

VARIÁVEIS BIOFÍSICAS E REFLECTÂNCIAS ESPECTRAIS

TM PARA A CULTURA DE FEIJÃO

Antonio Roberto Formaggio
José Carlos Neves Epiphânio
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515
12201 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

Os objetivos do presente trabalho foram identificar os tipos e as significâncias dos relacionamentos entre variáveis biofísicas e variáveis espectrais para o feijão, bem como trazer subsídios sobre as bandas espectrais portadoras de maior conteúdo de informações agronômicas. Três parâmetros agronômicos (Índice de Área Foliar, Porcentagem de Cobertura Vegetal sobre o Terreno e Fitomassa Seca) foram coletados durante o ciclo de inverno de 42 áreas comerciais de feijão irrigados por aspersão. Os dados espectrais consistiram dos níveis de cinza do TM/LANDSAT corrigidos para efeitos aditivos da atmosfera e transformados para valores de reflectância. Além das reflectâncias nas seis bandas refletivas do TM, foram obtidos, também, três índices de vegetação (I.V.): a Razão Simples, a Diferença Normalizada e o Índice de Vegetação Transformado. Análises de regressão indicaram que o tipo predominante de relacionamento entre as variáveis agronômicas e as espectrais é o curvilínear (logarítmico ou exponencial), sendo as correlações altas e significativas. A fase de desenvolvimento vegetativo (anterior ao início da senescência) deve ser a melhor para os relacionamentos entre variáveis agronômicas e variáveis espectrais.

ABSTRACT

Leaf area index (LAI), biomass and other agronomic variables are considered very good indicators of the general conditions of a crop. The utilization of these biophysical parameters (estimated from remotely sensed multispectral data) for large-scale applications by means of growth/yield models - this is one of the main goals to the agricultural remote sensing research. The objectives of this investigation were: (a) to identify types and significances of the biophysical versus spectral variables relationships for bean; and, (b) to verify what are the spectral bands more agronomically informative. Three agronomic parameters (LAI, Percent Soil Cover and Dry Biomass) were obtained during the winter cycle from 42 irrigated commercial fields. The spectral data were the digital numbers from TM/LANDSAT; these data were corrected for atmospheric additive effects and transformed to reflectance values. In addition to the reflective TM bands three vegetation indices were evaluated: Simple Ratio ($RRS = TM4/TM3$), Normalized Difference [$RND = (TM4 - TM3)/(TM4 + TM3)$] and Transformed Vegetation Index ($RTV = \sqrt{RND+0,5}$). Regression analyses indicated that the curvilinear (logarithmic or exponential) relations were predominant in the spectral versus agronomic relations; the correlation coefficients were high and significant. The best cycle phase for agronomic versus spectral relationships was during the vegetative development (before the beginning of the senescence). There is a great functional equivalence between the three utilized vegetation indices, mainly for RND and RTV.

1 - INTRODUÇÃO

Dentre as principais metas da pesquisa em sensoriamento remoto agrícola destaca-se a de estimar variáveis agronômicas indicadoras das condições de culturas via variáveis espectrais obtidas por sensores em níveis distintos de coleta de dados.

Atualmente, já existem modelos de crescimento/produktividade para as principais culturas, os quais baseiam-se em dados meteorológicos (p.ex.: temperaturas máximas e mínimas, umidade do ar, etc.); contudo, são dados pontuais e de coleta trabalhosa. Além disso, não levam em consideração condições do solo, pragas, doenças, seca, grão, nematóides, nutrientes, etc.

Os dados espectrais, segundo WIEGAND (1984), podem suprir esta carência e servir como excelentes indicadores das condições gerais de vigor das culturas agrícolas, para áreas grandes e contínuas (e não apenas de forma pontual), podendo atuar, também, como dados de entrada e guias para melhorar o desempenho dos modelos acima referidos.

Desta maneira, objetiva-se neste trabalho, trazer subsídios para questões relacionadas a se determinar como são, efetivamente, as relações entre alguns parâmetros espectrais e algumas variáveis agronômicas da cultura de feijão; em que nível de significância elas ocorrem e quais são as faixas espectrais portadoras do maior conteúdo de informações culturais; entre outras abordagens.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As folhas são consideradas os elementos dominantes das plantas quanto às influências sobre as propriedades espectrais de dosséis vegetais.

