

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NO SENSORIAMENTO REMOTO DA CULTURA DO FEIJÃO¹

JOSÉ C. N. EPIPHANIO², JOSÉ M. GLERIANI³, ANTONIO R. FORMAGGIO e BERNARDO F. T. RUDORFF²

RESUMO - As aplicações de sensoriamento remoto em estudos de culturas agrícolas têm feito uso extensivo dos índices de vegetação (IVs). Constituídos de duas ou mais bandas, servem para realçar as feições de vegetação e ao mesmo tempo minimizar efeitos espúrios, como solos ou efeitos angulares, ou ainda efeitos atmosféricos. Não se formou ainda opinião unânime sobre as propriedades dos IVs, ou seja, não existe consenso sobre a utilização dos diversos IVs nas situações variadas que existem na natureza. Este trabalho visa fazer uma avaliação de três dos mais importantes IVs quanto a suas variações, em função de três parâmetros relevantes em sensoriamento remoto: solos, ângulos de visada e ângulos de iluminação, num experimento fatorial com feijão, em quatro estádios de desenvolvimento. Constatou-se que as influências dos fatores sobre as bandas individuais constituintes dos IVs foram relevantes na compreensão dos efeitos sobre os IVs. Os IVs apresentaram diferenças significativas quanto aos solos, nos quatro estádios de crescimento da cultura. Já o ângulo de visada influenciou de forma significativa o NDVI (Índice de Vegetação Diferença Normalizada) no estádio inicial de crescimento do feijão. Os IVs não foram afetados quanto ao ângulo de iluminação, quando a cultura cobriu totalmente o solo. Além disso, houve saturação do NDVI, enquanto o SAVI (Índice de Vegetação Ajustado para Solo) e o PVI (Índice de Vegetação Perpendicular) continuaram a responder aos tratamentos, principalmente em decorrência de suas sensibilidades ao infravermelho.

Termos para indexação: radiometria, reflectância, ângulo de visada, ângulo de iluminação, solo.

VEGETATION INDICES FOR REMOTE SENSING OF BEANS (*PHASEOLUS VULGARIS* L.)

ABSTRACT - Vegetation indices (VIs) are an important tool in remote sensing of vegetation. These VIs are composed of two or more single bands and they are supposed to minimize some intervening effects such as soil background, view and illumination angles and atmospheric effects. However, there is a lack of knowledge on how different VIs behave on a developing crop over different soils and submitted to different viewing conditions; the exact role the bands play in the VIs under those conditions is to be understood. This paper describes an experiment in which bean (*Phaseolus vulgaris* L.) was planted on the same soil, but in a changing three soil backgrounds, under two view angles and four times of the day, in four dates along the crop cycle, and in randomly blocks design. It is shown that the analysis of individual bands is very important for understanding the behavior of VIs. Soils were statistically significant in all stages analyzed for the three VIs; however, the view angle was significant only for NDVI and for low ground cover. The illumination angle was significant for all VIs and for all ground covers, except for 100%. Moreover, there was an expected NDVI saturation as the ground cover increased while the SAVI and PVI keep on responding to treatments, mainly in function of their sensitivities to near infrared.

Index terms: radiometry, reflectance, view angle, illumination angle, soil.

¹ Aceito para publicação em 28 de março de 1996.

² Eng. Agr., Dr., Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Sensoriamento Remoto, Av. dos Astronautas, 1758, CEP 12227-010 São José dos Campos, SP.

³ Eng. Agr., M.Sc., INPE.

INTRODUÇÃO

As aplicações de sensoriamento remoto têm-se espalhado pelos mais diversos campos do conhecimento. Isso se deve principalmente à facilidade de acesso aos dados de sensores remotos, à disponibi-

lidade de equipamentos adequados ao processamento de informações e à crescente necessidade de compreensão do funcionamento dos diversos sistemas componentes da Terra. Na agricultura brasileira, encontram-se aplicações em áreas como: identificação de culturas (Epiphanyo et al., 1990), conservação do solo (Formaggio et al., 1992), deficiência hídrica (Epiphanyo, 1983) e estimativa de produtividade (Rudorff & Batista, 1990a, 1990b, 1991). Apesar de oferecer uma série de aplicações, as conexões precisas entre variáveis de sensoriamento remoto e sistemas biofísicos bastante complexos representam um dos grandes desafios de pesquisa em sensoriamento remoto.

A vegetação *per se* é um alvo complexo do sensoriamento remoto. Apresenta propriedades de reflexão foliar variadas numa mesma planta, múltiplos componentes refletores, não-uniformidade de estrutura inter e intraplantas. Assenta-se sobre um substrato constituído de solo e restos vegetais que, por sua vez, apresentam propriedades de reflexão próprias. Além disso, no processo de medição da energia proveniente desse sistema, as configurações angulares do iluminante e dos instrumentos de medição contribuem para a modulação das propriedades de reflexão da vegetação.

