



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS
AUTORES
AUTHORS
 ÍNDICE VEGETATIVO
 PRODUTIVIDADE DO TRIGO
 RADIOMETRIA DE CAMPO

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY
 Roberto Pereira da Cunha
 Diretor Sens. Remoto

AUTOR RESPONSÁVEL
 RESPONSIBLE AUTHOR

 Bernardo F.T. Rudorff

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION
 INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY

 Antonio Roberto Formaggio

CDU/UDC
 633.11

DATA / DATE
 Novembro, 1989

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO
	INPE-4994-PRE/1556
ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DO TRIGO ATRAVÉS DE RADIOMETRIA DE CAMPO	
AUTORES/AUTHORSHIP	Bernardo F.T. Rudorff Getulio T. Batista

ORIGEM
 ORIGIN
 DPA

PROJETO
 PROJECT
 ESTIMA

Nº DE PAG.
 NO OF PAGES
 20

ULTIMA PAG.
 LAST PAGE
 19

VERSÃO
 VERSION

Nº DE MAPAS
 NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Através da radiometria de campo foi analisado o comportamento espectral de três variedades da cultura do trigo (Anahuac, IAC-24, BH-1146), ao longo da estação de crescimento, na safra de 1988, na região de Assis-SP. Os dados de radiometria de campo foram obtidos na região visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético sobre 30 parcelas amostrais, distribuídas em lavouras de produção comercial. Estes dados radiométricos (dados espectrais) foram transformados em índices vegetativos que foram relacionados com medidas agronômicas (produtividade, biomassa verde e biomassa seca) em 10 campanhas de medidas realizadas semanalmente, desde a fase inicial de crescimento (aproximadamente 30 dias após o plantio) até a colheita. O principal interesse do trabalho foi verificar o potencial do emprego dos dados espectrais para estimar a produtividade de grãos de trigo, em condições de clima tropical. Verificou-se que o índice vegetativo obtido na fase de emborrachamento e início de espigamento melhor se relaciona com a produtividade final, sendo que o coeficiente de correlação observado para estas fases variou entre 0,82 e 0,93. Os dados também foram tratados de forma multitemporal, onde o índice vegetativo foi integrado ao longo do ciclo da cultura e relacionado com a produtividade de final. Os resultados obtidos neste trabalho, mostraram que a energia refletida pela cultura, em determinadas fases de seu crescimento, está estreitamente relacionada com a produtividade final.

OBSERVAÇÕES/REMARKS

Trabalho a ser apresentado no IV Simposio SELPER no período de 20 a 24.11.1989, em São Carlos de Bariloche-Argentina.

Projeto realizado em convênio com a Fundação Banco do Brasil.

ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DO TRIGO ATRAVÉS DE RADIOMETRIA DE CAMPO

Bernardo F. T. Rudorff
Getulio T. Batista
Instituto de Pesquisas Espaciais - (INPE)
Caixa Postal 515
12201 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

Através da radiometria de campo foi analisado o comportamento espectral de três variedades da cultura do trigo (Anahuac, IAC-24, BH-1146), ao longo da estação de crescimento, na safra de 1988, na região de Assis-SP. Os dados de radiometria de campo foram obtidos na região visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético sobre 30 parcelas amostrais, distribuídas em lavouras de produção comercial. Estes dados radiométricos (dados espectrais) foram transformados em índices vegetativos que foram relacionados com medidas agronômicas (produtividade, biomassa verde e biomassa seca) em 10 campanhas de medidas realizadas semanalmente, desde a fase inicial de crescimento (aproximadamente 30 dias após o plantio) até a colheita. O principal interesse do trabalho foi verificar o potencial do emprego dos dados espectrais para estimar a produtividade de grãos de trigo, em condições de clima tropical. Verificou-se que o índice vegetativo obtido na fase de emborrachamento e início de espigamento melhor se relaciona com a produtividade final, sendo que o coeficiente de correlação observado para estas fases variou entre 0,82 e 0,93. Os dados também foram tratados de forma multitemporal, onde o índice vegetativo foi integrado ao longo do ciclo da cultura e relacionado com a produtividade final. Os resultados obtidos neste trabalho, mostraram que a energia refletida pela cultura, em determinadas fases de seu crescimento, está estreitamente relacionada com a produtividade final.

ABSTRACT

The spectral behavior of three varieties of wheat (Anahuac, IAC-24, and BH-1146) was analyzed using field radiometry throughout the 1988 growing season, in the region of Assis, SP. The field radiometric data were obtained in the visible and near infrared portion of the electromagnetic spectrum of 30 sampled fields distributed in commercially planted fields. The radiometric data were transformed into vegetation indices and related to agronomic variables (grain yield, green phytomass, and dry phytomass) obtained in ten measurement campaigns carried out weekly beginning at initial stages of growing (30 days after planting approximately) until harvesting. The main objective of this work was to verify the potential of spectral data to estimate grain yield of wheat growing in tropical region. It was observed that the vegetation index obtained at booting to begin of flowering stages was quite well related to the final grain yield and correlation coefficients of 0.82 to 0.93 were obtained. The radiometric data were analyzed multitemporally also, where the vegetation indices were integrated throughout the growing cycle and related to the final yield. Results obtained clearly indicated that the reflected energy at certain stages of the crop development and at certain wavelength bands are well related to the final grain yield.

INTRODUÇÃO

A tecnologia de sensoriamento remoto vem sendo apontada como uma importante ferramenta para estimar a produção de culturas agrícolas em grandes áreas (Henderson e Badhwar, 1984). Todavia, apesar do comprovado potencial dos dados espectrais para estimar parâmetros agronômicos utilizados em modelos de estimativa de produtividade ainda não se dispõe de métodos confiáveis e operacionais que possam utilizar estes dados. A instabilidade da relação dados espectrais/parâmetros agronômicos causada por problemas de calibração dos sensores e pelas variações da camada atmosférica são as principais causas da limitação ao uso do sensoriamento remoto para fins de previsão de safra. Estão previstos para a próxima década os lançamentos de diversos satélites de sensoriamento remoto que aumentarão de forma significativa a disponibilidade de dados e desta maneira será grande a demanda de métodos que integrem de forma adequada os diversos fatores que afetam a produtividade.

A produção gerada por uma cultura agrícola está sujeita às flutuações causadas por uma série de fatores e cujo efeito sobre a variação na produção, para grandes áreas, é difícil de ser quantificado. Todavia o sensoriamento remoto permite a obtenção de dados sobre áreas extensas o que viabiliza o emprego de modelos de produtividade que utilizam parâmetros agronômicos em sua construção e que podem ser estimados a partir da energia refletida pela cultura.

O trigo tem sido alvo de inúmeros estudos que utilizam a técnica de sensoriamento remoto para estimar parâmetros agronômicos a partir da energia refletida pela cultura. Tal fato se deve principalmente à importância deste cereal tanto na alimentação humana quanto na economia mundial e, portanto, é fundamental que se disponha de informações confiáveis e em tempo hábil sobre a produção desta cultura.

A estreita relação existente entre parâmetros agronômicos tais como índice de área foliar (IAF), biomassa, coeficiente cultural (k_c) e radiação fotossinteticamente ativa (RFA) absorvida pela cultura e as medidas espectrais, tornam possível a utilização de modelos de crescimento para grandes áreas (Dusek et alii, 1985) os quais até então estiveram restritos ao nível experimental (Daughtry et alii, 1984).