Se for considerado o espectro de reflectância de uma folha normal verde, no intervalo entre 400 e 2600nm, ele pode ser subdividido em três regiões espectrais.

Entre 400nm (azul) e 700nm (vermelho), a reflectância é muito baixa. Em 550nm ocorre um pico de reflexão causado por duas bandas de absorção de clorofila centradas em aproximadamente 450nm e em 650nm (HOFFER, 1978).

Segundo este mesmo autor, na região espectral entre 700 e 1400nm (no infravermelho próximo), as folhas verdes sadias apresentam altos valores de reflectância ($\approx 45 - 50\%$), alta transmitância ($\approx 45 - 50\%$) e baixa absorptância (menos de 5%).

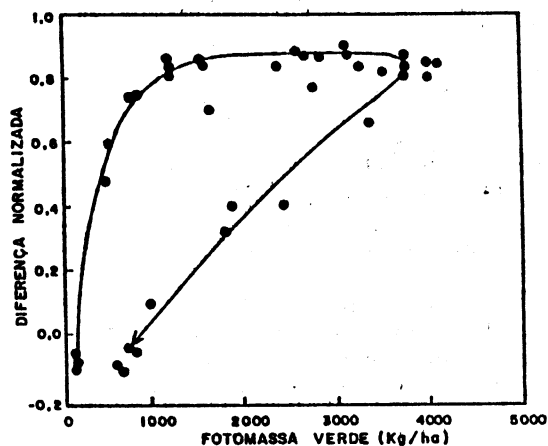
Nesta região do infravermelho próximo, segundo ALLEN e RICHARDSON (1968), quando se sobrepõem várias camadas de folhas, ocorrem aumentos nos níveis de reflectância, até que num certo número de camadas atinge-se um valor estável máximo denominado de "reflectância infinita".

Em outras palavras, como explica GARDNER (1983), isto significa que os padrões de reflectância de dosséis agrícolas, no infravermelho próximo, respondem à densidade vertical da fitomassa devido ao efeito de camadas foliares múltiplas, também conhecido como "reflectância múltipla". Ou seja, do total da energia incidente na primeira camada de folhas, metade é refletida e metade é transmitida para a segunda camada; desta parte transmitida, metade é refletida para cima e metade é transmitida para a camada inferior; e assim sucessivamente, de tal forma que, aumentando-se o número de camadas de folhas, aumenta-se até certo limite, a reflectância no infravermelho próximo.

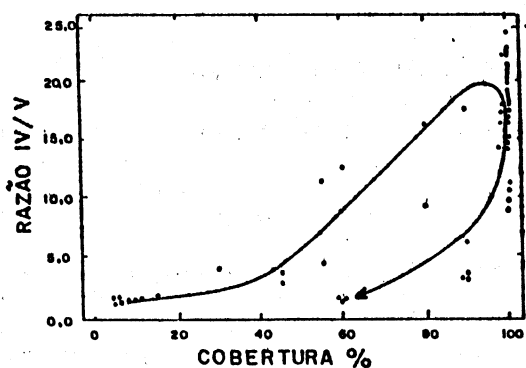
Na região do infravermelho médio, (1400 a 2600nm) como indicam BAUER et alii (1980), a reflectância da vegetação verde é inversamente relacionada com a quantidade total de água presente nas folhas.

Quando se relacionam parâmetros agrônômicos com indicadores espectrais das condições vegetativas de culturas, alguns dos fatores influenciadores mais citados têm sido os solos, a estrutura de dossel/arquitetura das plantas e os aspectos de geometria sol/sensor.

É interessante notar o "fenômeno de trajetória" dos dados ao longo do ciclo agrícola (Figuras 1a e 1b), relatado por TUCKER et alii (1979) e por HOLBEN et alii (1980). Neste caso da Figura 1b, por exemplo, os valores do parâmetro COBERTURA % vão aumentando durante o ciclo da soja até atingir um máximo, platô onde permanecem por certo tempo e depois decrescem assumindo valores semelhantes ao período anterior ao referido platô. Ao se confrontar uma variável espectral com a COBERTURA %, notar-se-á, então, o "fenômeno de trajetória".