Apesar da complexidade dos sistemas vegetados, tem-se procurado avaliar alguns parâmetros espectrais descritores das condições de desenvolvimento desses sistemas (Epiphanyo & Formaggio, 1991; Epiphanyo et al., 1994). Tem-se conseguido, com algumas espécies, importantes relacionamentos entre propriedades espectrais e propriedades biofísicas dessas comunidades, tais como: índice de área foliar, fitomassa, percentagem de cobertura do solo, concentração de clorofila e fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel.

As variáveis espectrais de sensoriamento remoto podem ser representadas de diversas formas. A mais simples, tratando-se de sensoriamento remoto na faixa óptica do espectro eletromagnético, é a reflectância numa banda simples (por exemplo, vermelho ou infravermelho). Outra, muito usual, é aquela na qual as informações de reflectância portadas por cada banda individual são agrupadas de uma maneira específica, no que se denomina índice de vegetação (IV) (Wiegand et al., 1991). Têm surgido

diversos tipos de agrupamentos de bandas, entre os quais destacam-se as razões, normalizações, distâncias no espaço cartesiano, e suas variantes. Em geral, tais índices realçam o componente espectral da vegetação e correlacionam-se com os parâmetros biofísicos da vegetação, como biomassa, índice de área foliar (IAF), percentagem de cobertura vegetal (Epiphanyo & Formaggio, 1991). São, ademais, amplamente utilizados em estudos relacionados com a cobertura vegetal em geral. Para Asrar et al. (1984), os IVs são mais sensíveis do que as bandas individuais, quando relacionados com parâmetros biofísicos da vegetação. Em alguns casos, minimizam efeitos indesejáveis do solo ou da atmosfera (Huete et al., 1994).

Como os sistemas satélites podem adquirir imagens em diversos solos (distribuídos espacialmente), horários (cada sistema tem um horário característico de passagem) ou ainda sob diferentes ângulos de visada (variável em função do campo de visada do sensor ou de mecanismos de redirecionamento de visada), é necessário um conhecimento da magnitude do efeito dessas variáveis sobre a resposta espectral da vegetação.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de três índices de vegetação em condições variáveis de solo, ângulo de visada e ângulo de elevação solar, ao longo do ciclo da cultura do feijão.

MATERIAL E MÉTODOS

Índices de vegetação

Os IVs são transformações lineares de bandas espectrais, geralmente nas faixas do vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP) do espectro eletromagnético. Segundo Baret et al. (1989), estas duas bandas contêm mais de 90% da variação da resposta espectral da vegetação. Rouse et al. (1974) propuseram o IV denominado "normalized difference vegetation index" (NDVI), definido pela seguinte equação:

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad (1)$$

Para minimizar os efeitos da resposta espectral do solo de fundo na vegetação, Richardson & Wiegand (1977) propuseram o IV denominado "perpendicular vegetation index" (PVI), que representa, num plano cartesiano V vs. IVP, a distância perpendicular entre a reflectância de um dossel e a linha de solos:

$$PVI = \frac{(IVP - a \cdot V - b)}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (2)$$

onde a e b são coeficientes da linha de solos.

Huete (1988) observou que os valores da reflectância de um dossel sobre diferentes solos de fundo não são corretamente descritos pelos índices NDVI e PVI. Então, propôs o uso do IV denominado "soil adjusted vegetation index" (SAVI), que é derivado do NDVI, fazendo um deslocamento da origem do par ordenado V vs. IVP para o ponto de encontro da linha do solo com a linha da vegetação, pela adição de uma constante L:

$$SAVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V + L)} (1 + L) \quad (3)$$

A linha do solo é definida como a relação linear entre a reflectância do solo exposto no espaço V vs. IVP e pode ser descrita pela seguinte equação:

$$IVP = a \cdot V + b \quad (4)$$

A maioria dos IVs propostos supõe a existência de uma única linha de solos, onde as reflectâncias do vermelho e do infravermelho próximo estão diretamente relacionadas, o que, na maioria dos casos, pode ser considerado como verdadeiro, embora Baret et al. (1993) tenham apresentado diversos valores de a (inclinação) e b (intercepto). Para Huete et al. (1994), os critérios para validar um índice de vegetação incluem: a) maximizar a sensibilidade aos parâmetros biofísicos (preferencialmente com resposta linear); b) minimizar fatores, como ângulo de elevação solar, ângulo de iluminação e atmosfera; c) minimizar variações do fundo do dossel; d) permitir a comparação temporal e espacial das condições da vegetação. Muitos dos índices até hoje propostos são influenciados pelos solos de fundo (Huete et al., 1985), pela atmosfera (Jackson et al., 1983) e pela geometria de iluminação e observação (Jackson et al., 1990; Huete et al., 1992).