Nos últimos anos foram realizadas diversas pesquisas que envolvem o uso de dados espectrais com intuito de estimar a produtividade de culturas agrícolas. A correlação significativa encontrada entre a reflectância das plantas e parâmetros agronômicos, relacionados com a produtividade, incentivou o uso destes dados em modelos de produtividade (Pearson e Miller, 1972; Ashley e Rea, 1975; Tucker et alii, 1980, 1981; Richardson e Wiegand, 1977; Richardson et alii, 1982; Wiegand et alii, 1979; Hatfield, 1981, 1983; Rudorff, 1985; Rudorff e Batista, 1988, 1989a, 1989b e 1989c; entre outros).

Idso et alii (1980) estimaram a produtividade do trigo utilizando um índice vegetativo com o qual acompanharam a taxa de senescência da cultura com base no fato de que as plantas sob estresse entram em senescência mais cedo e têm um rendimento de grãos menor. Apoiados nesta pesquisa, Pinter Jr. et alii (1981) utilizaram uma nova técnica para prever a produtividade do trigo, cultivado sob diversos regimes de estresse de umidade. Os autores traçaram a trajetória da variação do índice vegetativo (NDVI) ao longo do ciclo da cultura do trigo e verificaram que a área abaixo da curva da trajetória espectral estava estreitamente relacionada com a produtividade final. Tal observação se deve ao fato que quanto maior for o índice de área foliar e maior o período em que ele se mantém alto, maior será a produtividade final. Como o índice de área foliar e o índice vegetativo estão estreitamente relacionados pode-se considerar a afirmativa acima válida também para o índice vegetativo.

Rudorff e Batista (1989a) utilizaram os dados de produtividade estimados a partir de um modelo agrometeorológico em conjunto com dados espectrais do trigo, obtidos das imagens TM do satélite Landsat e relacionaram estes dados com a produtividade observada do trigo, ao nível de propriedades agrícolas. Os dados espectrais das imagens obtidas sobre o trigo, na fase de emborrachamento, e relacionados com a produtividade final apresentaram um coeficiente de correlação de 0,80 e 0,67, respectivamente para as safras de 86 e de 87, na região de Assis-SP. A partir da experiência adquirida neste trabalho, os autores recomendaram que fossem realizados estudos sobre o comportamento espectral do trigo e sua relação com parâmetros

agronômicos, ao longo de sua estação de crescimento, em condições de clima tropical.

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento espectral da cultura do trigo, ao longo de seu ciclo, e relacionar a energia refletida pela cultura com parâmetros agrônômicos. O estudo foi conduzido ao nível de campo, sobre parcelas amostrais em lavouras de produção comercial, e visou obter informações sob condições reais de cultivo numa importante região da triticultura brasileira.

MATERIAL E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de Assis-SP, e está contida na mais importante região tritícola do Brasil que é a Região Centro-Sul abrangida pelos Estados do Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul que hoje produzem cerca de 70% do trigo nacional. As coordenadas geográficas centrais da área de estudo são 22° 45' S e 50° 15' W. Os tipos de solos predominantes na região são classificados em Latossolo Vermelho Escuro Fase Arenosa, Latossolo Roxo e Terra Roxa Estruturada. As principais classes de ocupação do solo na região são: áreas agrícolas destinadas principalmente ao cultivo da soja (verão), do trigo (inverno) e da cana-de-açúcar; reflorestamentos e cerrados. O clima é úmido, quente e sem estação seca, sendo a precipitação total média nos meses de abril a setembro de 350 mm. A temperatura média do mês mais quente (janeiro) é superior a 24°C e a do mês mais frio (julho) é inferior a 17°C (Setzer, 1966).

SELEÇÃO DAS PARCELAS AMOSTRAIS

Na região sudoeste do Estado de São Paulo o plantio do trigo é realizado após a colheita da soja e ocorre principalmente entre o final do mês de abril e começo do mês de maio. Nesta região as variedades mais plantadas são Anahuac, BH-1146, e IAC-24. A primeira é mais produtiva porém mais exigente em termos de disponibilidade de água e fertilidade do solo, e a duração do ciclo é em torno de 120 dias. As outras duas variedades são menos produtivas porém mais rústicas e portanto mais indicadas para plantio em solos de baixa fertilidade natural, e a duração do ciclo é em torno de 100 dias.

Optou-se por selecionar 30 parcelas amostrais para obtenção das medidas radiométricas e agrônômicas. Estas parcelas foram distribuídas em 4 imóveis rurais bem representativos das características regionais de produção do trigo. Procurou-se selecionar parcelas em áreas de alto, baixo, e médio potencial de produção com base nas informações fornecidas pelo proprietário. Este aspecto de seleção foi considerado como muito importante pois um dos objetivos deste trabalho é verificar a relação existente entre a variação da produtividade e os dados espectrais e para tal é necessário que se disponha de uma ampla variação nos níveis de produção. Das 30 parcelas selecionadas, 17 estavam plantadas com a variedade Anahuac, 7 com a variedade IAC-24 e 6 com a variedade BH-1146. Cada parcela corresponde a uma área de 100 m² que foi delimitada dentro de uma lavoura destinada à produção comercial. Uma faixa de 3 m x 10 m foi destinada à coleta de medidas agrônômicas que envolviam o corte de plantas. O restante da parcela (7 m x 10 m) ficou destinado para a obtenção das medidas radiométricas. Ao final do ciclo da cultura foi colhida uma área de 25 m² para a medida de rendimento da parcela.

ESPECTRORRADIOMETRO

Para obtenção das medidas radiométricas foi utilizado o espectrorradiômetro SPECTRON SE-590 que é um equipamento projetado para operações de campo e consiste de duas unidades detetoras (CE-390) ligadas através de cabos a uma unidade controladora cuja energia para operação provém ou de uma bateria interna recarregável ou de uma bateria externa.

A obtenção das medidas radiométricas com este equipamento envolve a operação das duas unidades detetoras. Uma delas fica apontada para o alvo (trigo) com um campo de visada (FOV) de 15° , captando a energia refletida (radiância), enquanto a outra, munida de um coletor cosseno (180°), fica apontada para o céu, captando a energia incidente (irradiância). Relacionando-se estas duas medidas obtém-se a medida de reflectância do alvo.

Cada unidade detetora possui uma rede de difração e uma matriz de fotodiodos que permitem obter, em uma fração de segundos, um espectro radiométrico em 252 bandas na faixa de 400 nm a 1100 nm.

Para obtenção das medidas radiométricas no campo as unidades detetoras foram fixadas em um mastro de elevação, a uma altura aproximada de 3 m. Desta forma, a unidade detetora voltada para baixo capta a energia refletida pela cultura do trigo sobre uma superfície de aproximadamente $0,5 \text{ m}^2$. Juntamente com as unidades detetoras foi acoplada ao mastro de elevação uma câmara fotográfica do tipo 35 mm para permitir o registro fotográfico do alvo nas mesmas condições de obtenção da medida radiométrica.