(a)



(b)

FIGURA 1 - RELAÇÕES ENTRE: (a) DIFERENÇA NORMALIZADA VERSUS FITOMASSA VERDE (ADAPTADO DE TUCKER ET ALII, 1979); (b) RAZÃO IV/V VERSUS COBERTURA % (ADAPTADO DE HOLBEN ET ALII, 1980); NAS QUAIS OCORRE O "FENÔMENO DE TRAJETÓRIA" DOS DADOS AO LONGO DOS RESPECTIVOS CICLOS AGRÍCOLAS.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

Os dados agrônômicos foram coletados em 42 áreas de feijão irrigados por sistemas de pivô central durante o ciclo de inverno de 1987, na região de Guaira/Barretos, a noroeste Estado de São Paulo, Brasil.

Em função de serem citados como os principais indicadores das condições de vigor das culturas, os parâmetros agrônômicos coletados nas referidas 42 áreas de feijão e

utilizados neste trabalho foram o Índice de Área Foliar (áreas das camadas de folhas por superfície de terreno ocupada pelas plantas), Fitomassa Seca (g/m) e Porcentagem de Cobertura do Terreno por Vegetação, simbolizados respectivamente por IAF, FIT e COV.

Quanto aos dados espectrais, utilizando-se a CCT ("compatible computer tape") referente à passagem TM/LANDSAT-5 do dia 20 de junho de 1987, obtiveram-se 5 amostras de níveis de cinza (nas seis bandas refletivas do TM) com 12 pixels cada amostra, para cada uma das 42 áreas de feijão estudadas. Antes de se extrair os níveis de cinza foi feita uma correção para valores aditivos dos efeitos atmosféricos conforme proposição de SCHOWENGERDT (1983).

Em seguida, os níveis de cinza foram transformados para valores de reflectâncias TM, conforme os procedimentos propostos por MARKHAM e BARKER (1986).

Com os valores das reflectâncias TM3 e TM4 foram obtidos três índices espectrais de vegetação, conforme segue:

(a) RAZÃO SIMPLES (JORDAN, 1969); designado por RRS:
 $RRS = TM4/TM3$

(b) DIFERENÇA NORMALIZADA (ROUSE et alii, 1973), designado por RND:
 $RND = (TM4 - TM3)/(TM4 + TM3)$

(c) ÍNDICE DE VEGETAÇÃO TRANSFORMADO (DEERING et alii, 1975), designado por RTV:
 $RTV = \sqrt{RND + 0,5}$

Com os valores dos parâmetros agrônômicos (IAF, FIT e COV) e das variáveis espectrais (reflectâncias nas 6 bandas individuais TM e 3 índices de vegetação) foram feitas análises de regressão segundo os modelos linear simples, logarítmico e exponencial (ZAR, 1974), a fim de verificar quais os tipos e as significâncias das relações entre os dois tipos de variáveis. Análises gráficas dos diagramas de dispersão das 3 variáveis agrônômicas versus as 9 variáveis espectrais também mostraram-se úteis para algumas discussões.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os coeficientes de correlação e os melhores tipos de ajustes, segundo os modelos linear, logarítmico e exponencial, obtidos por análise de regressão entre as 3 variáveis agrônômicas (IAF, FIT e COV) e as 9 variáveis espectrais utilizadas (6 bandas refletivas TM e 3 índices de vegetação), são apresentados na Tabela 1.

Pela Tabela 1, verifica-se que os modelos que melhor ajustam as relações entre as 3 variáveis agrônômicas (IAF, FIT e COV) com as 9 variáveis espectrais são os curvilíneos logarítmico (20 casos) e exponencial (6 casos), a não ser para um único par de variáveis (IAF x RRS), para o qual, o modelo linear mostrou-se ligeiramente melhor.