Experimento

Foi realizado um experimento no município de Pindamonhangaba, SP, na Estação Experimental do Instituto Agronômico de Campinas. Foram instalados três canteiros de 3x4 m, com três diferentes solos (latossolo roxo, latossolo pinda e areia), com três repetições. Sobre cada canteiro, variaram-se os tratamentos de ângulo zenital de visada (0° e 30°) e de elevação solar (horários de 10, 11, 12 e 13 horas). Nesses canteiros, foi plantado feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) variedade Maravilha, no alinhamento norte-sul, com espaçamento de 0,5 m entre fileiras. Adicionalmente, fizeram-se medições radiométricas sobre os diferentes solos, ao longo da estação de crescimento da cultura.

Foram feitas medições radiométricas ao longo do ciclo da cultura, utilizando-se um espectrorradiômetro (Spectron Modelo SE-590) de 252 bandas espectrais, na faixa de 400 a 1.100 nm. O espectrorradiômetro foi montado num mastro, a uma altura de 3 m. As medidas foram tomadas em dois ângulos zenitais de visada (0° e 30°), com azimute de 90° em relação ao norte. Foram obtidas quatro medidas para cada canteiro, em cada ângulo zenital de visada. Este procedimento foi repetido em quatro horários, em torno de 10, 11, 12 e 13 horas (diferentes ângulos de elevação solar). A cada quatro medidas sobre a cultura, foi obtida uma medida sobre uma placa de referência de sulfato de bário.

Posteriormente, os dados de radiância do alvo e da placa de referência foram convertidos em fator de reflectância (equação 5) e selecionaram-se as bandas TM3 (630 a 690 nm, vermelho) e TM4 (760 a 900 nm, infravermelho próximo) (bandas equivalentes às do sensor Thematic Mapper do satélite Landsat). A partir dos valores do fator de reflectância nestas bandas (TM3 e TM4), calcularam-se os índices NDVI, PVI e SAVI. Para o cálculo do índice SAVI, utilizou-se o valor de L igual a 0,5 que, segundo Huete (1988), minimiza a influência do solo de fundo para uma grande variação de índices de área foliar. Para o cálculo do PVI, utilizou-se uma linha global dos solos, que foi definida com base nos dados do fator de reflectância (FR) dos diferentes solos expostos, utilizados neste experimento.

$$FR = \frac{L_a(\theta_{i,r}, \phi_{i,r})}{L_p(\theta_{i,r}, \phi_{i,r})} \quad (5)$$

onde:

L_a e L_p , em unidades de $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$, são as radiâncias do alvo e da placa de referência, respectivamente;

θ e ϕ são ângulos de visada e de iluminação, respectivamente;

i e r são direções de incidência e de reflexão, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise dos índices de vegetação, compostos a partir das curvas de resposta espectral do feijão, foram selecionadas quatro fases distintas dentro do ciclo da cultura. Estas fases foram definidas em função de diferentes percentagens de cobertura vegetal durante a estação de crescimento (22, 51, 67 e 100% de cobertura vegetal). Os ângulos solares (zenital e azimutal) nos quatro horários de aquisição das medidas espectrais, em quatro fases de crescimento da cultura, são mostrados na Tabela 1.

A Fig. 1A mostra que a resposta espectral dos três solos utilizados apresentaram respostas espectrais distintas. O solo arenoso (areia) teve os maiores valores de reflectância ao longo do espectro analisado, enquanto os menores valores do fator de reflectância (FR) foram observados em latossolo roxo, conforme observado também por Epiphânio et al. (1992) e Valeriano et al. (1995). Valores intermediários de FR foram observados em latossolo pinda.

A Fig. 1B mostra a reta que foi obtida a partir do FR dos três solos estudados nas bandas do vermelho e do infravermelho. Os parâmetros de inclinação (a) e intercepto (b) desta relação são similares

àqueles apresentados por Baret et al. (1993). Esta reta é denominada linha de solos e representa o lugar geométrico dos fatores de reflectância acima do qual, teoricamente, encontram-se todos os pontos de um alvo com vegetação.

A Fig. 2 apresenta os valores do NDVI em relação aos três fatores analisados isoladamente: solos, ângulo de visada e ângulo solar. Observa-se que a resposta espectral dos solos interferiu no valor do índice NDVI em todas as fases da cultura, inclusive quando a cultura apresentou cobertura vegetal total (100%). Quanto aos ângulos zenitais de visada, houve influência apenas durante a fase inicial de crescimento (22% de cobertura vegetal). O ângulo de iluminação teve uma influência significativa no NDVI, nas coberturas vegetais de 22, 51 e 67%.

Pelas Figs. 3 e 4, observa-se que o índice PVI e o SAVI apresentam comportamentos iguais entre si e muito semelhantes ao NDVI, exceto quanto aos ângulos de visada, onde não houve diferença significativa entre o tratamento de 0° e o de 30° para nenhuma fase do ciclo analisada. A análise de variância indicou que, como fatores isolados, o solo, seguido do ângulo de iluminação (horário) foram os mais significativos em todos os índices de vegetação, influenciando o comportamento dos IVs, mesmo em níveis elevados de cobertura. A interação entre solo e ângulo de visada (Tabela 2) foi significativa apenas em latossolo roxo, para a menor cobertura e para o NDVI e o SAVI. A interação entre ângulo de visada e horário foi significativa para o PVI e SAVI, na cobertura de 22% (Tabela 3), e para o NDVI, na cobertura de 51% (Tabela 3). A interação entre solo e horário, e a interação entre os três fatores não foram significativas para nenhum índice de vegetação e em nenhuma cobertura.

