

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE UMA ÁREA COMERCIAL DE CANA-DE-AÇÚCAR EM DUAS SAFRAS POR MEIO DE RADIOMETRIA DE CAMPO*

MAURÍCIO DOS SANTOS SIMÕES¹
JANSLE VIEIRA ROCHA¹
RUBENS A. CARMAGO LAPARELLI²

¹FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP
Caixa Postal 515 - 12201-970 - Campinas - SP, Brasil
jansle@agr.unicamp.br

²CEPAGRI – Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura /UNICAMP
Caixa Postal - 12201-970 - Campinas - SP, Brasil
rubens@cpa.unicamp.br

Abstract. This paper describes a multitemporal research of sugar cane spectral behavior using field spectroscopy and its relationship with agronomic parameters. During two seasons a commercial sugar cane field at São João Sugar Mill in Araras/SP was monitored. Radiometric data and agronomic characterization were gathered in 8 field campaigns. Field spectral vegetation index showed the same pattern in both seasons and similar to the agronomic parameters. NDVI and reflectancy in the filter 1/band 4 increased their values as far as the end of vegetative phase, around 220 days after harvest. After that phase the NDVI values and the reflectancy started to stabilize and decrease because of the ripening phase and the senescence of the crop. The data of the first season presented lower coefficient of variation showing an increase of the spatial variability of the sugar cane production, caused by higher number of limitation production factors in the second season. The results showed that field spectroscopy is an important data to study and monitor crops.

Keywords: sugar cane, field spectroscopy, NDVI.

1. Introdução, justificativa e objetivos

O sensoriamento remoto proporciona uma visão sinóptica de áreas agrícolas, além de possibilitar um monitoramento temporal dos estágios de desenvolvimento da cultura em grandes áreas. Embora com grande potencial de utilização na cana-de-açúcar, apenas alguns trabalhos foram desenvolvidos estudando-a (Rudorff, 1985, Rudorff e Batista, 1990, Joaquim, 1998, Pellegrino, 2000) permanecendo uma carência em estudos do comportamento espectral usando radiometria de campo. Dentro deste enfoque se encontra este trabalho, buscando avaliar e desenvolver novas técnicas de sensoriamento remoto no estudo da variação temporal do comportamento espectral da cana-de-açúcar.

Conhecendo-se a curva espectral média da vegetação fotossinteticamente ativa é possível verificar três regiões distintas, que compreendem o visível (até 740 nm), onde se observa uma reflectância baixa em virtude da absorção da radiação incidente pelos pigmentos da planta, como as clorofilas a e b e carotenóides, uma segunda região que compreende a faixa do infravermelho próximo, dominado pela estrutura celular das folhas provocando alta reflectância. E por fim, a faixa que compreende o infravermelho médio dominado pelo teor de água contido nas folhas, o qual provoca bandas de absorção em 1400 e 1950 nm e diminuição na reflectância na curva espectral da cultura.

Justamente em virtude da diferença nos valores de reflectância nas faixas do visível (400 a 740 nm) e do infravermelho (740 a 1400 nm) e das diferenças nas informações contidas nestas faixas do espectro, é que os índices de vegetação (IVs) foram concebidos e, baseados fundamentalmente nestas diferenças, é que, usando-se razões entre as bandas, pode-se inferir

as condições de vigor e produtividade da vegetação (Wiegand et al., 1991, Jackson e Huete, 1991).¹

A influência da resposta espectral do solo no comportamento geral de uma área agrícola é função de parâmetros agronômicos e biofísicos da cultura, tais como porcentagem de cobertura do solo, estágio fenológico, estrutura e arquitetura da cultura, espaçamento de plantio e condições fitossanitárias, portanto altamente relacionados com aspectos temporais do desenvolvimento da cultura (Huete et al., 1985). Conhecendo, portanto, os efeitos da resposta espectral dos solos no comportamento espectral da vegetação, diversos autores vêm se preocupando em separar seus efeitos, a fim melhor caracterizar melhor a vegetação e permitir que dados espectrais, como índices de vegetação, possam ser utilizados no monitoramento temporal das culturas (Huete, 1988; Qi et al., 1994).

No caso do Índice por Diferença Normalizada (NDVI – Normalised Difference Vegetation Index), vários estudos mostraram a sua alta correlação com parâmetros associados ao desenvolvimento e produtividade das plantas, tais como densidade de vegetação e cobertura (Ormsby et al., 1987), biomassa foliar verde (Tucker, 1979), índice de área foliar (Wiegand et al., 1979), e estado das culturas (Wiegand et al., 1992).

