

SENSORIAMENTO REMOTO DE TRÊS PARÂMETROS AGRONÔMICOS DE TRIGO E DE FEIJÃO¹

JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHANIO e ANTONIO ROBERTO FORMAGGIO²

RESUMO - Os índices de vegetação estão entre as abordagens mais utilizadas no sensoriamento remoto de culturas agrícolas. Neste trabalho utilizam-se, além da banda TM4, a razão simples (RS) e o índice perpendicular de vegetação (PVI), obtidos a partir de dados espectrais do sensor TM/Landsat-5. Os dados orbitais foram corrigidos quanto aos efeitos radiométricos e atmosféricos. Os parâmetros agronômicos do trigo e do feijão foram: o índice de área foliar (IAF), a percentagem de cobertura vegetal sobre o terreno (COV) e a densidade de clorofila, coletados em plantações comerciais irrigadas. Constatou-se haver relações de interesse agrônomo entre os parâmetros espectrais de satélite e os parâmetros agrônômicos das duas culturas, trigo e feijão. Isto evidencia a possibilidade de estimação das condições de vigor de uma cultura a partir de dados orbitais. Em determinado momento do ciclo cultural, os parâmetros biofísicos atingem valores em que as relações com as variáveis espectrais tornam-se assintóticas, enquanto seria ideal ocorrerem relações lineares. O PVI propicia melhores condições de minimização do efeito dos solos na resposta espectral da vegetação, em relação às bandas individuais.

Termos para indexação: índice de área foliar, índice de vegetação, clorofila, Landsat-5.

SATELLITE REMOTE SENSING OF THREE WHEAT AND BEAN AGRONOMIC PARAMETERS

ABSTRACT - In this work a single TM4 band and two spectral indexes - ratio TM4/TM3 and perpendicular vegetation index - were studied. Spectral digital counts obtained from TM/Landsat-5 tapes were corrected for radiometric and atmospheric effects. Wheat and bean agronomic parameters were green leaf area index, percent soil cover and chlorophyll density. These agronomic data were collected over commercial plantations on 1986 winter. Discussion of results were carried out on physical and physiological bases. It is showed that there are good relationships between satellite spectral parameters and agronomic parameters for both wheat and bean. The possibility of estimating the vigor conditions of an agricultural field from orbital data was stressed. Nevertheless, in some point of the growing season the agronomic parameters reach values so high that their relationships with spectral parameters become asymptotic rather than linear, which would be the ideal situation. PVI, as expected, was powerful to minimize the effect of underlying tropical soils on crops spectral responses.

Index terms: leaf area index, chlorophyll, vegetation index, Landsat-5.

INTRODUÇÃO

Numa vegetação verde, a luz vermelha (630-670 nm) é absorvida pela clorofila, com pouca transmissão e pouca reflexão, ao passo

que no infravermelho próximo (700-1300 nm) a absorção é quase zero e a reflectância e a transmitância são altas (Knipling 1970), devido à estrutura interna das folhas, como frisam vários autores (Gates et al. 1965, Bauer et al. 1980, Gausman 1985).

Desta maneira, à medida que aumenta a quantidade de vegetação, a reflexão na banda do infravermelho próximo (IV) aumenta, e a reflexão na banda do vermelho (V) diminui,

¹ Aceito para publicação em 15 de janeiro de 1991

² Eng. - Agr., Dr., Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), Caixa Postal 515, CEP 12201 São José dos Campos, SP.

fazendo com que o aumento da Razão IV/V seja potencializado, realçando a vegetação.

Quando várias camadas de folhas vão sendo sobrepostas num dossel em desenvolvimento, concomitantemente vão ocorrendo aumentos nos níveis de reflectância nas porções espectrais do IV, em função do efeito das "reflectâncias múltiplas" descrito por Allen & Richardson (1968), até que se atinja um valor estável máximo, denominado de "reflectância limite" (simbolizada por R_{∞}) por aqueles autores.

O conhecimento de tais relações entre a energia eletromagnética e as culturas, aliado a várias técnicas, permite múltiplos meios de utilização do sensoriamento remoto em agricultura. Normalmente, o que se usa é a banda simples, ou seja, o registro das informações em uma banda espectral determinada. A disponibilidade de várias bandas espectrais permite a exploração mais eficiente das características espectrais dos alvos em conjunto com os modos de operação dos vários sistemas sensores. Quanto mais bandas espectrais dispuser um sistema sensor, mais possibilidades de extração de informações ele fornece. Entretanto, quando o número de bandas espectrais aumenta, há um concomitante acréscimo de dificuldade de integração dos múltiplos dados (Mather 1987).

Uma abordagem para reduzir a dimensionalidade dos dados e aumentar a eficiência de extração de informações tem sido o uso de **índices espectrais de vegetação**, ou simplesmente índices de vegetação. Um índice espectral de vegetação é a integração de duas ou mais bandas espectrais, segundo procedimento determinado, cuja finalidade é realçar características da vegetação como biomassa, vigor vegetativo, índice de área foliar, etc., em relação aos solos.