Solos

De maneira geral, o NDVI foi menor no solo mais claro (areia) do que no mais escuro; o contrário ocorreu com o SAVI e o PVI (Figs. 2, 3 e 4).

Quando a radiação no vermelho interage com o dossel, ela é fortemente absorvida, e a pequena parcela que é transmitida encontra, no solo escuro, um baixo refletor. Como o NDVI é mais sensível ao

TABELA 1. Ângulos solares (zenital e azimutal) em quatro horários (10, 11, 12 e 13 horas), em diferentes dias do ano, correspondentes a quatro fases do ciclo da cultura (22, 51, 67 e 100% de cobertura vegetal).

Dia do ano (Juliano)	Ângulo solar (zenital/azimutal)				Cobertura vegetal média (%)
	10 h	11 h	12 h	13 h	
225	45/35	38/13	38/348	44/327	22
242	43/45	34/21	32/351	37/327	51
249	39/43	32/23	30/353	34/328	67
263	32/47	26/23	25/347	31/317	100

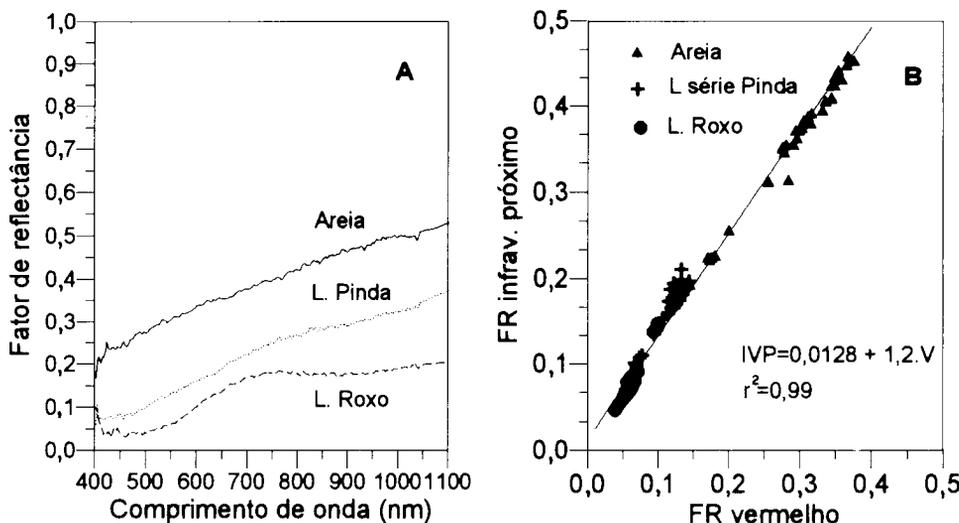


FIG. 1. A: fator de reflectância (FR) do latossolo roxo, do latossolo pinda e da areia; B: linha de solo no espaço vermelho (V) vs. infravermelho próximo (IVP).

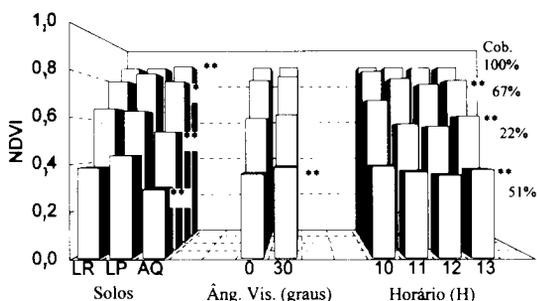


FIG. 2. Efeito do solo (LR = latossolo roxo, LP = latossolo pinda, AQ = areia), ângulo de visada (em graus) e horário (ângulo de iluminação, em horas) no índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), para quatro percentagens de cobertura vegetal do feijão (Cob). Os níveis de significância são indicados por: *p<0,05; **p<0,01. As demais diferenças não foram significativas.

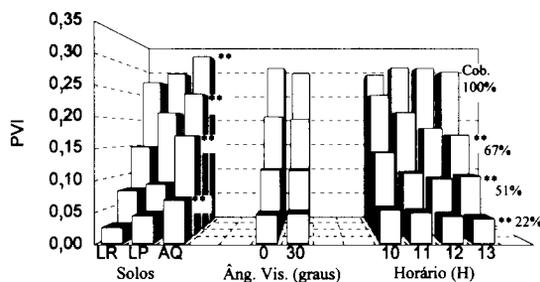


FIG. 3. Efeito do solo (LR = latossolo roxo, LP = latossolo pinda, AQ = areia), ângulo de visada (em graus) e horário (ângulo de iluminação, em horas) no índice de vegetação perpendicular (PVI) para quatro percentagens de cobertura vegetal do feijão (Cob). O nível de significância é indicado por: **p<0,01. As demais diferenças não foram significativas.