Tomando-se, por exemplo, os diagramas de dispersão entre as variáveis reflectância TM3 x IAF (Figura 2.a) e reflectância TM4 x IAF (Figura 2.b), torna-se mais clara a fundamentação para estes tipos de ajuste.

A diminuição dos valores de reflectância no vermelho (TM3), na Figura 2.a, à medida em que avança o ciclo biológico do feijão, é função do aumento do IAF, que propicia aumento da quantidade de clorofila, aumentando, em consequência, a absorção de radiação pela clorofila (HOFFER, 1978). Esta absorção aumenta até um máximo e, a partir deste ponto, fica constante, região onde a curva torna-se assintótica.

Já no caso do infravermelho próximo (TM4), na Figura 2.b, o comportamento é inverso. Ou seja, no início do ciclo (quando o IAF e os outros parâmetros agrônômicos da cultura são ainda baixos) ocorre pouca reflexão. Com o avanço do ciclo biológico, o número de folhas aumenta rapidamente (de maneira horizontal - refletindo na Porcentagem de Cobertura Vegetal sobre o terreno; e de maneira vertical - aumentando o número de camadas de folhas na mesma área de terreno e aumentando o IAF).

TABELA 1

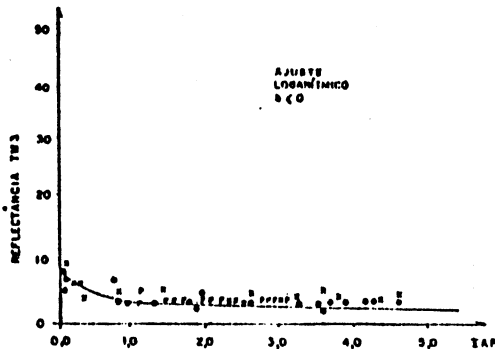
COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO E REGRESSÕES PELOS MODELOS LINEAR SIMPLES, LOGORÍTMICO E EXPONENCIAL PARA OS DIVERSOS PARES FORMADOS PELAS 3 VARIÁVEIS AGRONÔMICAS E 9 VARIÁVEIS ESPECTRAIS ESTUDADAS

VAR. AGR.	VAR. X ESP.	VALORES DE CORRELAÇÃO			MELHORES MODELOS	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SEGUNDO OS MELHORES MODELOS
		LINEAR	LOG.	EXPON.		
IAF	RTM1	0,33	0,33	0,34	EXP. b>1	LOG (RTM1) = 0,21 - 0,01.IAF
	RTM2	0,38	0,43	0,36	LOG. b>0	RTM2 = 3,58 + 0,55.LOG (IAF)
	RTM3	-0,64	-0,83**	-0,67	LOG. b<0	RTM3 = 3,57 - 1,64.LOG (IAF)
	RTM4	0,77	0,77**	0,75	LOG. b>0	RTM4 = 26,30 + 17,15.LOG (IAF)
	RTM5	0,63	0,65**	0,63	LOG. b>0	RTM5 = 14,11 + 4,16.LOG (IAF)
	RTM7	-0,27	-0,41*	-0,22	LOG. b<0	RTM7 = 5,62 - 1,10.LOG (IAF)
	RRS	0,79**	0,78	0,76	LIN. b>0	RRS = 4,42 + 2,59.IAF
	RND	0,70	0,93**	0,64	LOG. b>0	RND = 0,70 + 0,31.LOG (IAF)
	RTV	0,69	0,94**	0,67	LOG. b>0	RTV = 1,09 + 0,15.LOG (IAF)
FIT	RTM1	0,20	0,31	0,21	LOG. b>0	RTM1 = 1,79 + 0,11.LOG (FIT)
	RTM2	0,22	0,40*	0,19	LOG. b>0	RTM2 = 3,86 + 0,47.LOG (FIT)
	RTM3	-0,47	0,81**	-0,51	LOG. b<0	RTM3 = 2,81 - 1,42.LOG (FIT)
	RTM4	0,61	0,79**	0,58	LOG. b>0	RTM4 = 34,90 + 16,19.LOG (FIT)
	RTM5	0,53	0,68**	0,51	LOG. b>0	RTM5 = 16,32 + 4,03.LOG (FIT)
	RTM7	-0,14	0,38*	-0,11	LOG. b<0	RTM7 = 5,17 - 0,89.LOG (FIT)
	RRS	0,64	0,80**	0,58	LOG. b>0	RRS = 12,49 + 7,38.LOG (FIT)
	RND	0,50	0,89**	0,45	LOG. b>0	RND = 0,84 + 0,26.LOG (FIT)
	RTV	0,49	0,89**	0,47	LOG. b>0	RTV = 1,16 + 0,12.LOG (FIT)
COV	RTM1	0,29	0,30	0,32	EXP. b>0	LOG (RTM1) = 0,19 + 0,001.COV
	RTM2	0,37	0,41	0,38	LOG. b>0	RTM2 = 2,21 + 0,79.LOG (COV)
	RTM3	-0,76	-0,73	-0,78**	EXP. b<0	LOG (RTM3) = 0,75 - 0,003.COV
	RTM4	0,82	0,72	0,88**	EXP. b>0	LOG (RTM4) = 0,99 + 0,006.COV
	RTM5	0,70	0,62	0,72	EXP. b>0	LOG (RTM5) = 0,97 + 0,002.COV
	RTM7	-0,38	-0,38	-0,38	LOG. b<0	RTM7 = 8,84 - 1,85.LOG (COV)
	RRS	0,83	0,71	0,88**	EXP. b>0	LOG (RRS) = 0,23 + 0,009. (COV)
	RND	0,87	0,90	0,85	LOG. b>0	RND = 0,13 + 0,49.LOG (COV)
	RTV	0,87	0,91	0,87	LOG. b>0	RTV = 0,68 + 0,24.LOG (COV)