O índice espectral de vegetação mais comumente utilizado é o obtido pela razão entre as reflectâncias no infravermelho próximo (IV) e no vermelho (V), denominado "razão simples".

Outro tipo de concepção de índice espectral de vegetação é o que envolve alteração da or-

togonalidade dos eixos de dispersão dos dados (conhecido como sendo do tipo "ortogonal"), gerando novos valores. Os dois exemplos mais conhecidos são o índice "Greenness" de Kauth & Thomas (1976) e o índice perpendicular de vegetação (PVI) de Richardson & Wiegand (1977).

Os índices espectrais de vegetação, como afirmam Jackson et al. (1980), representam características dos dosséis de plantas, tais como o índice de área foliar, a fitomassa, o peso da matéria verde, o peso da matéria seca, a percentagem de cobertura do terreno por vegetação, e outros.

A razão simples (IV/V) foi proposta e utilizada pela primeira vez por Jordan (1969) como um estimador espectral da vegetação. Desde então, ela tem sido utilizada por grande número de autores.

O índice perpendicular de vegetação (PVI) baseia-se na observação de que diferentes solos ou o mesmo solo em diferentes condições de umidade compõem uma mesma reta no plano XY de reflectância, definido pelas bandas TM3 e TM4 (vermelho e infravermelho, respectivamente). A distribuição de reflectâncias de solo e vegetação nesse plano mostra que a base da distribuição dos pontos é constituída pela linha de solos, e os pontos acima dessa linha são de vegetação. A maior ou menor distância do ponto de vegetação em relação à linha de solos indica maior ou menor desenvolvimento da vegetação. Essa distância é sempre medida perpendicularmente à linha de solos, como ilustrado na Fig. 1.

A linha de solo é dada pela equação (1)

$$Y = a_0 + a_1 X \quad (1)$$

Os coeficientes a_0 e a_1 são obtidos pela regressão linear dos dados de solos. Para encontrar a distância perpendicular da linha té determinado ponto do espaço bidimensional XY, deve-se reduzir a equação da reta à forma normal e substituir as coordenadas do ponto na equação (2), ou seja,

$$PVI = (Y_i - a_1 X_i - a_0) / [1^2 + (-a_1)^2]^{1/2} \quad (2)$$

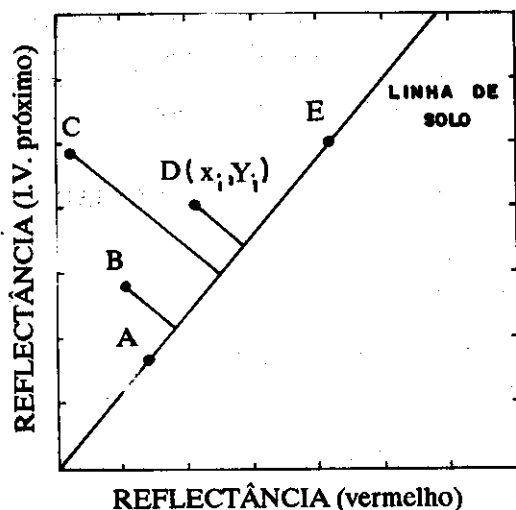


FIG. 1. Linha de solos e dos pontos de vegetação para o cálculo do PVI.

onde o subscrito i indica que X_i e Y_i são coordenadas de um ponto fora da linha de solos, e que por conveniência é chamado de ponto de vegetação. Maiores detalhes sobre o PVI podem ser obtidos em Jackson et al. (1980).

O relacionamento entre variáveis espectrais (como os índices de vegetação, p. ex.) e variáveis biofísicas dos dosséis pressupõe o conhecimento de como variam estes parâmetros, uma vez que isto é básico para o entendimento daquelas relações.

Assim, Formaggio (1989) observou, por exemplo, que o índice de área foliar (IAF) e a percentagem de cobertura vegetal sobre o terreno (COV) variam de maneiras distintas para o trigo e o feijão.

No caso do trigo, COV e IAF variam, como é mostrado na Fig. 2a, de modo relativamente interdependente: a variável COV cresce rapidamente no início do ciclo (em função, principalmente, de o espaçamento entre plantas ser estreito), ao passo que o IAF assume crescimento rápido por volta dos 31 dias de idade, quando praticamente a COV atinge o máximo. Neste momento, a COV mantém-se em seu ponto de saturação máxima (100%), ao passo que o IAF continua crescendo até por volta

dos 47-50 dias e depois começa a cair, enquanto a COV continua em seu patamar elevado.

No caso do feijão, a dinâmica das variáveis COV e IAF ao longo do ciclo é distinta da do trigo. Como é mostrado na Fig. 2b, o IAF e a COV caminham, no decorrer do ciclo, de maneira a crescer de forma não intensa, porém contínua, até o último quarto do ciclo.