MEDIDAS RADIOMÉTRICAS

As medidas radiométricas sobre as parcelas amostrais começaram a ser obtidas a partir do dia 20 de maio de 1988. Nesta época a maioria das áreas tritícolas estavam com aproximadamente 30 a 40 dias após o plantio e as medidas foram obtidas ao longo de todo ciclo da cultura com intervalos de aproximadamente 7 dias entre cada medida. A Figura 1 mostra as datas das missões para obtenção das medidas, sobre a escala de Feeks-Large extraída de Scheeren (1986) e ajustadas de forma aproximada ao estágio fenológico em que se encontrava o trigo, na maioria das parcelas amostrais.

Sobre cada parcela foram obtidas quatro medidas de radiância e irradiância a fim de representar bem a parcela, pois o campo de visada da unidade detetora, voltada para a cultura, é de apenas $0,5 \text{ m}^2$.

As medidas sempre foram obtidas em condições de céu aberto ou parcialmente aberto. Este cuidado foi tomado para evitar variações na condição de iluminação pois as medidas de irradiância e radiância, sobre cada parcela, devem ser obtidas em iguais condições de iluminação. Desta forma, nem sempre foi possível obter as medidas sobre todas as parcelas em cada missão.

Para se calcular o fator de reflectância dos espectros foi necessário obter primeiramente os dados de calibração e para tal foi utilizado o método proposto por Duggin (1980), que emprega a seguinte equação:

$$REF_n = \frac{R_{\lambda_{1\lambda_0}}}{I} * \hat{C}_n * F_n \quad (1)$$

onde:

REF = fator de reflectância;

n = comprimento de onda do espectro, que varia de 400 a 1100 nm num total de 252;

$R_{\lambda_{1\lambda_0}}$ = radiância refletida pelo alvo;

I = irradiância solar no instante da medida;

\hat{C} = fator de calibração estimado;

F = fator de calibração da placa de sulfato de bário.

O fator de calibração estimado (\hat{C}) é obtido a partir de equações de regressão (uma para cada comprimento de onda, num total de 252). Este fator varia com o cosseno do ângulo zenital solar por ocasião da medida e as equações de regressão representam o melhor ajuste do fator de calibração (C) com o cosseno do ângulo zenital. O fator de calibração (C) é obtido pela razão entre as medidas de irradiância solar e radiância da placa de sulfato de bário, para cada comprimento de onda. Estas medidas foram obtidas ao longo de um único dia (15-08-88), com céu totalmente aberto, no período das 9:00 às 15:00 horas, em intervalos de 5 minutos (total de 72 medidas). Desta forma foram obtidas as variações da razão entre estas duas medidas, em função da variação nas condições de iluminação devido aos diferentes ângulos de elevação solar. Posteriormente foi feita a regressão linear do fator de calibração (C), em cada comprimento de onda, com o cosseno do ângulo zenital por ocasião da medida. A partir destas equações de regressão pode-se estimar o fator de calibração (\hat{C}) para as condições de iluminação, por ocasião da medida no campo. O cosseno do ângulo zenital foi calculado em função do horário e local da medida radiométrica no campo.

O fator de calibração (F) da placa de sulfato de bário, usado no procedimento de calibração, é obtido em laboratório através da relação entre a radiância desta placa de sulfato de bário e a radiância de uma placa padrão de laboratório.

De posse dos dados de calibração foi calculado o fator de reflectância através de um software próprio para tratamento e análise dos dados gerados por este radiômetro. Uma descrição detalhada sobre a utilização destes programas pode ser encontrada em Rudorff et alii (1989c). A partir dos espectros de reflectância foram selecionadas algumas bandas espectrais cujas faixas de abrangência no espectro eletromagnético e correspondentes bandas no Spectron SE-590 são mostradas na Tabela 1.

TRANSFORMAÇÕES ESPECTRAIS E ANÁLISE DOS DADOS

Além dos valores de reflectância obtidos para as bandas espectrais, mostradas na Tabela 1, foram utilizadas também algumas transformações de bandas espectrais.

Uma análise preliminar dos dados mostrou que o espectro obtido pelo radiômetro apresenta problemas a partir do comprimento de onda de 900 nm e portanto preferiu-se utilizar as bandas EST que não vão além de 880 nm. As bandas EST são também bastante estreitas e foram posicionadas no pico de reflectância do trigo na região do visível (EST1), no pico de absortância do trigo na região do visível (EST2) e no pico de reflectância do trigo na região do infravermelho próximo (EST3, EST4 e EST5).

Portanto, as transformações de bandas espectrais, também conhecidas por índices vegetativos, e utilizadas neste trabalho, foram denominadas de IVEST e ND e as equações para sua obtenção, estão listadas a seguir:

$$\text{IVEST} = (\text{EST1} + \text{EST4}) / \text{EST2} \quad (2)$$

$$\text{ND} = (\text{EST4} - \text{EST2}) / (\text{EST4} + \text{EST2}) \quad (3)$$

MEDIDAS AGRONOMICAS

Concomitantemente às medidas radiométricas foram obtidas algumas medidas agronômicas, quais sejam: biomassa verde, biomassa seca, ataque de pragas e doenças e porcentagem de ervas daninhas. A biomassa verde foi obtida através da coleta da parte aérea das plantas em três diferentes linhas de 0,5 m, dentro da parcela, numa área reservada para esta finalidade. A biomassa seca foi obtida a partir da secagem, em estufa, do material utilizado para determinação da biomassa verde. A determinação de pragas e doenças e porcentagem de ervas daninhas foi feita através de observação visual. Para cada parcela e em cada missão, foi também obtida uma fotografia vertical, colorida, em filme positivo, por meio de uma câmara fotográfica do tipo 35 mm, acoplada no mastro de elevação juntamente com as unidades detetoras do espectrorradiômetro. Estas fotografias, além de documentarem o estado em que se encontravam as parcelas amostrais, permitiram também determinar a porcentagem de cobertura do solo pela cultura.

Foram também obtidas outras informações, por parcela, tais como: data do plantio e da colheita, direção da linha de plantio e declividade. O espaçamento entre linhas e o número de plantas por metro linear foi constante para todas as parcelas.

Por ocasião da maturação do trigo foi realizada a colheita em uma área de 25 m² e a debulha deste material foi feita na Estação Experimental do Vale do Paranapanema, do Instituto Agrônomo de Campinas. Os grãos foram posteriormente secados em estufa obtendo-se então o peso de grãos em kg/25m². Visto que as parcelas estavam inseridas em lavouras de produção comercial, multiplicou-se este valor por 400, a fim de obter a produtividade em kg/ha.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

CURVAS DE RESPOSTA ESPECTRAL DO TRIGO

Sobre as parcelas amostrais do trigo foram obtidas 268 curvas espectrais ao longo de 10 missões radiométricas, realizadas durante a estação de crescimento do trigo na safra de 1988. As medidas foram obtidas com intervalos de aproximadamente 7 dias entre cada missão (Figura 1). As curvas espectrais geradas a partir das medidas radiométricas, representam a quantidade de energia refletida pela

cultura, em termos percentuais relativos a uma superfície 100 % refletora, no intervalo de comprimento de onda de 400 nm a 1100 nm. A Figura 2 mostra as curvas do fator de reflectância para uma das parcelas amostrais plantada com a variedade Anahuac para a primeira, sexta, e décima missões radiométricas.