Jackson et al. (1983) estudaram o comportamento de vários IVs derivados da informação do sensor Landsat MSS tentando avaliar, entre outras coisas, a sua capacidade de discriminar o solo nu e o solo coberto com baixa porcentagem de vegetação. Observaram que o RVI apresentou-se pouco sensível à presença de vegetação quando a cobertura foi menor que 50% e o NDVI apresentou-se mais sensível às pequenas porcentagens de recobrimento por vegetação do que o RVI, mostrando que provavelmente nas fases iniciais de desenvolvimento das culturas o NDVI seja mais adequado para o seu monitoramento (Jackson e Huete, 1991).

Uma análise crítica e comparativa de alguns índices de vegetação sugere que o RVI, por exemplo, é menos sensível a variações na quantidade de vegetação nas fases iniciais de desenvolvimento das culturas que o NDVI e sendo o contrário também verdadeiro, sendo o primeiro mais indicado para estudos nas fases desenvolvimento vegetativo e maturação das culturas (Jackson e Huete, 1991). Da mesma forma o SAVI, pela sua própria formulação, é mais indicado para mapeamento da biomassa nas fases intermediárias de desenvolvimento das culturas, devido a eliminação da interferência da reflectância do solo na resposta espectral da cultura (Huete, 1988). Qi et al. (1994) apontam que o MSAVI possuem intervalo de resposta a quantidade de vegetação maior que os demais índices e que seu comportamento é similar ao NDVI em condições de grande cobertura vegetal do solo e tem comportamento similar ao WdVI em situações de baixas cobertura. Justamente por isso estes índices foram escolhidos para a avaliação da capacidade de mapeamento da variabilidade por sensoriamento remoto, pois cada um deles pode contribuir diferentemente no mapeamento da variabilidade, em fases específicas do desenvolvimento da cultura.

Material e métodos

O experimento foi conduzido em uma área comercial da Usina São João Açúcar e Alcool, localizada no município de Araras, SP, apresentada na Figura 1B, plantada com a variedade SP80-1842, uma variedade precoce com hábito decumbente e acamamento regular. O perfilhamento é médio, com colmos de crescimento vigoroso, folhas são de largura média, comprimento longo e pontas dobradas.

Durante as safras 2000-2001 e 2001-2002, o ciclo vegetativo da cana-de-açúcar foi monitorado nas três fases do crescimento da cultura em 8 campanhas de campo. As três fases

* Este trabalho foi apoiado pela FAPESP, processo nº 99/07071-1.

nas quais foram obtidos os dados de sensoriamento remoto e parâmetros agrônômicos da cultura correspondem às fases básicas de desenvolvimento da cultura em estudos de análise de crescimento, de acordo com Magalhães (1979). A Figura 1A mostra as fases de crescimento das principais culturas cultivadas. Em decorrência das diferenças entre estas três fases e dos efeitos na expressão da resposta espectral da cultura da cana-de-açúcar, o experimento coletou dados em cada uma destas três fases, ao longo das duas safras.

- **1ª Coleta de dados** – 30 de outubro de 2000 e 02 de novembro de 2001 - fase vegetativa da cultura (cana-de-açúcar com altura máxima de 70 cm).
- **2ª Coleta de dados** – 03 de fevereiro e 08 de abril de 2001, 10 de março e 11 de abril de 2002 – fase de máximo desenvolvimento vegetativo (cana-de-açúcar com 1,50 a 2,00 m).
- **3ª Coleta de dados** – 18 de julho de 2001 e 31 de agosto de 2002 - pouco antes do corte da cultura, estando a cana-de-açúcar na fase de maturação.

Como a área de estudo é extensa (27 ha) houve a necessidade de estabelecimento de uma grade amostral a fim de diminuir o volume de dados, sem perda de representabilidade estatística. Os pontos amostrais para coleta dos dados radiométricos foram obtidos em uma amostragem estratificada de uma grade regular de 50 metros e bordadura de 25 metros, que levou em conta o tipo de solo, existência ou não de cobertura com palha e o número de medidas radiométricas possível de ser realizada no intervalo de 9:00 hs até a 13:00 hs. A Figura 1B ilustra a localização dos pontos amostrais e o tipo de amostragem.