Evidentemente, estas inter-relações entre as duas variáveis agronômicas exercem papel de destaque na integração entre radiação eletromagnética e dosséis agrícolas do trigo e do

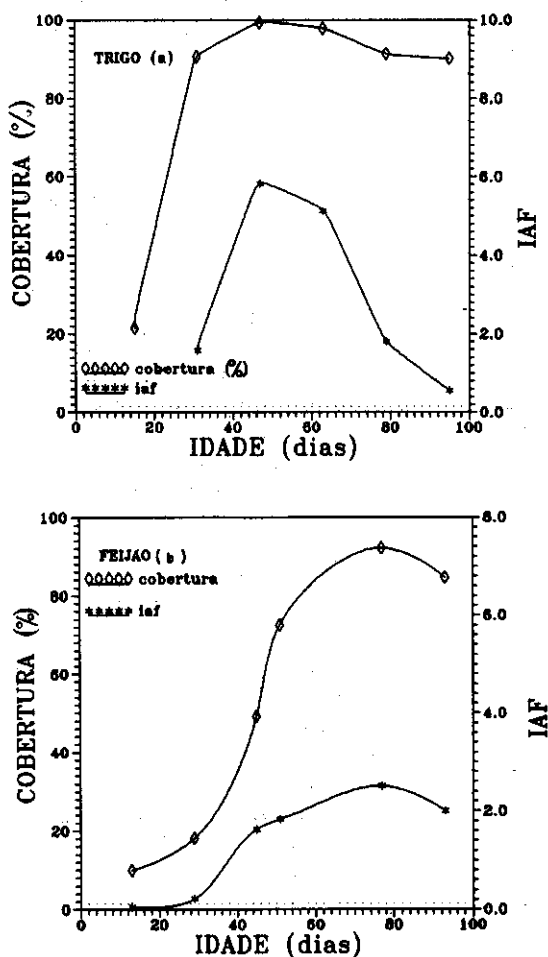


FIG. 2. Dinâmica das variáveis IAF e COV ao longo dos ciclos das culturas de trigo (a) e de feijão (b). Fonte: Formaggio (1989).

feijão, devendo ser adequadamente consideradas.

Grande parte dos trabalhos envolvendo o uso de bandas simples e mesmo de índices (lineares ou ortogonais), para avaliação de parâmetros de interesse agrônomo, foram realizados com radiômetros de campo, em condições experimentais. Entretanto, como se dispõe de imagens de satélite, é de interesse que relações entre dados espectrais e agrônômicos também sejam buscadas nesses produtos.

Assim, este trabalho tem por objetivo avaliar os produtos TM/Landsat-5, quando utilizados na construção de índices espectrais de vegetação.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização desse trabalho foram coletados dados sobre índice de área foliar, percentagem de cobertura do solo, pelo método descrito por Heilman et al. (1981), e teor de clorofila (em mg/g), pelo método de Arnon (1949), de 15 campos de trigo e de 15 de feijão, em condições comerciais de cultivo irrigado. Também foram obtidos os valores de densidade de clorofila, que é o valor do teor foliar de clorofila multiplicado pelo índice de área foliar.

Os dados de satélite foram obtidos do sensor TM ("Thematic Mapper") do Landsat-5. Esse sensor fornece dados em sete bandas espectrais distribuídas pela região visível (3), infravermelho próximo (1), infravermelho médio (2) e infravermelho termal (1) (Epiphany 1988).

Os dados digitalizados de satélite, referentes à órbita/ponto 221/74, de 17.06.86, foram corrigidos para efeitos atmosféricos pelo método do histograma mínimo (Schowengerdt 1983), e amostras de valores digitais foram obtidas dos três tipos de solos predominantes na região e dos trinta campos de cultivo. Os valores digitais corrigidos foram utilizados para as correlações e transformações em índices espectrais. Os valores digitais das áreas de solo serviram para a construção da linha de solos e a determinação do valor do índice perpendicular de vegetação (PVI) de cada campo de cultivo.

Nesse trabalho, os parâmetros espectrais utilizados foram a banda TM4 (infravermelho próximo), o índice perpendicular de vegetação (PVI) e a razão entre o infravermelho e o vermelho (TM4/TM3). As

análises foram baseadas nas correlações e relações gráficas entre os parâmetros espectrais e biofísicos, tendo em vista o conhecimento teórico de comportamento espectral de alvos agrícolas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A observação da Fig. 3 permite a constatação de que para os solos da região de estudo há grande relação entre os valores digitais das bandas TM3 e TM4, definindo a "linha de solo".

Para as áreas com culturas, essa relação não é nítida, conforme pode ser observado na Fig. 4.

Entretanto, quando esses dados são juntados numa só figura, como na Fig. 5, há uma dispersão característica mostrando uma "linha de solo" e uma região de dispersão das áreas vegetadas. A distância perpendicular de um ponto qualquer até a linha de solo é o índice perpendicular de vegetação (PVI), definido por Richardson & Wiegand (1977).