As medidas radiométricas começaram a ser obtidas quando o trigo cobria boa parte do solo e, portanto, as curvas espectrais, apresentam, desde a primeira missão, a forma típica de uma cobertura de vegetação verde (Figura 2). Na região do verde (550 nm) ocorre um pequeno pico de reflexão que é responsável pela coloração verde da cultura. Na região do vermelho (670 nm), apenas uma pequena porção da energia incidente sobre as folhas é refletida pois grande parte é absorvida pelos pigmentos a fim de ser utilizada no processo da fotossíntese. Na região do infravermelho próximo (a partir de 760 nm) observamos que grande parte da energia incidente é refletida o que é devido à estrutura interna e número de camadas de folhas. Até a oitava missão (14/07/88) observa-se bem este comportamento espectral típico da vegetação. A partir daí, a cultura começa a entrar em maturação e observa-se uma diminuição na quantidade de energia absorvida na região do vermelho devido à senescência das folhas. Ao mesmo tempo ocorre uma diminuição da energia refletida na região do infravermelho próximo devido à degeneração das células das folhas além da diminuição do índice de área foliar.

Observando as curvas espectrais verificou-se que ocorre, de forma sistemática, uma queda brusca na quantidade de energia refletida pela cultura a partir do comprimento de onda de 900 nm, independentemente do estágio fenológico da cultura. De acordo com as curvas espectrais do trigo observadas na literatura não se verifica esta queda de energia refletida pela cultura no intervalo de 900 nm a 1100 nm e portanto, atribui-se esta queda na reflectância à falta de sensibilidade do equipamento, para obtenção de medidas radiométricas, em comprimentos de onda acima de 900 nm e conseqüentemente, reflectâncias acima deste comprimento de onda não foram consideradas neste trabalho.

DADOS ESPECTRAIS E SUA RELAÇÃO COM PARAMETROS AGRONOMICOS

Para expressar as condições de crescimento da cultura foi utilizado o índice vegetativo denominado IVEST (Equação 2) o qual foi selecionado após a análise preliminar de uma matriz de correlação dos diversos índices vegetativos com os parâmetros agronômicos. Não houve nenhuma razão muito específica que norteou a escolha deste índice pois ele apresentou resultados similares em comparação aos demais índices. A principal razão pela escolha do IVEST se deve ao fato de que ele utiliza as bandas do verde, vermelho, e infravermelho próximo para expressar as condições de crescimento da cultura. O IVEST foi relacionado, em cada missão (total de 10) com a produtividade de grãos ($g/25m^2$), biomassa verde ($g/1,5m$), biomassa seca ($g/1,5m$), e percentagem de cobertura do solo. Os resultados destas relações em termos do coeficiente de correlação são apresentados na Tabela 2. Na Figura 3 é mostrado de forma gráfica, a relação do índice vegetativo com a produtividade nas dez missões radiométricas.

Através dos resultados apresentados na Tabela 2 e na Figura 3 constatou-se que a melhor relação entre o índice vegetativo e a produtividade foi alcançada com as medidas espectrais da segunda quinzena do mês de junho quando a cultura se encontra em plena fase de emborrachamento, estando com pouco mais de 60 dias de idade. Esta

mesma constatação foi feita por Rudorff e Batista (1989a) onde os autores analisaram a relação entre o índice vegetativo extraído das imagens TM do Landsat e a produtividade observada em propriedades rurais, em dois anos safras seguidos 1987 e 1988, respectivamente.

Todavia, os índices vegetativos obtidos anteriormente às missões 5 e 6 também se relacionam bem com a produtividade. Por ocasião da primeira missão o trigo estava com aproximadamente 30 a 40 dias após o plantio e as parcelas amostrais de maior potencial de produção já apresentavam uma cobertura do solo acima de 70%, de tal forma que a resposta espectral predominante da parcela era proveniente da própria cultura. Já as parcelas com menor potencial de produtividade apresentavam uma cobertura de solo de aproximadamente 50% e que por conseguinte tiveram um índice vegetativo baixo devido à menor quantidade de folhas. Desta forma podemos afirmar que, embora as melhores relações entre o índice vegetativo e a produtividade foram obtidas entre 60 e 70 dias após o plantio, observam-se boas relações desde o estágio em que a cultura se encontra com 30 a 40 dias após o plantio (missão 1). Já nas três últimas missões a relação entre os dados espectrais e a produtividade é bastante baixa e tende a diminuir à medida em que avança o estágio fenológico da cultura pois ela começa a entrar na fase de maturação e senescência. A Tabela 3 permite confirmar estas observações e mostra que os coeficientes da regressão da produtividade observada com o índice vegetativo são bastante estáveis, exceto para as três últimas missões.

A partir destas observações podemos indicar que o período de 30 até 70 dias após plantio é o mais apropriado para estimar a produtividade a partir de dados espectrais, pelo menos para as variedades analisadas neste estudo, as quais têm um ciclo de 100 a 120 dias. Este resultado é bastante encorajador pois mostra que os dados espectrais podem ser obtidos durante um período bastante amplo (40 dias) além de permitirem estimar a produtividade com boa antecedência à colheita.

As relações do índice vegetativo com a biomassa verde, e com a biomassa seca, se apresentaram, em praticamente todas as missões, com resultados inferiores, em termos do coeficiente de correlação, quando comparadas com as relações com a produtividade, conforme pode ser visto na Tabela 2. Analisando os resultados da correlação do índice vegetativo com a biomassa, observamos que os coeficientes mais elevados foram os da primeira missão, o que vem confirmar a observação feita por Richardson et alii (1982). Os autores afirmam que, à medida em que avança o ciclo da cultura ocorre um aumento da biomassa devido ao crescimento da cultura como um todo, enquanto que o índice vegetativo está mais relacionado com a quantidade de folhas verdes (índice de área foliar) as quais são as principais responsáveis pelo processo da fotossíntese e conseqüentemente pela produção final.

Na Tabela 4 são apresentados os coeficientes de correlação (r) da biomassa verde e seca com a produtividade observada, e a comparação destes resultados com os da Tabela 2 mostra que a produtividade se correlaciona bem melhor com o índice vegetativo do que com a biomassa verde. Este resultado é bastante animador pois o índice vegetativo pode ser obtido através de imagens de satélite, sobre extensas áreas, e com uma alta resolução espacial. Além disto ele é obtido de forma objetiva e não destrutiva. Na Tabela 4 são mostrados também os coeficientes de correlação da biomassa verde com a biomassa seca.

ANÁLISE MULTITEMPORAL DO ÍNDICE VEGETATIVO

Pinter Jr. et alii (1981) sugeriram uma técnica para estimar a produtividade através de dados espectrais obtidos ao longo do ciclo da cultura. Seguindo a metodologia deste trabalho, os dados espectrais foram transformados no índice vegetativo ND (Equação 3) e os valores deste índice, para cada parcela, foram plotados ao longo do ciclo da cultura, a fim de se obter a trajetória espectral da parcela, que é a variação do índice vegetativo ao longo do ciclo da cultura. Como as medidas espectrais de cada parcela foram obtidas em intervalos de aproximadamente 7 dias, utilizou-se um método de interpolação que estima os valores para intervalos regulares de 5 dias.