Para a obtenção dos dados radiométricos foram utilizados dois radiômetros CIMEL CE 313a. A descrição das bandas deste radiômetro e suas características estão descritas na Tabela 1 mostrando também a coincidência com as bandas do Landsat 7 ETM+, permitindo que os dados coletados ao nível terrestre possam ser extrapolados e comparados com os dados ao nível orbital (Milton, 1987; Nanni, 2000). O radiômetro Cimel é um radiômetro direcional com FOV de 10°, que mede a radiância espectral com sensores em silício (Si) e germânio (Ge) para suas cinco bandas espectrais. Em cada uma deles, filtros espectrais determinam as larguras e posicionamento das bandas.

Optou-se pelo emprego de dois radiômetros a fim de melhorar o rendimento na coleta de dados com maior número de dados coletados menor período de tempo. Por outro lado, criou a necessidade de intercalibração entre os equipamentos e boa sintonia na coleta de dados pelos dois grupos de coleta de dados.

Para o cálculo do Fator de Reflectância (FR) foi utilizada a irradiância solar, obtida por meio do espectrorradiômetro LI 1800. Este espectrorradiômetro possui um receptor coseno de radiação, permitindo o monitoramento da irradiância solar em um plano hemisférico (180° graus) em intervalos de tempo constantes (uma medida a cada cinco minutos, por exemplo) de maneira que se elimine a necessidade da utilização da placa de sulfato de bário (BaSO₄) dentro da área plantada com a cultura. O espectrorradiômetro foi deixado fora da área plantada, no carreador central entre dois talhões, para evitar qualquer interferência da própria cultura e de outros alvos nos valores de irradiância solar, já que o coletor coseno coleta dados em todo o hemisfério, medindo constantemente a irradiância solar. Foram feitas cinco medidas radiométricas em cada ponto de amostragem, de acordo com a metodologia proposta por Huete et al. (1985), de forma que o radiômetro fizesse medidas sobre a linha da cultura e sobre a entrelinha, detectando as diferentes condições de cobertura do solo e quantidade de matéria vegetal. A média destas cinco medidas foi considerada a radiância espectral do ponto. Juntamente com as medidas de radiância da cultura, foi estimada a irradiância solar medida com o espectrorradiômetro Li-Cor LI 1800 usando-se o coletor coseno que coletou dados à intervalos constantes. De posse destes dados foi obtido o fator de reflectância (FR).

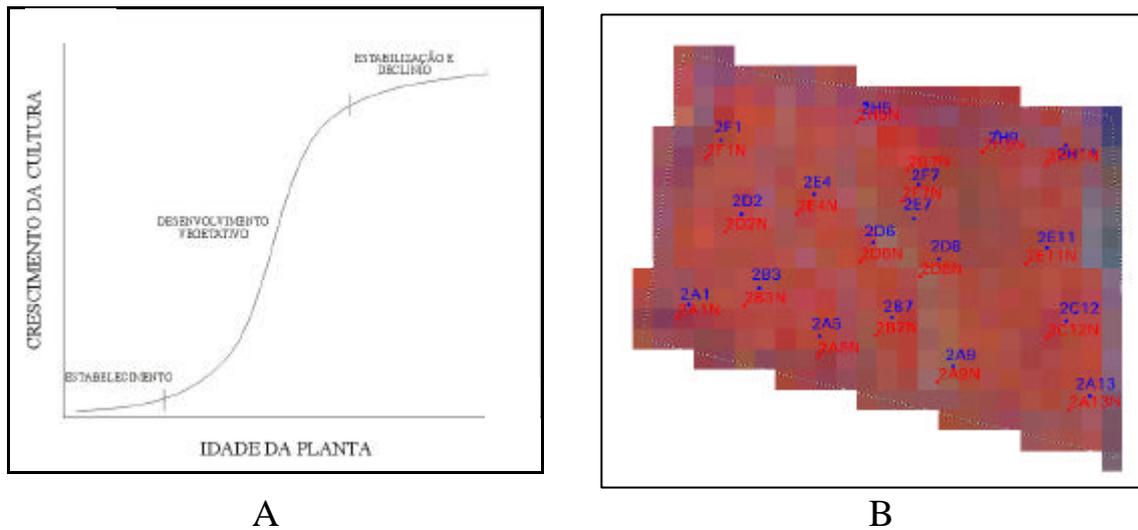


Figura 1. A. Curva ilustrativa do crescimento sigmoidal de uma planta. B. Imagem Landsat 7 da área de estudo com a distribuição dos pontos amostrais de radiometria e parâmetros agrônômicos coletados nas safras 2000 e 2001.