Como se observa nessas figuras, os solos da região de estudo apresentam-se bem comportados no tocante à construção da "linha de solos". Da mesma forma, a distribuição da vegetação agrícola segue a distribuição teoricamen-

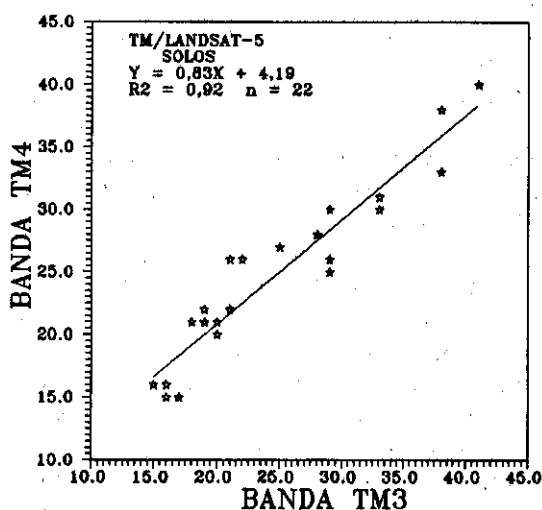


FIG. 3. Relação entre as bandas TM3 e TM4 para os solos.

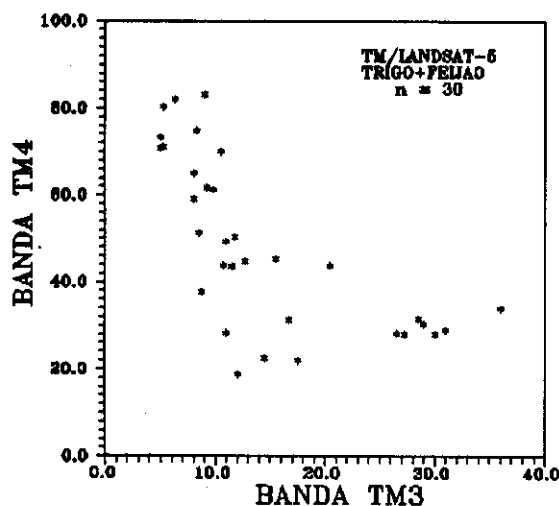


FIG. 4. Relação entre as bandas TM3 e TM4 para as duas culturas.

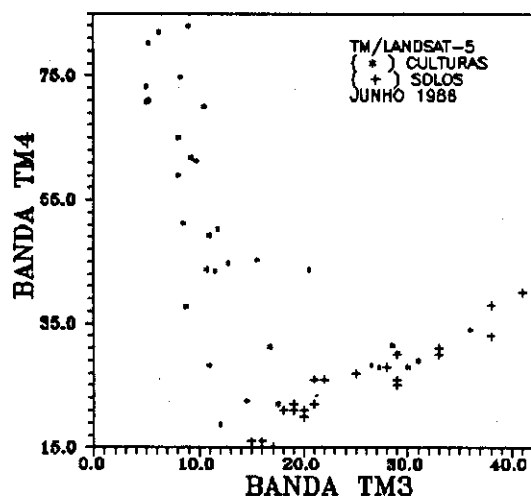


FIG. 5. Relação entre as bandas TM3 e TM4 para os solos e as culturas conjuntamente.

te prevista, conforme a proposição de Richardson & Wiegand (1977). Deve ser ressaltado que esses dados foram obtidos de imagens orbitais e referem-se a áreas em condições naturais de cultivo, envolvendo duas culturas distintas.

Como existe uma resposta dos parâmetros espectrais quanto às condições de vigor dos dosséis, é possível a busca do entendimento e

do estabelecimento de relações entre parâmetros representativos dos dosséis.

Nas Fig. 6, 7 e 8 são mostradas as relações entre a percentagem de cobertura do solo e três parâmetros espectrais (TM4, razão simples e PVI).

A percentagem de cobertura do solo é um parâmetro que experimenta saturação quando atinge o valor de 100%. Isso faz com que, na

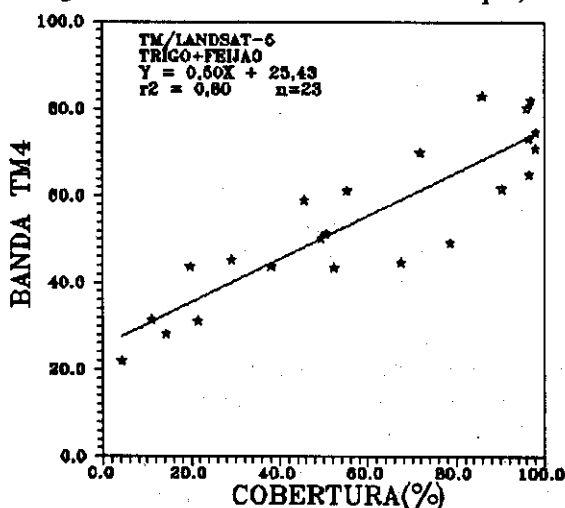


FIG. 6. Relação entre a banda TM4 e a percentagem de cobertura do solo das duas culturas.