A Figura 4 mostra, como exemplo, a trajetória espectral de 6 parcelas amostrais, desde a fase em que 50% das plantas estão emborrachadas até a maturação. Pode-se observar visualmente que a área abaixo de cada curva está estreitamente relacionada com a produtividade final. A relação existente entre a produtividade e o índice vegetativo, integrado durante um certo intervalo, é bastante interessante pois mostra que tanto o período em que o IAF se mantém no patamar quanto a intensidade da atividade fotossintética, determinam, de forma muito significativa, a produtividade final. A fim de eliminar do índice vegetativo os componentes não relacionados com a atividade fotossintética, estabeleceu-se, de forma empírica, uma linha básica, abaixo da qual a atividade fotossintética é considerada muito baixa, de tal forma que este valor (0,55) foi subtraído do índice vegetativo, antes de se obter o índice integrado. O valor da linha básica corresponde ao valor do índice vegetativo por ocasião da maturação da parcela de maior produtividade. Nesta fase a atividade fotossintética tende a zero.

A Figura 4 mostra também que o emprego do índice vegetativo obtido em apenas uma observação, durante o ciclo da cultura, acarreta maiores erros na estimativa, do que o índice vegetativo integrado, pois este representa melhor as variações espectrais da cultura ao longo de seu ciclo.

Os valores do índice vegetativo integrado, de cada parcela, foram somados a partir do quadragésimo dia após plantio (50% das plantas na fase de emborrachamento) para as variedades BH-1146 e IAC-24 e a partir do quinquagésimo dia para a variedade Anahuac até o período em que a cultura estava completamente senescida (100 a 110 dias). A diferença entre os períodos de integração das variedades se deve ao fato que as variedades BH-1146 e IAC-24 são precoces em relação à variedade Anahuac e, portanto, entram na fase de emborrachamento mais cedo. A relação entre os valores do índice vegetativo integrado (NDI) e a produtividade final foi expressa através da seguinte equação de regressão:

$$\text{Prod. Est.} = 474 + 491 \times \text{NDI} \quad (4).$$

Esta relação apresenta um coeficiente de correlação de 0,81 e um erro padrão da estimativa de 364 kg/ha.

Nesta análise ficou bastante evidente que a resposta espectral da variedade IAC-24 não está bem relacionada com a produtividade final (Figura 5). Todavia, o número de amostras desta variedade é pequeno e, portanto, tal observação não pode ser conclusiva. Apesar disto, resolveu-se fazer a regressão entre o NDI e a produtividade, omitindo-se as parcelas com a variedade IAC-24 e obteve-se um coeficiente de correlação igual a 0,96 e um erro padrão da estimativa igual a 208

kg/ha. Esta relação foi expressa através da seguinte equação de regressão:

$$\text{Prod. Est.} = 275 + 624 \times \text{NDI} \quad (5).$$

Este resultado se aproxima muito daquele obtido por Pinter Jr. et alii (1981) que sugeriram a utilização deste método para estimar a produtividade do trigo.

A Figura 5 mostra a relação entre a produtividade observada e o índice vegetativo integrado (NDI) para as parcelas analisadas com e sem a variedade IAC-24.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As curvas espectrais apresentam, de forma sistemática, uma queda brusca na quantidade de energia refletida pela cultura a partir do comprimento de onda de 900 nm, independentemente do estágio fenológico da cultura. Atribui-se esta queda na reflectância à falta de sensibilidade do equipamento, para obtenção de medidas radiométricas, em comprimentos de onda acima de 900 nm e conseqüentemente, reflectâncias acima deste comprimento de onda não foram consideradas neste trabalho.

A melhor relação entre o índice vegetativo e produtividade foi alcançada com as medidas espectrais da segunda quinzena do mês de junho quando a cultura se encontra em plena fase de emborrachamento, estando com pouco mais de 60 dias de idade, em concordância com resultados obtidos anteriormente por Rudorff e Batista (1989a). Porém foram observadas boas relações desde o estágio em que a cultura se encontrava com 30 a 40 dias após o plantio (missão 1).

Nas três últimas missões a relação entre os dados espectrais e a produtividade é bastante baixa e tende a diminuir à medida em que avança o estágio fenológico da cultura pois ela começa a entrar na fase de maturação e senescência.

Os resultados obtidos são bastante encorajadores pois mostram que os dados espectrais podem ser obtidos durante um período bastante amplo (30 a 70 dias após o plantio) permitindo estimar a produtividade com boa antecedência à colheita.

As relações do índice vegetativo com a biomassa verde, e com a biomassa seca, se apresentaram, em praticamente todas as missões, com resultados inferiores, em termos do coeficiente de correlação, quando comparadas com as relações com a produtividade. Este resultado é bastante animador pois o índice vegetativo pode ser obtido através de imagens de satélite, sobre extensas áreas, e com uma alta resolução espacial. Além disto ele é obtido de forma objetiva e não destrutiva.

A relação entre os valores do índice vegetativo integrado (NDI) e a produtividade final apresenta um coeficiente de correlação de 0,81 e um erro padrão da estimativa de 364kg/ha. Omitindo-se as parcelas com a variedade IAC-24 foi obtido um coeficiente de correlação igual a 0,96 e um erro padrão da estimativa igual a 208 kg/ha, sendo que este resultado se aproxima muito daquele obtido por Pinter Jr. et alii (1981) que sugeriram a utilização deste método para estimar a produtividade do trigo.

O índice vegetativo integrado, representa de forma adequada a intensidade e duração da atividade fotossintética durante o ciclo da cultura, de tal forma que a produtividade final foi significativamente correlacionada com o índice vegetativo integrado.

Os procedimentos de campo para tomada das medidas radiométricas se mostraram satisfatórios, entretanto para a estimativa da produtividade observada, a colheita de 25 m² parece exagerada, principalmente quando a área é bastante homogênea. Sugere-se que 5 amostras de 1 m², distribuídas aleatoriamente dentro da parcela sejam utilizadas.

A análise da relação entre o índice vegetativo e a produtividade para as diferentes variedades, mostrou que a variedade IAC-24 teve um comportamento adverso do esperado. Este resultado pode ser devido tanto à amostragem dos campos selecionados quanto às características específicas desta variedade. Para uma investigação deste resultado, sugere-se a realização de experimentos envolvendo diversas variedades.

A tomada de medidas radiométricas em intervalos semanais durante o ciclo da cultura, em campos comerciais é sem dúvida uma tarefa extremamente trabalhosa, principalmente devido a distância entre as parcelas. Para a otimização de esforços, sugere-se que sejam investigados os modelos de reflectância propostos na literatura, devidamente calibrados para as condições de cultivo em clima tropical usando experimentação de campo e posteriormente validados para condições de produção comercial.

AGRADECIMENTOS

A colaboração de Moacir Godoy Júnior, Moacir dos Santos, Carlos Alberto Steffen, Lélío Ribeiro de Sá e Antonio F. P. Oviedo do INPE; de César Luiz Bertolucci do Banco do Brasil; de Célia Regina Zimback, Eduardo Pissiliate Júnior, Antonio César Azenha e Silvia H. S. T. Pissiliate da Escola Superior de Agronomia de Paraguaçu Paulista, na realização de diversas atividades.