Tabela 1. Características do radiômetro Cimel CE 313a.

Filtro	Centro (nm)	Largura (nm)	Início (nm)	Fim (nm)	Detector	Espectro	Landsat
F1	837	91	791.5	882.5	Si	NIR	B4
F2	648	53	621.5	674.5	Si	R	B3
F3	548	85	505.5	590.5	Si	G	B2
F4	450	40	430	470	Si	B	B1
F5	1640	165	1557.5	1722.5	Ge		B5
F6	837	91	791.5	882.5	Ge	NIR	B4

Fonte: Cimel (1998).

O fator de reflectância dos pontos foi calculado utilizando-se a equação proveniente de Duggin e Cunia (1983):

$$FR = \frac{I_r}{I_o} \times C_r \times RS_r$$

onde: FR é o fator de reflectância, I_r é a medida da radiância do alvo, I_o é a medida da irradiância solar; C_r é a constante de calibração entre os radiômetros, expressa pela razão entre a irradiância medida e a medida da radiância da placa padrão: I_o/I_y (padrão), RS_r é o fator de reflectância da placa padrão medido em laboratório.

Simultaneamente às campanhas de campo para coleta de dados de radiometria foram coletados dados referentes a parâmetros agrônômicos e biofísicos da cultura, seguindo o mesmo esquema de amostragem definido anteriormente para radiometria. Estimativas da produção e da produtividade podem ser feitas através da medida de componentes da cultura (Taylor et al., 1998b). No caso específico da cana-de-açúcar, o número de perfilhos e o peso de colmos representam os principais componentes da cultura possíveis de serem medidos e com boa correlação com a produtividade (Gheller et al., 1999). Além destes, o IAF é um parâmetro biofísico que pode contribuir nas estimativas de produtividade das culturas. As contagens de número de perfilhos foram efetuadas em todas as campanhas de campo, representando na fase inicial o potencial de produção de colmos, já que não existiam ainda colmos e nas outras fases o número de perfilhos representa a produção de cana. A coleta de dados de IAF foi feita através de medidas diretas de IAF usando o equipamento LAI-2000.

Para cada ponto amostral foram realizadas três repetições, calculando-se o valor médio do IAF por ponto. Os dados de fitomassa da cultura, nos 18 pontos amostrais, foram obtidos colhendo-se dois metros lineares de cana-de-açúcar em três linhas adjacentes de cana em cada fase do desenvolvimento da cultura. A fitomassa foi dividida em fitomassa aérea (folhas), fitomassa de colmo e fitomassa de palha. A coleta de dados em julho de 2001 e agosto de 2002, que se referiam a colheita das parcelas amostrais foram feitas em parcelas de 10 linhas por 15 metros na forma de aceiros. Após a colheita mecanizada de todo o talhão não foram colhidos os aceiros, permanecendo a cana em pé para permitir a coleta dos dados. Os aceiros foram colhidos manualmente, de maneira a permitir a separação de folhas, colmo e palha. Estes dados, trabalhados individualmente, foram correlacionados e estudados sob a ótica da resposta espectral da cultura.

Resultados

Uma análise preliminar dos dados médios obtidos nas campanhas de campo das duas safras, apresentados na Tabela 1., mostra um comportamento correlacionado dos dados espectrais e os parâmetros agronômicos medidos em campo. Isto é verificado pelo aumento da reflectância e do NDVI da cultura na fase de estabelecimento e desenvolvimento vegetativo, até que o IAF atingisse o seu máximo e tendesse a diminuir de valor com o avanço para a senescência da cultura, o que ocorreu nas duas safras em torno dos 220 dias após o corte. A diminuição dos valores espectrais, do IAF e dos dados de biomassa (massa verde de colmos-MVC, e toneladas de cana por hectare-TCH) no final do ciclo da cultura é explicado pelo processo de maturação da cana-de-açúcar que passa a translocar fotossintetizados (açúcares) nos colmos e diminui a massa verde de folhas e aumenta a quantidade de palha (Pellegrino, 2000).

Por outro lado, pode-se observar que as duas safras tiveram valores de reflectância na banda 4 (B4) e o NDVI similares mas com valores de coeficiente de variação (CV%) maiores para a segunda safra, o que também é compreensível pelo aumento da variabilidade espacial da cultura, causada pela introdução de fatores limitantes da produção como compactação dos solos, causadas pelo intenso tráfego de máquinas, ataque de pragas, infestação de plantas daninhas e variabilidade de distribuição da palha sobre o solo.