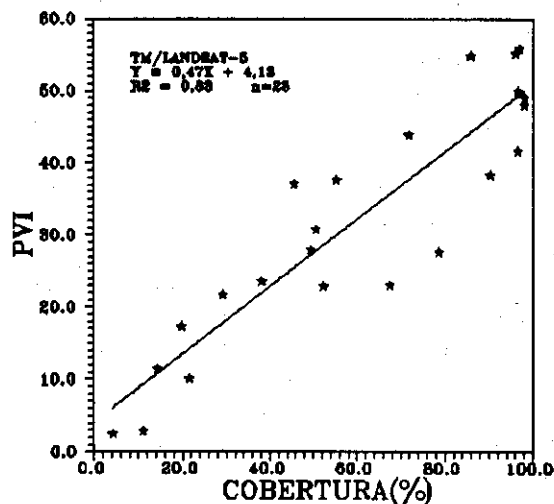


FIG. 7. Relação entre o índice perpendicular de vegetação (PVI) e a percentagem de cobertura do solo das duas culturas.

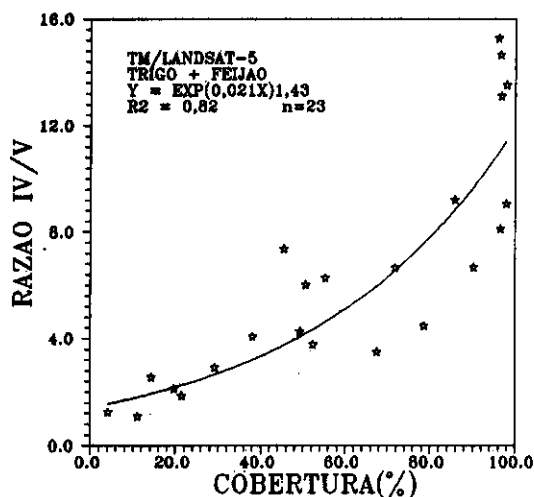


FIG. 8. Relação entre a razão infravermelho/vermelho e a percentagem de cobertura do solo das duas culturas.

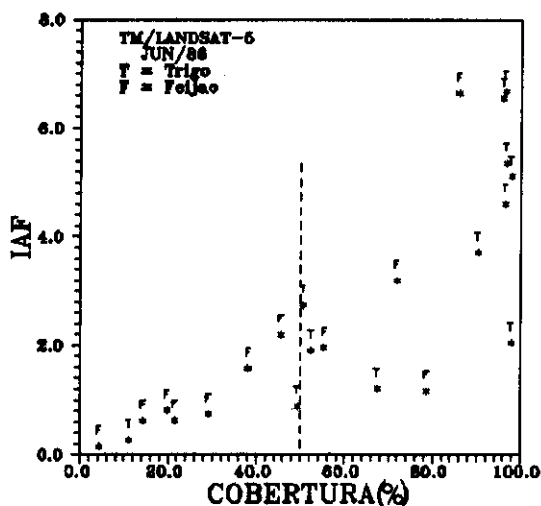


FIG. 9. Relação entre percentagem de cobertura do solo e índice de área foliar (IAF) das duas culturas.

região de saturação, variações na resposta espectral (devidas a aumentos de vigor vegetativo) não tenham o correspondente aumento na percentagem de cobertura do solo, conforme mostrado por Formaggio (1989). As Fig. 6 e 7 (TM4 e PVI) são as que melhor exprimem esse relacionamento e se mostram menos sensíveis a tal saturação, com o PVI apresentando um coeficiente de determinação ligeiramente superior à banda TM4. A Razão (IV/V) (Fig. 8) apresentou relacionamento curvilíneo, com fortes sinais de saturação para valores elevados de cobertura.

Deve-se ressaltar, nessas curvas, o aumento de dispersão com o aumento da percentagem de cobertura, ou seja, acima de 50% de cobertura há maior dispersão dos dados. Isso pode ser explicado pelo fato de que até determinado ponto do desenvolvimento da cultura a percentagem de cobertura guarda estreita relação com o número de folhas e com a área foliar da cultura (Fig. 9). A partir de tal ponto essa relação cai, pois há acréscimo da área foliar sem correspondente aumento da cobertura. Isso cria alterações na reflectância da cultura, principalmente na banda TM4, que passa a portar informações de duas variáveis (IAF e percentagem de cobertura), com taxas diferenciadas de variação.