vermelho que ao infravermelho (Epiphanyo & Huete, 1995), uma diminuição da reflectância do solo no vermelho faz com que o NDVI aumente, já que o vermelho é subtraído no denominador (IV - V) da equação (1). No caso do SAVI, o fator L é somado ao denominador (IV + V + L), e entra somado à unidade como multiplicador no numerador

$[(1 + L) * (IVP - V)]$ da equação (3). Isso realça as diferenças entre infravermelho e vermelho no numerador e, ao mesmo tempo, funciona como um “tampão” em relação às variações do vermelho no denominador. Conseqüentemente, no caso do SAVI, há uma amplificação das variações do infravermelho. Isso explica os maiores valores de SAVI em solos

claros, mostrando que as variações do infravermelho sobrepõem-se às do vermelho. Como a correlação entre SAVI e PVI é alta em todos os estádios de desenvolvimento do feijão (particularmente na data 3, Fig. 5), seus comportamentos são muito similares, indicando também alta sensibilidade do PVI ao infravermelho.

Além disso, a significância estatística dos solos foi a 1% em todas as fases do ciclo analisadas e nos três índices de vegetação, indicando que houve uma influência diferenciada dos solos no comportamento

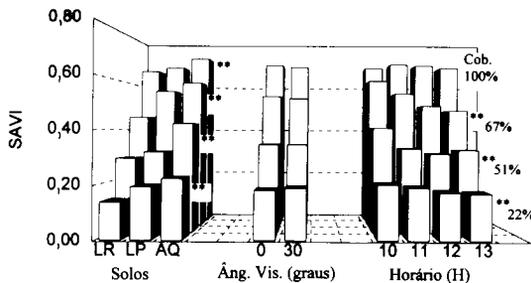


FIG. 4. Efeito do solo (LR = latossolo roxo, LP = latossolo pinda, AQ = areia), ângulo de visada (em graus) e horário (ângulo de iluminação, em horas) no índice de vegetação ajustado para solo (SAVI), para quatro percentagens de cobertura vegetal do feijão (Cob). Os níveis de significância são indicados por: ** $p < 0,01$. As demais diferenças foram não-significativas.

TABELA 2. Interação entre ângulo de visada e solos para os índices de vegetação NDVI, PVI e SAVI, na cobertura de 22%.¹

Solo	Ângulo de visada	NDVI	SAVI
L. Pinda	0°	0,4243 a	0,1932 a
	30°	0,4474 a	0,1975 a
Areia	0°	0,2878 a	0,2220 a
	30°	0,2941 a	0,2262 a
L. Roxo	0°	0,3564 a	0,1262 a
	30°	0,4118 b	0,1504 b

¹ Médias seguidas de letras iguais, na coluna e dentro do mesmo solo, não diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

dos índices. Embora haja significância estatística para diferença de médias entre os solos em todos os IVs, mesmo em 100% de cobertura, vê-se graficamente (Fig. 2) uma semelhança entre os valores de NDVI (menos acentuado para os outros dois IVs) nos três solos, em 100% de cobertura. Uma análise mais detalhada dos dados mostra que, à medida que a cultura se desenvolve, a média dos índices de vegetação aumenta e a variância diminui, fazendo com que o coeficiente de variação seja cada vez menor (por exemplo, o coeficiente de variação médio para

TABELA 3. Interação entre ângulo de visada e ângulo de elevação solar (horário de medição) para os índices PVI e SAVI, na cultura do feijão, a uma cobertura vegetal de 22%; e para o NDVI, a uma cobertura de 51%.¹

Ângulo de visada	Horário de medição	PVI	SAVI	NDVI
		22% cobertura	51% cobertura	
0°	10	0,0460a	0,1900a	0,7351a
	11	0,0485a	0,1891a	0,5820b
	12	0,0423a	0,1730a	0,5233b
	13	0,0431a	0,1776a	0,5648b
30°	10	0,0593a	0,2189a	0,6354a
	11	0,0491ab	0,1965ab	0,5712a
	12	0,0428ab	0,1783b	0,6065a
	13	0,0358b	0,1661b	0,6584a

¹ Médias seguidas pela mesma letra, na coluna e dentro do mesmo ângulo de visada, não diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

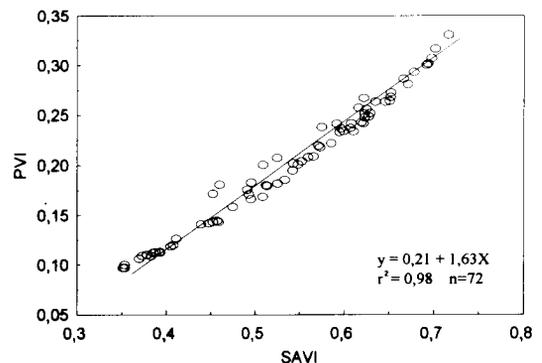


FIG. 5. Relação entre índice de vegetação ajustado para solo (SAVI) e índice de vegetação perpendicular (PVI) para a data 3 (cobertura de 67%).

o SAVI, nos três solos, foi de 13,2% na data 1 e de 5,9% na data 4). Isso fez com que pequenas variações espectrais na data 4 (100% de cobertura) causassem significância estatística. Isso é particularmente verdadeiro para o NDVI, no qual os coeficientes de variação nos três solos são inferiores a 1,1%, com um NDVI médio praticamente invariável e em torno de 0,88, na última data. Isso implica que, embora muitas vezes se possa ter uma significância estatística em diferentes condições, como solos, para um mesmo índice de vegetação, nem sempre essas diferenças poderão ser detectáveis num produto de sensoriamento remoto.