A Fundação Banco do Brasil pelo suporte financeiro e apoio logístico. Em especial, gostaríamos de ressaltar o interesse dos Senhores Altair M. Lacroix (BB/VIPER), Eduardo S. de Freitas (SUPER/SP), e Celso M. A. de Castro (BB/COTEC) na realização deste trabalho.

Aos funcionários da Estação Experimental do Vale do Paranapanema do IAC pela fundamental colaboração na atividade referente à debulha do trigo colhido nas parcelas amostrais.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ASHLEY, M.D.; REA, J. Seasonal vegetation differences from ERTS imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 41(6):713-719, June 1975.
- DAUGHTRY, C.S.T.; GALLO, K.P.; BIEHL, L.L.; KANEMASU, E.T.; ASRAR, G.; BLAD B.L.; NORMAN, J.M.; GARDNER, B.R. Spectral estimates of agronomics characteristics of crops. In: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA SYMPOSIUM, Purdue University, W. Lafayette, IN, 1984. p. 348-355.

- DUGGIN, M. J. The field measurement of reflectance factors. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46(5):643-647, 1980.
- DUSEK, D.A.; JACKSON, R.D.; MUSICK, J.T. Winter wheat vegetation indices calculated from combinations of seven spectral bands. Remote Sensing of Environment, 18:255-267, 1985.
- HATFIELD, J.L. Remote sensing estimators of potential and actual crop yield. Remote Sensing of Environment. 13(4):301-311, 1983.
- _____. Spectral behavior of wheat yield variety trials. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 47(10):1487-1491, Oct. 1981.
- HENDERSON, K. E.; BADHWAR, G. D. An initial model for estimating soybean development stages from spectral data. Remote Sensing of Environment, 14: 55-63, 1984.
- IDSO, S.B.; PINTER, P.J.; JACKSON, R.D.; REGINATO, R.J. Estimation of grain yields by remote sensing of crop senescence rates. Remote Sensing of Environment, 9(1):87-91, 1980.
- PEARSON, R.L.; MILLER, L.D. Remote mapping of standing crop biomass for estimating of the productivity of the shortgrass prairie. IN: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 8., Ann Arbor, MI, 1972. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM, 1972, p. 1357-1381.
- PINTER, P.J.; JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J. Multidate spectral reflectance as predictors of yield in a water stressed wheat and barley. International Journal of Remote Sensing, 2(1):43-48, 1981.
- RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C.L. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43(12):1541-1552, Dec. 1977.
- RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C.L.; ARKIN, G.F.; NIXON, P.R.; GERBERMANN, A.H. Remotely-sensed spectral indicators of sorghum development and their use in growth modelling. Agricultural Meteorology, 26(1):11-23, 1982.
- RUDORFF, B.F.T. Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, INPE, dez. 1985 (INPE-3744-TDL/202).
- RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Relatório da Fase I do projeto ESTIMA - Desenvolvimento de um modelo para estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar baseado em dados Landsat e agrometeorológicos. São José dos Campos, INPE, fev. 1988 (INPE-4466-RPE/560).
- RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Relatório da Fase II do projeto ESTIMA-Dados Landsat-TM e agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura do trigo ao nível de propriedades rurais. São José dos Campos, INPE, maio 1989a (INPE-4782-RPE/582).
- RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Estimativa da produtividade agrícola da cultura da cana-de-açúcar através de um modelo agrometeorológico-espectral. São José dos Campos, INPE, jun. 1989b (INPE-4831-RPE/592).

RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T.; GODOY JR., M.; SA, L.R.; STEFFEN C.A.; BERTOLUCCI, C.L.; FREITAS, E.S.; ZIMBACK, C.R.; AZENHA, A.C.; OVIEDO, A.F.P.; PISSILIATE JR., E.; PISSILIATE, S.H.S.T.; Relatório da campanha de medidas radiométricas do trigo na região de Assis - safra 1988. São José dos Campos, INPE, 1989c (INPE-4949-RPE/598).

SCHEEREN, P.L. Informações sobre o trigo. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. EMBRAPA, Passo Fundo, RS, 1986. p.36

SETZER, J. Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo. São Paulo, Comissão Interestadual da Bacia do Paraná-Uruguai, 1966, 66p.

TUCKER, C.J.; HOLBEN, B.N.; ELGIN, J.H.; McMURTEY, J. Relationship of spectral data to grain variation. Photogrammetric and Remote Sensing, 46(5):657-666, May 1980.

____ Remote sensing of total dry-matter. Remote Sensing of Environment, 11(3):171-189, 1981.

WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J.; KANEMASU, E.T. Leaf area index estimates for wheat from Landsat and their implications for evapotranspiration and crop modelling. Agronomy Journal, 71(2):336-342, Mar./Apr. 1979.

TABELA 1

FAIXAS DE COMPRIMENTO DE ONDA SELECIONADAS (EST) E CORRESPONDENTES BANDAS DO SPECTRON SE-590

BANDA (EST)	COMPRIMENTO DE ONDA (nm)	BANDAS DO ESPECTRORRADIÔMETRO
1	547 - 562	66 - 71
2	661 - 673	105 - 109
3	756 - 780	137 - 145
4	786 - 823	147 - 159
5	852 - 880	168 - 177

TABELA 2

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE VEGETATIVO E PARÂMETROS AGRONÔMICOS

MISSÃO	DATA	NÚMERO PARCELAS	NÚMERO APROX. DIAS APÓS PLANTIO	PARÂMETROS AGRONÔMICOS			
				PRODUTIVIDADE	BIOMASSA		PCS ¹
					VERDE	SECA	
1	19/05	15	30 - 40	0,82**	0,87**	0,83**	0,65**
2	26/05	25	35 - 45	0,76**	0,75**	0,62**	0,75**
3	02/06	30	45 - 55	0,81**	0,77**	0,58**	0,78**
4	09/06	30	50 - 60	0,84**	0,77**	0,70**	0,70**
5	16/06	30	55 - 65	0,82**	0,59**	0,41*	0,73**
6	23/06	29	60 - 70	0,85**	0,72**	0,33	0,33
7	30/06	25	65 - 75	0,93**	0,72**	0,52**	0,70**
8	14/07	30	70 - 80	0,68**	0,70**	0,55**	0,62**
9	22/07	25	75 - 85	0,81**	0,58**	0,31	0,37*
10	04/08	26	80 - 90	0,31	-	-	-0,34

1 = Percentagem e cobertura de solo

** α = 0,01

* α = 0,05

TABELA 3

EQUAÇÃO DE REGRESSÃO E COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (r^2) PARA A RELAÇÃO ENTRE A PRODUTIVIDADE (kg/ha) E O ÍNDICE VEGETATIVO (IVEST)

MISSÃO	DATA	NÚMERO PARCELAS	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	r^2
1	19/05	15	PROD = 97 + 95,1 x IVEST	0,66**
2	26/05	25	PROD = 273 + 97,3 x IVEST	0,58**
3	02/06	30	PROD = 166 + 95,7 x IVEST	0,67**
4	09/06	30	PROD = 302 + 92,3 x IVEST	0,69**
5	16/06	30	PROD = 236 + 94,3 x IVEST	0,68**
6	23/06	29	PROD = 334 + 101,0 x IVEST	0,72**
7	30/06	25	PROD = 251 + 115,0 x IVEST	0,86**
8	14/07	30	PROD = 796 + 127,0 x IVEST	0,46**
9	22/07	25	PROD = 172 + 360,0 x IVEST	0,63**
10	04/08	26	PROD = 1056 + 267,0 x IVEST	0,10**