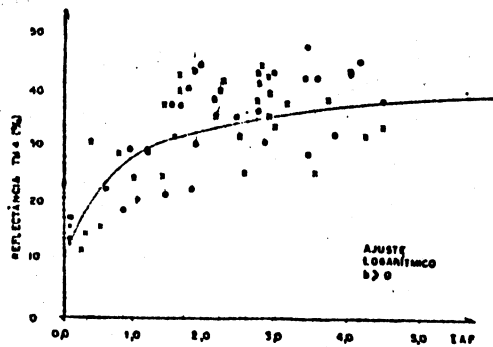
* significativo ao nível de 5%

** significativo ao nível de 1%

OBS.: A significância das correlações só foi verificada para o melhor dos três modelos, em cada caso.



(a)



(b)

FIGURA 2 - DIAGRAMAS DE DISPERSÃO E AJUSTES ENTRE AS VARIÁVEIS REFLECTÂNCIA TM3 x IAF (a) E REFLECTÂNCIA TM4 x IAF (b), PARA ÁREAS COM CULTURA DE FEIJÃO.

Com os progressivos aumentos do IAF, crescem também os "efeitos multiplicativos" da reflexão, até o ponto em que se atinge o máximo de reflexão dado pela "reflectância infinita" (ALLEN e RICHARDSON, 1968). Deste ponto para frente a curva IAF x TM4 passa a ser assintótica.

O ponto de início da assíntota para as reflectâncias TM3 (vermelho) é por volta de IAF = 1,5 (Figura 2.a); e para as reflectâncias TM4 (infravermelho próximo), parece estar para IAF acima de 5,0 (Figura 2.b). Isto está de acordo com CHANCE e LEMASTER (1977) os quais, utilizando o modelo de reflectância de SUITS (1972), calcularam que, para o algodão, a reflectância de dossel é insensível a mudanças de IAF, quando o IAF excede a 2,2 (para a região visível) e a 6,2 (para o infravermelho).

A dispersão dos pontos verificada nas vizinhanças da linha de ajuste entre TM4 x IAF (Figura 2.b) pode ser explicada principalmente pelo que foi denominado de "fenômeno de trajetória" por TUCKER et alii (1979) e por HOLBEN et alii (1980). Ou seja, à medida em que avança o ciclo biológico do feijão, o IAF tem seus valores aumentando progressivamente até um platô (que provavelmente demarca o início da senescência); depois, vai decrescendo e assumindo valores semelhantes aos IAFs anteriores ao referido platô; porém, dado que as condições fenológicas gerais da cultura são diferentes nos períodos pré e pós-platô, para mesmos valores de IAF (antes e após platô) as reflectâncias TM4 são diferentes.