A significância estatística do fator solos para o SAVI e o PVI é mais visível graficamente do que no caso do NDVI. Como discutido anteriormente, o SAVI e o PVI apresentam maior sensibilidade ao infravermelho do que o NDVI. Assim, como num dossel a transmitância ao infravermelho é acentuada (da ordem de 50% para cada camada foliar), há uma penetração da radiação até o nível do solo e, portanto, o sinal de retorno é influenciado por uma eventual interação com o solo.

Do ponto de vista prático do uso do sensoriamento remoto, todos os índices de vegetação mostraram-se sensíveis a variações de solos. O fato, porém, de o NDVI ser estatisticamente sensível a diferenças de solos parece irrelevante, uma vez que há uma patente saturação quando a vegetação atinge níveis elevados de cobertura.

Ângulo de visada

O efeito do ângulo de visada foi estatisticamente significativo apenas para o NDVI e na primeira data (22% de cobertura). Nessa fase, a cultura estava com pequeno desenvolvimento, havendo grande percentagem de solo exposto nas entrelinhas. Sabe-se que o solo é anisotrópico em relação às condições de visada (Epiphanyo & Vitorello, 1984; Irons et al., 1992), tendo maior reflectância na direção do retroespalhamento do que na do ântero-espalhamento. O campo de visada do sensor a nadir é composto de solo iluminado, solo sombreado e plantas com faces iluminadas e sombreadas (Kimes et al., 1984). Quando se muda para o ângulo zenital de visada de

30°, na direção do retroespalhamento, os componentes iluminados passam a predominar no campo de visada do sensor. Como há uma grande percentagem de solo no campo de visada, é ele que imprime as características de reflexão da cena. Nesta situação, portanto, ocorre distinção entre as duas posições de visada. No caso das outras datas, é a cultura que domina o campo de visada do sensor; além disso, a pequena parcela de solo exposto encontra-se predominantemente sombreada, o que diminui as características de não-lambertianidade do solo. Nesta situação, não são esperadas sensíveis variações espectrais. Os índices de vegetação SAVI e PVI não mostraram diferenças significativas entre os dois ângulos, nem mesmo na primeira data, sugerindo que são resistentes às variações anisotrópicas de visada estudadas neste trabalho.

Horário de medição

O horário de medição afetou os três índices de vegetação, nas três primeiras datas (Figs.2, 3 e 4). Apenas quando a vegetação atingiu 100% de cobertura, o horário deixou de ser significativo. O horário de medição define a posição solar e, conseqüentemente, a geometria sob a qual ocorrerá a interação da radiação eletromagnética com o dossel. Essa interação é diferenciada em função da banda espectral que está sendo analisada. No caso do vermelho, em que há forte absorção da radiação eletromagnética, a extinção da luz dá-se nas primeiras camadas foliares; enquanto no infravermelho, no qual a transmissão e a reflexão foliares são altas, a interação da radiação ocorre até com as camadas mais baixas do dossel e, eventualmente, até com o solo.

Quando o ângulo zenital solar afasta-se da posição mais nadiral, a massa óptica do dossel aumenta, o que significa que mais camadas de folhas passam a fazer parte do percurso óptico da radiação. Quando aumenta a espessura óptica foliar, há uma maior absorção do vermelho, pois há maior volume de pigmentos foliares absorvedores no trajeto óptico da radiação. No caso do infravermelho, há aumento no número de elementos responsáveis pelos espalhamentos múltiplos e, conseqüentemente, é

esperado que isso cause um aumento da reflectância nesta faixa espectral.

O estágio de desenvolvimento da vegetação e a percentagem de cobertura do solo desempenham papel importante nesta interação. À medida que o ângulo zenital solar diminui, a possibilidade de um determinado feixe luminoso atingir diretamente o solo aumenta, e a de atingir diretamente uma parte vegetada do campo de visada diminui. Inversamente, à medida que há incremento do ângulo zenital solar, a possibilidade de o feixe luminoso atingir diretamente a planta aumenta e, conseqüentemente, o sombreamento do solo também aumenta. Assim, a reflectância final do dossel será um balanço ponderado entre todos esses fatores. Como o plantio foi no sentido norte-sul e a cultura do feijão obedece a um padrão de plantio em fileiras, tais efeitos tendem a ser maximizados.