Como pode ser observado na Fig. 9, as áreas de trigo (T), tendo atingido o patamar de elevada cobertura, experimentam grande variabilidade de índices de área foliar. É que, devido ao pequeno espaçamento do trigo e sua alta densidade de plantio e poder de perfilhamento, provoca rápida cobertura do solo, e a partir daí continua aumentando seu índice de área foliar. Esse aumento de índice de área foliar não ocorre na mesma intensidade para os vários talhões, em função do tipo de solo, manejo, adubação e outros. Isso provoca dispersão desses dados para elevadas coberturas do terreno. Dado o caráter comercial de exploração dos talhões de estudo, é inevitável a ocorrência de múltiplas práticas agrícolas indutoras de alterações de desenvolvimento, e, conseqüentemente, de variações espectrais.

Outro parâmetro agrônomo de interesse e passível de ser estudado com sensoriamento remoto é o índice de área foliar (IAF). Nesse estudo com trigo e feijão, as relações desse parâmetro com os espectrais são mostrados nas Fig. 10, 11 e 12. O que se observa é uma relação curvilínea do tipo exponencial entre o índice de área foliar e os parâmetros banda TM4 e PVI ($r^2=0,85$), e uma relação linear entre IAF e razão infravermelho/vermelho,

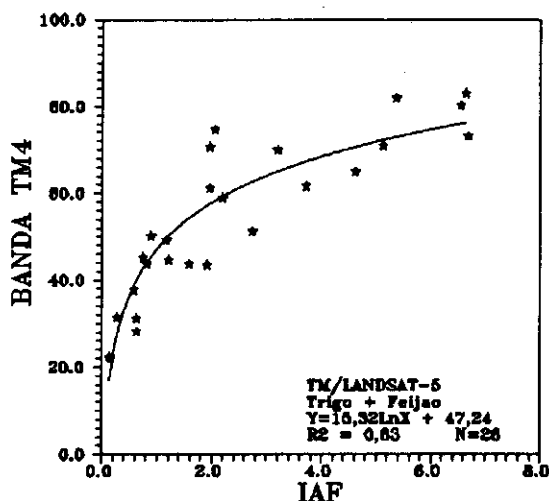


FIG. 10. Relação entre a banda TM4 e o índice de área foliar (IAF) das duas culturas.

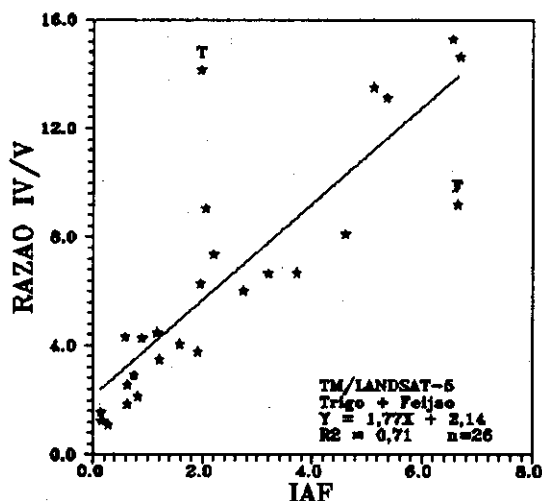


FIG. 12. Relação entre a razão infravermelho/vermelho e o índice de área foliar (IAF) das duas culturas.

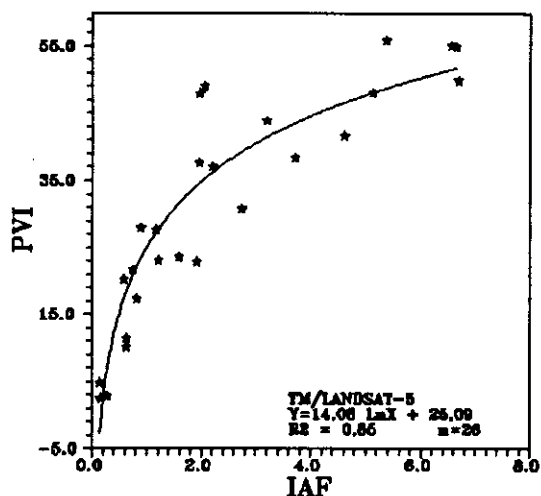


FIG. 11. Relação entre o índice perpendicular de vegetação (PVI) e o índice de área foliar (IAF) das duas culturas.

com razoável dispersão para valores de IAF superiores a 3,0.

Tanto para a banda TM4 quanto para o PVI (Fig. 10 e 11), observa-se que, com o acréscimo do índice de área foliar, há tendência de saturação desses dois parâmetros espectrais. Isso ocorre principalmente devido ao efeito de "reflectância infinita" (R^∞) de Allen & Richardson (1968). Nessa banda, as folhas apresentam alta transmitância de energia, o que

permite o fenômeno de reflexões múltiplas pelas diversas camadas foliares, ocasionando a expressão de tal comportamento.