** α = 0,01

TABELA 4

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO PARA A RELAÇÃO DA PRODUTIVIDADE OBSERVADA COM A BIOMASSA VERDE E SECA E DA BIOMASSA VERDE COM A BIOMASSA SECA

MISSÃO	DATA	NÚMERO PARCELAS	BIOMASSA VERDE x PRODUTIVIDADE OBSERVADA	BIOMASSA SECA x PRODUTIVIDADE OBSERVADA	BIOMASSA VERDE x BIOMASSA SECA
1	19/05	15	0,69**	0,64**	0,93**
2	26/05	25	0,51**	0,48**	0,90**
3	02/06	30	0,59**	0,35*	0,90**
4	09/06	30	0,68**	0,61**	0,95**
5	16/06	30	0,52**	0,44*	0,84**
6	23/06	29	0,74**	0,47**	0,75**
7	30/06	25	0,77**	0,61**	0,82**
8	14/07	30	0,73**	0,75**	0,94**
9	22/07	25	0,73**	0,64**	0,90**

** α = 0,01

* α = 0,05

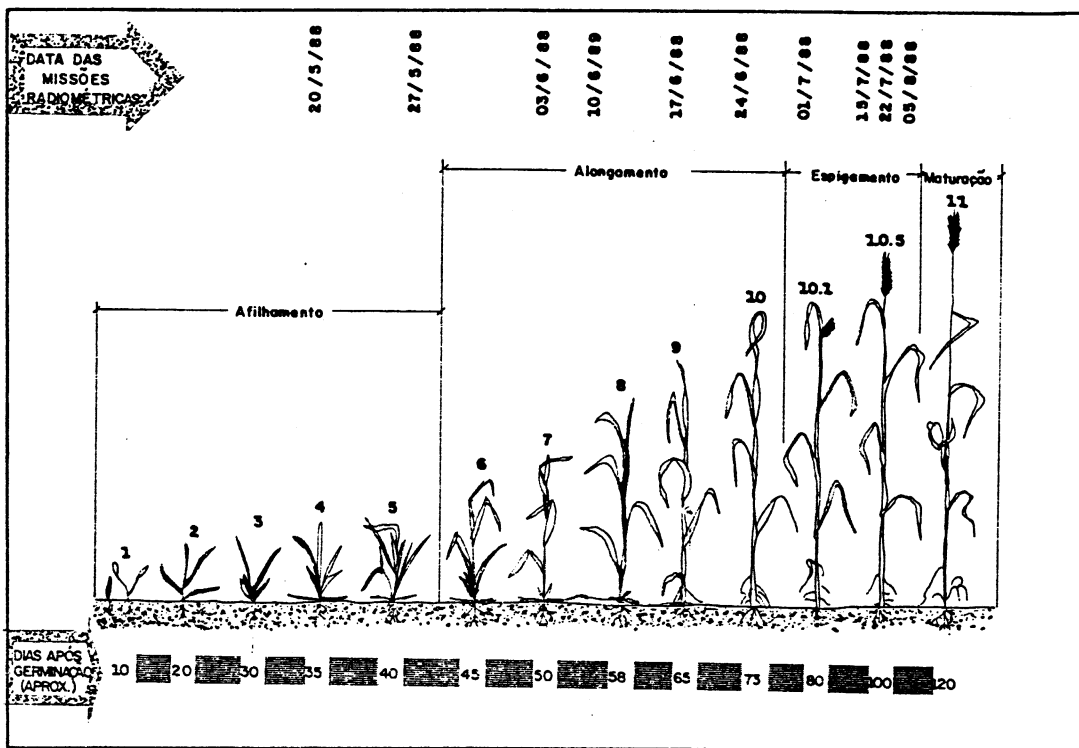


Fig. 1 - Estágios de crescimento do trigo e datas das missões radiométricas

FONTE: Scheeren (1986), p.25.

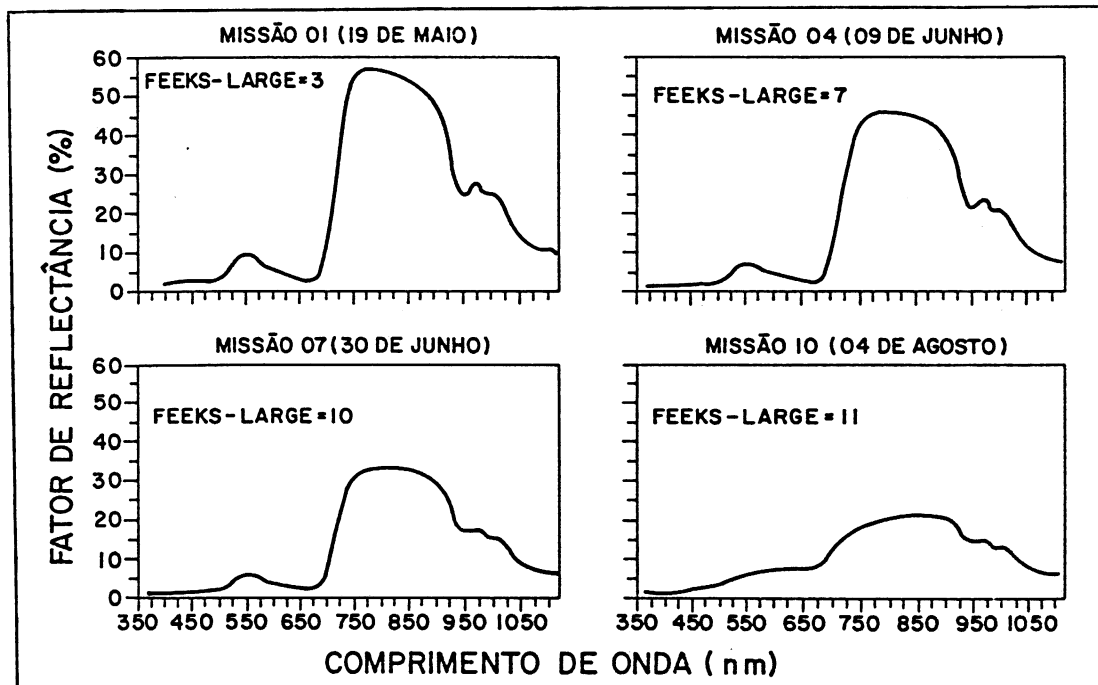


Fig. 2 - Curvas do fator de reflectância da parcela 8, variedade Anahuac, plantada em 15 de abril, em quatro missões mostrando a queda do fator de reflectância a partir 900 nm.

