5 Referências bibliográficas

DEERING, D. W. Field measurements of bidirecional reflectance. In: ASRAR, G. (Ed.). **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: John Wiley, 1980. p.14-61.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informações, 1999b. 412p.

EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento remoto de três parâmetros biofísicos de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, p.1615-1624, 1991.

EPIPHANIO, J. C. N.; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, A. R. Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, p.439-447, 1994.

GLERIANI, J. M. **Influência do solo de fundo e da geometria da radiação na resposta espectral da cultura do feijão**. São José dos Campos, 1994. 87p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

HUETE, A. R. Extension of soil spectra to the satellite: Atmosphere, geometric and sensor considerations. **Photo Interpretation**, New York, v.34, p.101-118. 1997.

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: Na Earth Resource Perspective**. New Jersey, 2000. 554 p.

MOREIRA, M. A. **Déficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agrônômicos**. Piracicaba, 1997. 142p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p.157-195.

SANDMEIER, S. R.; ITTEN, K. I. Field Goniometer System (FIGOS) for Acquisition of Hyperspectral BRDF Data, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v.37, p.978-986, 1999.

SHIMAKURA, S. E. Estatística II, 2002. Disponível em:

<http://www.est.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html>. Acesso em 20 agosto 2006.