No caso do parâmetro razão infravermelho/vermelho (Fig. 12), observa-se que há boa relação com o IAF. A dispersão observada ocorre principalmente devido a variações intensas de determinados talhões quanto ao padrão esperado de valores de IAF. Nesse figura observa-se que os pontos assinalados por F e T afastam-se da reta; no campo, tais pontos representam talhões com excessivo desenvolvimento vegetativo (caso do feijão, "F") ou baixo nível de perfilhamento (caso do trigo, "T"). Outros fatores que atuam sobre esse parâmetro espectral são o efeito de "reflectância máxima" (Allen & Richardson 1968), que afeta a banda infravermelha, e o efeito de absorção diferenciada de energia no vermelho pelas duas culturas. O trigo possui maior teor de clorofila que o feijão, e isso influi na absorção de energia. Como a clorofila afeta principalmente uma das bandas da Razão IV/V (a do vermelho), o relacionamento da Razão com parâmetros agrônômicos pode desviar do esperado.

Outro parâmetro agrônômico abordado neste trabalho, embora descrito com pouca ênfase na literatura, é a densidade de clorofila, ou se-

ja, o teor de clorofila multiplicado pelo índice de área foliar. Tucker (1978) utiliza a concentração de clorofila, definida como a multiplicação do teor foliar de clorofila pelo peso da matéria verde, para obter um valor que expresse volumetricamente a quantidade de clorofila no campo. A densidade de clorofila associa a massa foliar existente numa área a uma característica de fundamental importância em termos de sensoriamento remoto, que é a da capacidade de absorção de energia em dado comprimento de onda. Assim, uma cultura pode ter alta concentração foliar de clorofila, porém baixo índice de área foliar; outra pode ter características inversas. A densidade de clorofila procura expressar a integração da capacidade absorptiva desses dois componentes culturais.

Na Fig. 13 observa-se que a banda TM4 possui uma relação curvilínea com a densidade de clorofila, o mesmo ocorrendo com o índice perpendicular de vegetação (Fig. 14).

Levando em consideração que os dados espectrais foram obtidos a partir de dados de satélite, e que os dados agrônômicos foram obtidos em condições reais de cultivo em escala comercial, pode-se considerar que tais relações são relativamente bem ajustadas. A Fig. 15 expressa uma relação linear entre a densidade de clorofila e a razão IV/V, o que

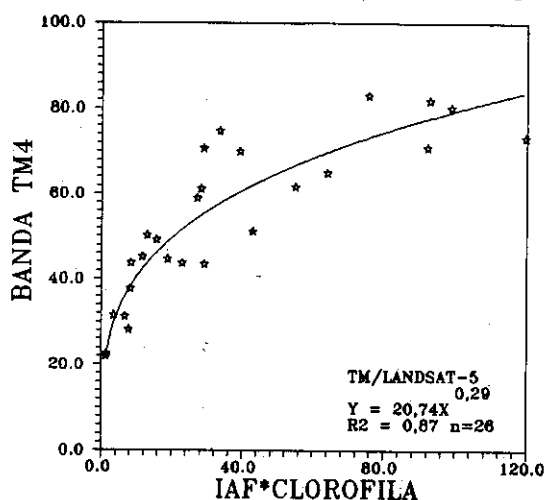


FIG. 13. Relação entre a banda TM4 e a densidade de clorofila das duas culturas.

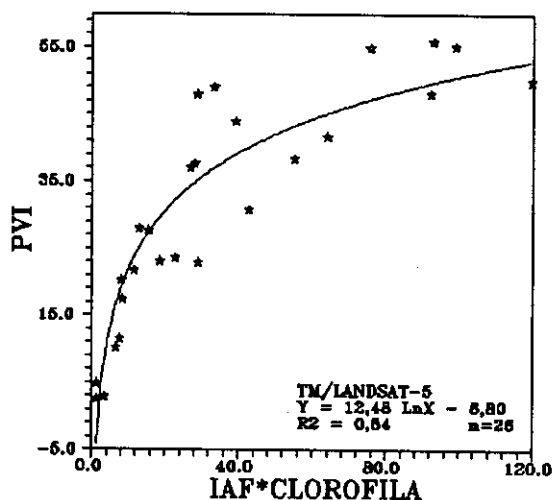


FIG. 14. Relação entre o índice perpendicular de vegetação (PVI) e a densidade de clorofila das duas culturas.