Isto faz evidenciar também que há um período do ciclo (anterior ao início da senescência) em que as correlações e ajustes entre variáveis agronômicas e variáveis espectrais são melhores para a cultura de feijão.

Deve-se indicar ainda que todas as afirmações feitas até aqui para o IAF devem, muito provavelmente, ocorrer para as outras variáveis agronômicas também.

Na Figura 3, apresentam-se os comportamentos das variáveis agronômicas e espectrais de maior interesse, durante o ciclo do feijão.

Faz-se necessário ressaltar que as curvas da Figura 3.a foram obtidas com os dados de algumas das áreas de feijão plantadas mais tardiamente em relação às outras; já para as curvas das Figuras 3.b e 3.c foram utilizadas as médias das 42 áreas para os respectivos parâmetros.

Os dados utilizados para se obter as correlações da Tabela 1 foram os da passagem TM/Landsat-5 de 20 de junho de 1987, na qual as áreas de feijão apresentavam idades variando entre 12 e 73 dias após plantio (em média); sendo que o tempo de duração das lavouras de inverno de 1987, nas 42 áreas estudadas, esteve entre 95 e 107 dias.

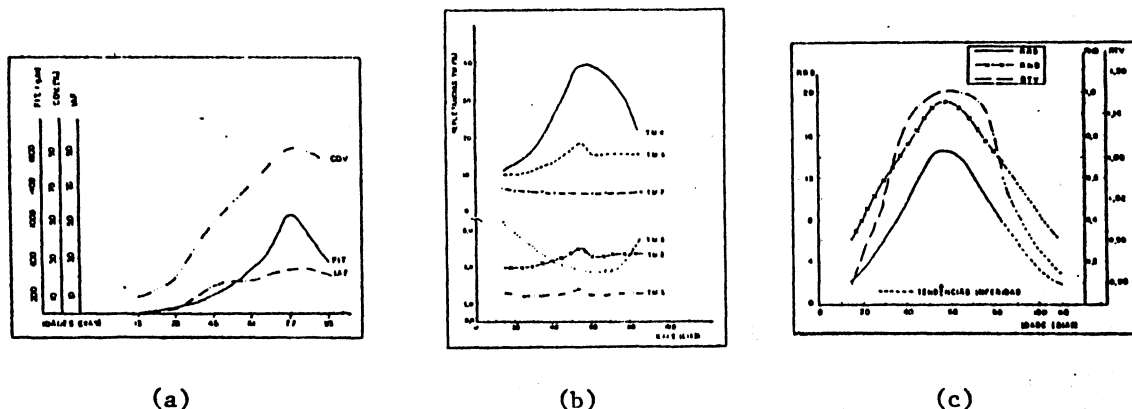


FIGURA 3 - COMPORTAMENTO DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS AO LONGO DO CICLO DO FEIJÃO: (a) IAF, FIT e COV; (b) reflectâncias TM3, TM4 e TM5; e (c) índices de vegetação RRS, RND e RTV.

Assim sendo, fica claro que as áreas de feijão (com idades entre 12 e 73 dias no dia da passagem TM/Landsat-5) estavam na fase em que as variáveis agrônômicas (Figura 3.a) estavam ainda em sua dinâmica de crescimento pré-senescência. Isto deve ter sido, também, um dos motivos para os altos valores de correlação encontradas na Tabela 1, para as principais variáveis de interesse. Realmente, nas Figuras 3.b e 3.c verificam-se os comportamentos das variáveis espectrais coerentes com esta fase de desenvolvimento vegetativo crescente anterior à pré-senescência da cultura, conforme já foi abordado no início destas discussões.