Os índices de vegetação refletem em maior ou menor grau essas variações que ocorrem nas bandas; porém, dada a constituição diferenciada de cada índice, seus comportamentos são diferentes entre si. Por exemplo, ao tomar os três primeiros níveis de cobertura vegetal (Figs. 2, 3 e 4) observar-se-á, ao longo dos quatro horários de medição, que, enquanto a variação do NDVI assemelha-se a uma parábola invertida, o PVI e o SAVI apresentam um desvio em direção aos horários matutinos. Paralelamente, a observação da Fig. 6a mostra que o vermelho tem comportamento inverso ao do NDVI (Fig. 2), enquanto o infravermelho (Fig. 6b) assemelha-se ao comportamento do SAVI e do PVI (Figs. 3 e 4, respectivamente). Isso sugere ser o vermelho o principal condicionante do comportamento do NDVI, principalmente em níveis baixos ou intermediários de cobertura vegetal, enquanto o infravermelho desempenha esse papel para o SAVI e o PVI. Esse papel do infravermelho, como principal condicionante desses dois índices de vegetação, é reforçado, por exemplo, pelos valores acima de 0,98 para os r^2 das regressões lineares (não-mostradas) entre infravermelho e PVI e SAVI, na data em que a cobertura vegetal é de 100%. Além disso, há uma estreita relação entre esses dois índices de vegetação, haja vista seus comportamentos muito similares ao longo dos horários de visada, particularmente nos níveis mais altos de cobertura vegetal (Figs. 2 e 3).

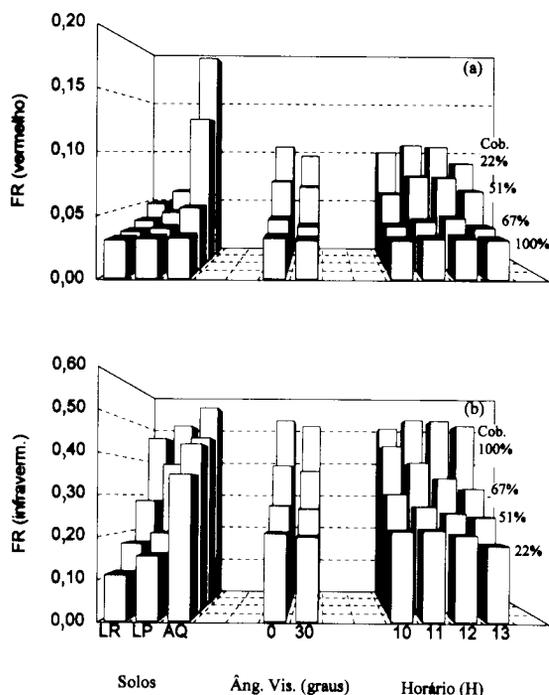


FIG. 6. Fator de reflectância para o vermelho (a) e infravermelho (b) para as condições experimentais. Não se procedeu à análise de variância para as bandas isoladas.

Realmente, o r^2 para a regressão entre os dois índices é sempre acima de 0,92 e se eleva com o aumento da percentagem de cobertura.

Interações entre os fatores

A interação entre solos e ângulos de visada (Tabela 2) foi estatisticamente significativa para NDVI e SAVI, porém apenas em latossolo roxo. Como o LR tem valores muito baixos de FR no infravermelho, o contraste entre os FRs do solo e da vegetação é muito elevado nessa região. Isso faz com que as composições dos campos de visada, a 0 e a 30 graus, sejam espectralmente diferentes nesses dois ângulos.

Na data 1 (22% de cobertura), a interação entre ângulo de visada e ângulo de elevação solar (Tabela

3) foi estatisticamente significativa para o PVI e o SAVI. Ocorrem diferenças nos horários extremos (10 e 13 h). Embora não haja grandes variações solares, já que neste intervalo horário o Sol varia pouco angularmente, a posição de 30° de visada às 10 h está numa posição de retroespalhamento e às 13 h, numa de ântero-espalhamento. Na posição de retroespalhamento, as reflectâncias no infravermelho são mais elevadas que na de ântero-espalhamento, fazendo com que os valores dos índices de vegetação se elevem e atinjam, eventualmente, um nível de significância estatística.

No caso da cobertura de 51% (Tabela 3) para o NDVI e para o ângulo de visada de 0°, apenas o horário de 10 h diferenciou-se estatisticamente dos demais. Neste horário, o Sol encontra-se numa posição em que o percurso óptico da radiação no interior do dossel é o maior para o conjunto de horários analisados. Isso provoca maior retroespalhamento do infravermelho e também maior sombreamento interno no dossel, diminuindo a reflectância no vermelho, com a conseqüente elevação do valor dos índices de vegetação, como se pode inclusive observar pela média maior no horário de 10 h.