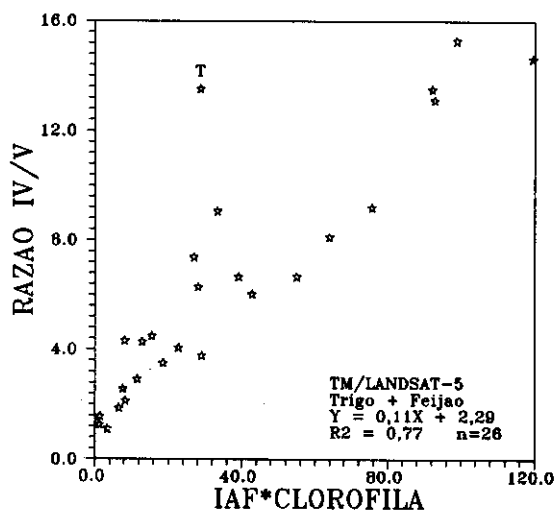


FIG. 15. Relação entre a razão infravermelho/vermelho e a densidade de clorofila das duas culturas.

concorda com o trabalho de Kamat et al. (1983), que observaram expressiva relação entre concentração de clorofila e este índice de vegetação. Este comportamento pode indicar que a razão de bandas, por envolver bandas sensíveis a ambos os parâmetros constituintes da densidade de clorofila, apresenta-se como bom indicador desse parâmetro agrônômico.

CONCLUSÕES

1. Esses resultados demonstram que para áreas irrigadas, onde foi conduzida a coleta de dados, são encontradas relações de interesse agrônomo entre parâmetros espectrais e parâmetros ligados às características das culturas.

2. As respostas espectrais dos solos da região mostraram-se distribuídas ao longo de uma linha reta no plano vermelho x infravermelho.

3. Através de procedimentos adequados de cálculos, é possível redistribuir todos os pontos, tendo como referência tal linha, de modo a minimizar o efeito do solo sobre a resposta da vegetação. Com isso, as respostas das culturas mostraram-se distribuídas acima dessa linha de solos, cujas localizações foram função do desenvolvimento vegetativo e do solo do talhão.

4. Embora o PVI tenha sido bem correlacionado com a banda TM4, a possibilidade de minimização do efeito de solo deve ser ressaltada. Sua construção deve ser testada para outros conjuntos de solos e outras culturas, particularmente as de verão não-irrigadas. Como as características intrínsecas da espécie (p. ex. teor de clorofila) e as condições de cultivo desempenham papel importante no comportamento dos parâmetros espectrais, estudos voltados ao entendimento de tais relações devem ser aprofundados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com apoio financeiro da FAPESP e da EMBRAPA, às quais, ao lado da UNICAMP, DAEE, IAC e ESALQ/USP, apresentamos nossos agradecimentos.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, W.A.; RICHARDSON, A.J. Interaction of light with a plant canopy. *Journal of the Optical Society of America*, v.58, p.1023-1028, 1968.
- ARNON, D.I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, v.24, n.1, p.1-15, 1949.
- BAUER, M.E.; VANDERBILT, V.C.; ROBISON, B.F.; DAUGHTRY, S.T. Spectral properties of agricultural crops and soils measured from space, aerial, field and laboratory sensors. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY, 14., 1980, Hamburg. *Proceedings...* Bonn: International Society for Photogrammetry, 1980. p.56-73.
- EPIPHANIO, J.C.N. **Dados TM/Landsat-5 no estudo das culturas de trigo e feijão.** Piracicaba: ESALQ/USP, 1988. 141p. Tese de Doutorado.
- FORMAGGIO, A.R. **Características agrônomicas e espectrais para sensoriamento remoto de trigo e de feijão.** Piracicaba: ESALQ/USP, 1989. 161p. Tese de Doutorado.
- GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants. *Applied Optics*, v.4, n.1, p.11-20, 1965.
- GAUSMAN, H.W. **Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light.** Lubbock, Texas: Texas Tech. University, 1985. 78p. (Graduate Studies nº 29).
- HEILMAN, J.L.; HEILMAN, W.E.; MOORE, D.G. Remote sensing of canopy temperature at incomplete cover. *Agronomy Journal*, v.73, n.3, p.403-406, 1981.
- JACKSON, R.D.; PINTER JUNIOR, P.J.; REGINATO, R.J.; IDSO, S.B. **Hand-held radiometry.** [S.l.]: U.S. Dept. of Agriculture, 1980. (Agricultural Reviews and Manuals, ARM-W-19).
- JORDAN, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, v.50, p.663-666, 1969.
- KAMAT, A.D.S.; CHATURVEDI, G.S.; SINGH, A.K.; SINHA, S.K. Spectral assessment of leaf area index, chlorophyll content, and biomass of chickpea. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.49, n.12, p.1721-1727, 1983.
- KAUTH, R.J.; THOMAS, G.S. The Tasseled-Cap - A graphic description of the spectral temporal development of agricultural crop as seen by

- Landsat. In: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA SYMPOSIUM, 3., 1976, West Lafayette. West Lafayette: Purdue University, 1976. p.4B, p.41-51.
- KNIPLING, G.B. Physical and physiological bases for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.1, p.155-159, 1970.
- MATHER, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. Chichester: Wiley, 1987. 352p.
- 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.
- SCHOWENGERDT, R.A. **Techniques for image processing and classification in remote sensing**. London: Academic, 1983. 249p.
- TUCKER, C.J. A comparison of satellite sensor bands for vegetation monitoring. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.44, n.11, p.1369-1380, 1978.