Pela Figura 3.c nota-se também a grande correspondência entre os comportamentos dos três índices de vegetação, havendo, portanto, equivalência funcional entre eles. Isto permite indicar que estes índices espectrais de vegetação não devem ser utilizados conjuntamente num mesmo trabalho. Provavelmente deve ser mais proveitoso se os índices lineares de vegetação (como os três I.V. utilizados nesta pesquisa) forem utilizados em conjunto com os índices ortogonais (como, p.ex., a "greenness" de KAUTH e THOMAS, 1976 ou o "PVI" de RICHARDSON e WIEGAND, 1977), uma vez que as fundamentações físicas e fisiológicas para cada tipo de índice são distintas.

5 - CONCLUSÕES

É bem conhecido que há uma grande necessidade para um entendimento melhor das complexas interações entre variáveis biofísicas e variáveis espectrais de culturas agrícolas.

Com os materiais e os métodos usados na presente pesquisa, foi possível chegar a algumas considerações conforme segue.

Existe um relacionamento curvilíneo (logarítmico ou exponencial) entre as variáveis espectrais reflectâncias TM3 e TM4 (e índices lineares de vegetação delas derivados) com as variáveis agrônômicas IAF, FIT e COV, sendo os coeficientes de correlação altos e significativos.

Os fundamentos físicos e fisiológicos para os comportamentos encontrados (relações variáveis espectrais versus variáveis agrônômicas) estão inteiramente coerentes com a teoria sobre a interação da radiação eletromagnética com a vegetação.

A fase de desenvolvimento vegetativo (anterior ao início da senescência) deve ser a melhor para as correlações e ajustes entre variáveis agrônômicas e variáveis espectrais.

Há grande equivalência funcional entre os três índices de vegetação utilizados: RRS, RND e RTV; principalmente entre RND e RTV.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, W.A.; RICHARDSON, A.J. Interaction of light with a plant canopy. J. Opt. Soc. Am., 58: 1023-1028. 1968
- BAUER, M.E.; VANDERBILT, V.C.; ROBINSON, B.F.; DAUGHTRY, S.T. Spectral properties of agricultural crops and soils measured from space, aerial, field and laboratory sensors. IN: PROCEEDINGS OF THE XIV CONGRESS OF INT. SOC. PHOTOGRAM.; Hamburg, West Germany, July 13-25, 1980. p. 56-73.
- CHANCE, J.E.; LEMASTER, E.W. Suits reflectance models for wheat and cotton: theoretical and experimental tests. Applied Optics, 16 (2): 407-412. 1977.
- GARDNER, B.R. Techniques for remotely monitoring canopy development and estimating grain yield of moisture stressed corn. Ph.D. Dissertation. Univ. of Nebraska, Lincoln. 1983. 187p.
- HOFFER, R.M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. IN: SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. (Ed.) Remote Sensing: the Quantitative Approach. McGraw-Hill, Inc.; New York. 1978. p. 228-289.
- HOLBEN, B.N.; TUCKER, C.J.; FAN, C.J. Spectral assessment of soybean leaf area index and leaf biomass. Photogr. Eng. Rem. Sens., 46 (5): 651-656. 1980.
- JORDAN, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. Ecology, 50: 663-666. 1969.
- KAUTH, R.J.; THOMAS, G.S. The tassiled cap - a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT. IN: PROC. SYMP. ON MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA. Purdue Univ., West Lafayette. IN 1976. p. 41-51.
- RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C.L. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogramm. Eng. Remote Sensing, 43: 1541-1552. 1977.
- ROUSE Jr., J.W.; HAAS, R.H.; SHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. IN: PROCEEDINGS OF THE 3rd SYMPOSIUM ON SIGNIFICANT RESULTS OBTAINED WITH ERTS-1. NASA. SP-351, p. 309-317. 1973.
- SUITS, G.H. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. Remote Sens. Environ., 2: 117-125. 1972.
- TUCKER, C.J.; ELGIN Jr., J.H.; McMURTREY III, J.E. Temporal-Spectral measurements of corn and soybean crops. Photogram. Eng. Rem. Sens. 45(5): 643-653. 1979.
- ZAR, J.H. Biostatistical Analysis. Prentice, Englewood Cliffs, NJ, 1974, 620p.