CONCLUSÕES

1. Mesmo em condições de elevada cobertura do solo, há influência dos solos de fundo sobre os índices de vegetação.
2. A mudança isolada do ângulo de visada de 0 para 30 graus não apresenta efeito significativo sobre os índices de vegetação, salvo no caso do NDVI em cobertura de 22%.
3. O horário de medição é uma fonte significativa de variação sobre os índices de vegetação, exceto quando a cobertura é de 100%.
4. As interações mais significativas entre os fatores ocorrem quando a cobertura do solo é menor que cerca de 50%. A interação entre solo e ângulo de visada mostra que os índices têm comportamento diferenciado em função do ângulo de visada apenas em latossolo roxo, caracterizado por baixos albedos. No caso da interação entre os ângulos de

visada e de iluminação, quando a cultura tem baixa cobertura (22%), as visadas feitas nas posições extremas de retroespalhamento e ântero-espalhamento, e para o SAVI e o PVI são significativamente diferentes.

AGRADECIMENTOS

Ao Eng. Agr. Omar Vieira Vilella, ao Físico Francisco Assis, pelo apoio durante o experimento, e à Sra. Elizabeth Caria de Moraes, durante o tratamento dos dados radiométricos. O Eng. Agr. José M. Gleriani agradece ao CNPq pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS

- 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**, v.76, n.2, p.300-306, 1984.
- BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 12., 1989, Vancouver. **Proceedings...** Ottawa: Canadian Remote Sensing Society, 1989. p.1195-1197.
- BARET, F.; JACQUEMOUD, S.; HANOCQ, J. F. The soil line concept in remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, v.7, n.2, p.65-82, 1993.
- EPIPHANIO, J.C.N. Avaliação da condição hídrica da cultura do milho através de sensoriamento remoto termal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.18, n.11, p.1233-1241, 1983.
- EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Sensoriamento remoto de três parâmetros biofísicos de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.10, p.1615-1624, 1991.
- EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R.; FRANÇA, G.V. Avaliação das bandas do satélite Landsat-5 na discriminação entre culturas de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.25, n.3, p.371-377, 1990.

- EIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1992. 132p. (INPE-5424-PRP/172).
- EIPHANIO, 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, n.3, p.351-360, 1995.
- EIPHANIO, J.C.N.; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, A.R. Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.3, p.439-447, 1994.
- EIPHANIO, J.C.N.; VITORELLO, I. Inter-relationships between view angles (azimuth) and surface moisture roughness conditions in field-measured radiometer reflectances of an oxisol. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING, 2., 1983, Bordeaux. **Actes...** Paris: INRA, 1984. p.185-192.
- FORMAGGIO, A.R.; ALVES, D.S.; EIPHANIO, J.C.N. Sistemas de informações geográficas na obtenção de mapas de aptidão agrícola e de taxa de adequação de uso das terras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, n.2, p.249-256, 1992.
- HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, n.3, p.295-309, 1988.
- HUETE, A R; HUA, G.; QI, J.; CHEHBOUNI, A.; LEEUWEN, W.J.D. van. Normalization of multidirectional red and nir reflectances with the SAVI. **Remote Sensing of Environment**, v.41, n.2, p.143-154, 1992.
- HUETE, A.R.; JACKSON, R.D.; POST, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil background. **Remote Sensing of Environment**, v.17, n.1, p.37-53, 1985.
- HUETE, A.R.; JUSTICE, C.; LIU, H. Development of vegetation indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v.49, n.3, p.224-234, 1994.
- IRONS, J.R.; CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M.; GRAHAM, D.W.; KOVALICK, W.M. Prediction and measurement of soil bidirectional reflectance. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.30, p.249-260, 1992.
- JACKSON, R.D.; SLATER, P.N.; PINTER JÚNIOR, P.J. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. **Remote Sensing of Environment**, v.13, n.3, p.187-208, 1983.
- JACKSON, R.D.; TEILLET, P.M.; SLATER, P.N.; FEDOSEJEVS, G.; JASINSKI, M.F.; AASE, J.K.; MORAN, M.S. Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.32, n.1, p.189-202, 1990.
- KIMES, D.S.; NEWCOMB, W.W.; SHUTT, J.B.; PINTER JUNIOR, P.J.; JACKSON, R.D. Directional reflectance factor distributions of a cotton row crop. **International Journal of Remote Sensing**, v.5, n.2, p.263-277, 1984.
- RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C.L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.43, n.12, p.1541-1552, 1977.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.; HARLAN, J.C. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation**. Greenbelt, MD: NASA/GSFC, 1974. 371p. Type III, Final Report.
- RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. **Remote Sensing of Environment**, v.31, p.53-63, 1990b.
- RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v.33, p.183-192, 1990a.
- RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data. **International Journal of Remote Sensing**, v.12, n.12, p.2477-2484, 1991.
- VALERIANO, M.M.; EIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R.; OLIVEIRA, J.B. Bidirectional reflectance of 14 soil classes from Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.16, n.10, p.113-128, 1995.
- WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J.; ESCOBAR, D.E.; GERBERMAN, A.H. Vegetation indices in crop assessments. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n.2, p.105-119, 1991.