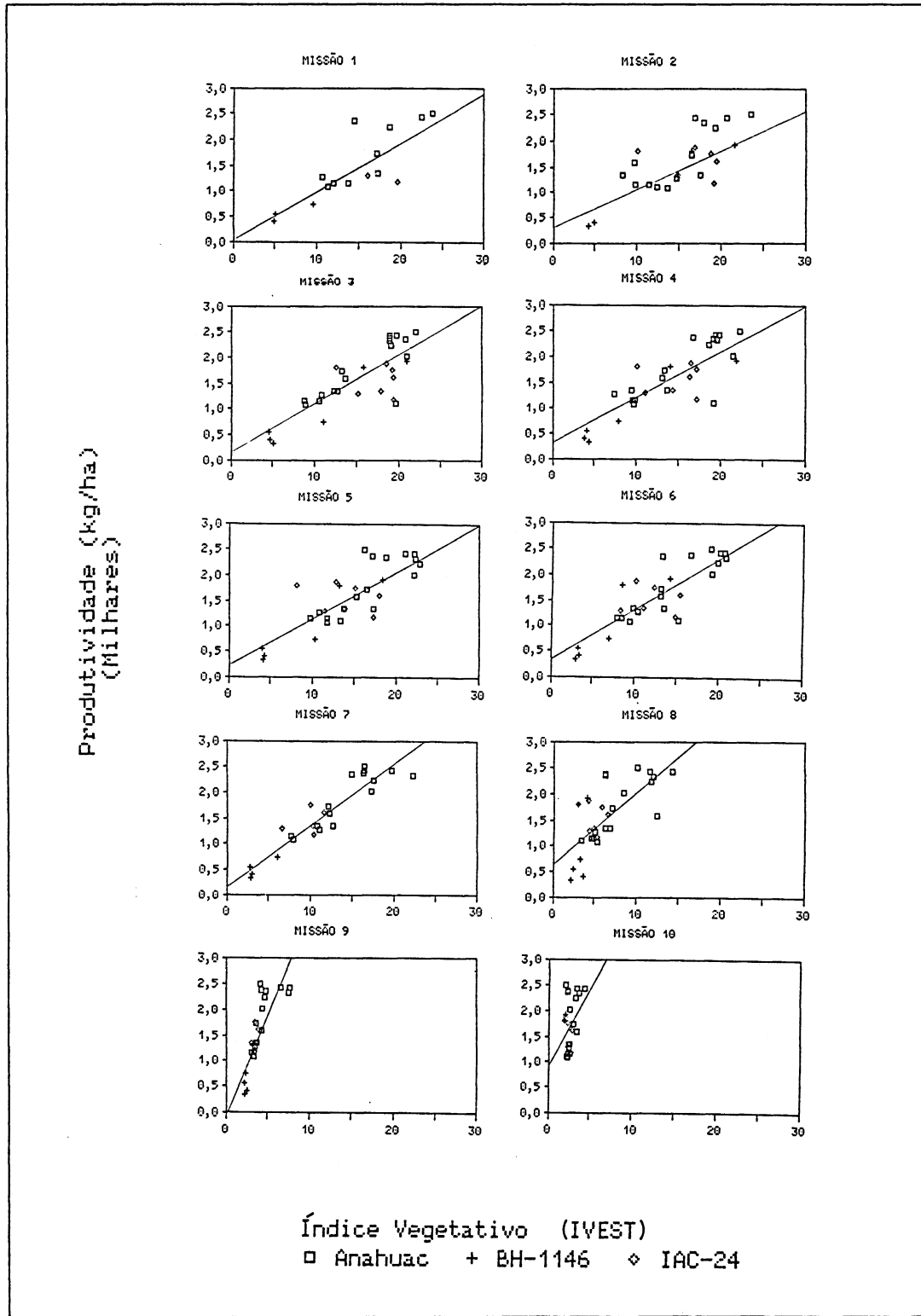


Fig. 3 - Relação entre o índice vegetativo (IVEST) e o produtividade observada (kg/ha) por missão radiométrica.

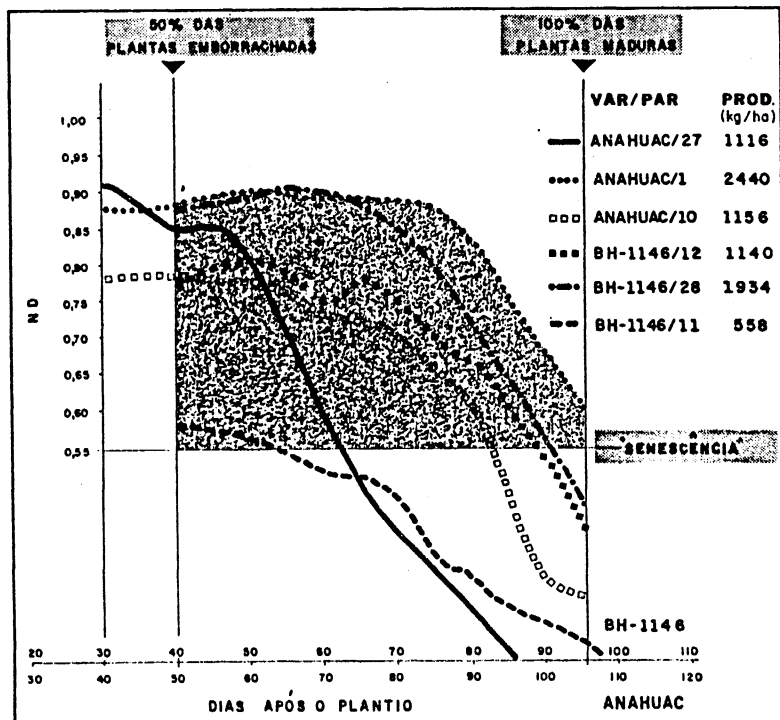


Fig. 4 - Trajetória espectral de 6 parcelas amostrais e suas produtividades observadas.

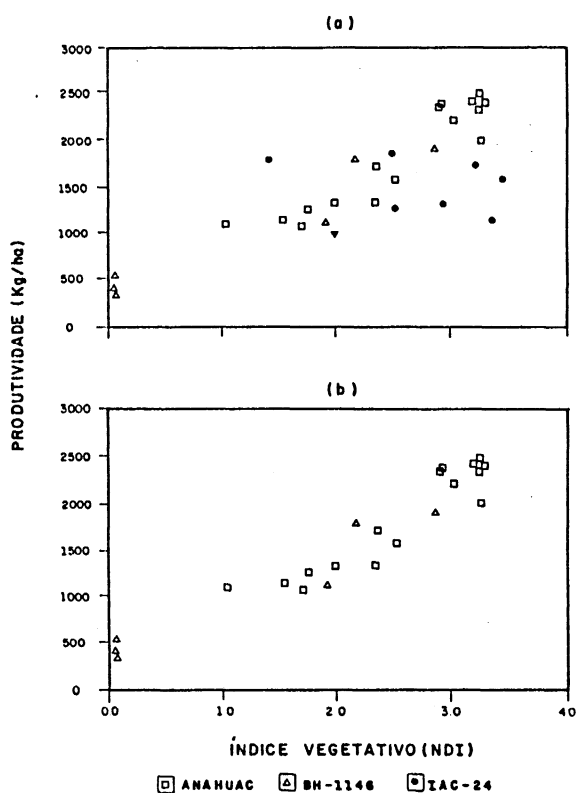


Fig. 5 - Relação entre a produtividade observada (kg/ha) e o índice vegetativo integrado (NDI) para as 30 parcelas amostrais (a) e excluindo a variedade IAC-24 (b).