O fato do comportamento temporal dos dados espectrais estarem em conformidade com os dados agronômicos confirmam o potencial de dados de sensoriamento remoto terrestre para o monitoramento das condições das culturas agrícolas (Wiegand et al., 1991). Do mesmo modo, o aumento do coeficiente de variação dos dados espectrais no o aumento no número de cortes da cultura também mostra que os dados de sensoriamento remoto podem auxiliar as pesquisas de variabilidade espacial da produção de culturas agrícolas (Taylor et al., 1998).

Embora os dados espectrais tenham acompanhado o comportamento dos parâmetros agronômicos, a curva do NDVI e da banda 4 não apresentou a forma sigmoidal citada por Magalhães (1979) e Pellegrino (2000), provavelmente pelo pouco número de coleta durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, como pode ser verificado na Figura 2. Contudo é preciso salientar as dificuldades em se fazer medidas radiométricas em culturas de grande porte e elevada biomassa vegetal, gerando a necessidade de utilização de mastro para elevação do sensor à uma altura suficiente para a execução de medidas sobre o dossel da cultura e que compreendam uma área significativa do dossel em função do FOV do radiômetro.

Tabela 2. Dados agrônômicos e espectrais das 18 amostras nas duas safras.

Médias/DAC	Safrá 2000/2001				Safrá 2001/2002					
	109	234	298	399	84	117	150	290	368	
NP	24,96	16,80	14,45	10,79	21,79		23,57	14,80	10,23	
IAF	0,92	3,34	3,38	1,47	1,01		2,06	1,87	1,56	
MVC		8,80	19,95	27,83	3,93	7,54	10,14		26,59	
TCH	33,55	58,63	67,40	89,57	26,21	50,25	67,56		61,41	
B4	0,372	0,612	0,333	0,367		0,235	0,453	0,601	0,345	
NDVI	0,584	0,810	0,766	0,697		0,485	0,793	0,798	0,706	
CV% NP	10,59	9,51	11,14	11,22	12,74	7,89		11,93	18,70	
CV% IAF	54,21	3,34	3,38	1,47	44,78		36,44	39,46	38,42	
CV% MVC		16,63	12,08	8,56	34,73	23,33	18,17		9,22	
CV% TCH		6,44	4,23	4,39	13,45	9,04	7,04		4,88	
CV% B4	62,842	80,235	81,612	77,680		133,756	75,027	60,806	79,813	
CV% NDVI	45,738	21,137	24,570	46,630		78,324	26,867	29,988	33,043	
Média	43,34	22,88	22,84	24,99	26,43	50,47	32,71	35,55	30,68	
	Média geral CV% na safrá				28,51	Média geral CV% na safrá				35,17

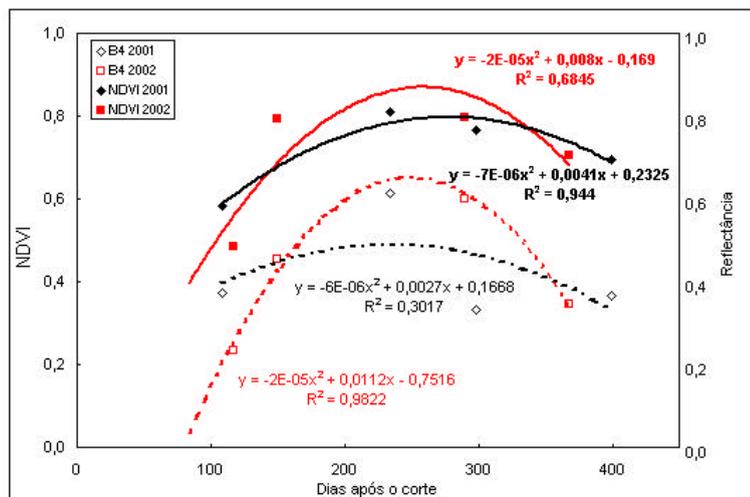


Figura 2. Curva de reflectância do filtro 1/banda 4 e do NDVI em relação aos dias após o corte nas safras 2001/2002, 2002/2003.

Conclusões

O trabalho permitiu concluir que medidas radiométricas ao nível terrestre podem ser um bom indicador para o acompanhamento da cana-de-açúcar, mostrando um comportamento correlacionado com parâmetros agrônômicos da cultura como índice de área foliar, massa verde de colmos e produtividade de cana-de-açúcar.

O NDVI e a reflectância na banda 4 tiveram primeiramente uma fase de aumento significativo em seus valores, correspondendo à fase de crescimento vegetativo da cultura, posteriormente seus valores começam a se estabilizar devido à entrada da cultura na fase de maturação, e por fim há uma queda da reflectância em virtude do aumento da quantidade de palha na cultura e senescência.

A dificuldade na aquisição de dados da cultura em áreas comerciais, determinou o pequeno número de medidas radiométricas ao longo seu ciclo, distorcendo a forma da curva

de reflectância e de NDVI em relação à curva de desenvolvimento da cultura, sugerindo a necessidade de outros trabalhos mais detalhados sobre o tema e também a correlação dos dados ao nível terrestre com imagens ao nível orbital.

Referências

- Cimel Electronique. User Manual - Radiancemeter CE 313a. Cimel, Paris, 1998. 15 p.
- Duggin, M.J., Cunia, T. Ground reflectance measurement techniques: a comparison. *Applied optics*, v. 22, n. 23, p. 3771-3777, 1983.
- Gheller, A. C. A.; Menezes, L. L.; Matsuoka, S.; Masuda, Y.; Hoffmann, H. P.; Arizono, H.; Garcia, A. A. F.. Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar. Araras: UFSCAR/CCA/DBV, 1999. 7p. (www.dbv.cca.ufscar.br/pmgca)
- Hoffer, R.M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. *Remote sensing: the quantitative approach*. New York: McGraw-Hill, 1978. Cap. 5, p. 227-289.
- Huete, A.R., Jackson, R.D., Post, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil background. *Remote Sensing of Environment*, v. 17, p. 37-53, 1985.
- Huete, A.R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v. 25, p. 295-309, 1988.
- Jackson, R.D. Spectral indices in n-space. *Remote Sensing of Environment* 13: 409-421 p. 1983.
- Jackson, R.D., Huete, A. R. Interpreting vegetation indices. *Journal of Preventive Veterinary Medicine*, 11:185-200 p. 1991.
- Jackson, R.D.; Slater, P.N.; Pinter JR., P.J. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmosphere. *Remote Sensing of Environment*, v. 13, n. 3, p. 187-208, 1983.
- Joaquim, A.C. Identificação de variedades de cana-de-açúcar em três classes texturais de solos, na região de Araraquara - SP, através de análise de nível de cinza em imagens Landsat/TM. Unicamp (Dissertação de mestrado - Feagri). 96 p. 1998.
- Magalhães, A.C.N. Análise quantitativa do crescimento. In: *Fisiologia vegetal*. FERRI, M.G. São Paulo, EDUSP - Ed. da Universidade de São Paulo, 350 p. 1979.
- Milton, E.J. Principles of field spectroscopy. Review Article. *Internacional Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 12, p. 1807-1827. 1987.
- Nanni, M.R. Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos. Piracicaba, 2000. 366 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2000.
- Ormsby, J.P.; Choudhury, B.J.; Owe, M. Vegetation spatial variability and its effects on vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 9, p. 1301-1306, 1987.
- Pellegrino, G.Q. Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar. Campinas/SP: UNICAMP, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP.
- Qi, J.; Chehbouni, A., Huete A.R.; Kerr, Y.H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing Environmental*, 48:119-126, 1994.
- Rudorff, B.F.T. Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. São José dos Campos/SP: INPE, 1985, 114 p. (Dissertação de Mestrado - Sensoriamento Remoto).
- Rudorff, B.F.T.; Batista, G.T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. *Remote Sensing Environment*, 33:183-192, 1990.
- Rudorff, B.F.T.; Batista, G.T. Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 12, n. 12, p. 2477-2484, 1991.
- Taylor, J.C.; Thomas, G.; Wood, G.A. Mapping Yield Potential with Remote Sensing. *Proceedings of the First European Conference on Precision Agriculture*, J.V. Stafford, (Ed.), London, SCI. 1998.

Tucker, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979.

Wiegand, C.L.; Everitt, J.H.; Richardson, A.J. Comparison of multispectral video and SPOT-HRV observations for cotton affected by soil salinity. *International Journal of Remote Sensing*, v. 13, n. 8, p. 1511-1525, 1992.

Wiegand, C.L., Richardson, A.J., Escobar, D.E., Gerbermann, A.H. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment*, v. 35, p. 105-119, 1991.