



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA (FEAGRI)**

**RELAÇÃO ENTRE INDICADORES DE CRESCIMENTO E DE  
PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR E DADOS  
ESPECTRAIS TERRESTRES E ORBITAIS**

**MAURICIO DOS SANTOS SIMÕES**

**CAMPINAS – SÃO PAULO - BRASIL  
NOVEMBRO DE 2004**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA (FEAGRI)

RELAÇÃO ENTRE INDICADORES DE CRESCIMENTO E DE  
PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR E DADOS  
ESPECTRAIS TERRESTRES E ORBITAIS

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável.

MAURICIO DOS SANTOS SIMÕES

Orientador: Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha  
Co-Orientador: Dr. Rubens A. C. Lamparelli

CAMPINAS – SÃO PAULO - BRASIL  
NOVEMBRO DE 2004

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si51r Simões, Mauricio dos Santos  
Relação entre indicadores de crescimento e de  
produção da cana-de-açúcar e dados espectrais terrestres  
e orbitais / Maurício dos Santos Simões .--Campinas,  
SP: [s.n.], 2004.

Orientadores: Jansle Vieira Rocha e Rubens Augusto  
Camargo Lamparelli.  
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Cana-de-açúcar. 2. Sensoriamento remoto. 3.  
Imagens multiespectrais. I. Rocha, Jansle Vieira. II.  
Lamparelli, Rubens Augusto Camargo. III. Universidade  
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia  
Agrícola. IV. Título.

Titulo em Inglês: Relations between growth analysis, yield and remote  
sensing of sugarcane.

Palavras-chave em Inglês: Sugarcane, Remote sensing, Multispectral  
images.

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural  
Sustentável

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola.

Banca examinadora: José Carlos Neves Epiphanyo, Flávio Jorge  
Ponzoni, Jurandir Zullo Júnior, Carlos Alberto  
Vettorazzi.

Data da defesa: 23/11/2004.

A ciência sem religião é aleijada, a religião sem ciência é cega.

Albert Einstein (1879-1955), De meus anos tardios.

Não temais a ciência natural – ela nos aproxima de Deus.

Albert Schweitzer (1875-1965), A religião e a civilização moderna.

Pela fé, entendemos que foi o universo formado pela palavra de Deus.

Hebreus 11:1.

# **Para Zou, Mi e Godo**

Obrigado Senhor!

Zouzou, obrigado querida. Você é mais da metade deste trabalho ...

Jansle e Rubens, obrigado por terem me suportado (nos dois sentidos: dar suporte e agüentar) por todos estes anos ...

Pai e mãe, obrigado por terem ensinado as coisas mais importantes da vida: amor, fé e esperança;

Obrigado Clau, Sil e Dê;

Meus amigos, Adhair, Antônio Celso, Arnaldo, Caio, Célio, Clau, Donzelli, Edison, Felipe, Hermogenes, Ivo, Pedro, Sergio, Solange e Zé Guilherme, muito obrigado e tenho sofrido.

Obrigado também à FAPESP, à Usina São João, à CAPES, à Feagri/Unicamp, ao CEPAGRI e ao Centro de Tecnologia Copersucar.

Aos amigos do Laboratório de Geoprocessamento, muito obrigado.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1. Cana de açúcar .....	4
3.2. Sensoriamento remoto .....	7
3.2.1. Radiometria de campo .....	7
3.2.2. Sensoriamento remoto orbital .....	10
3.2.3. Índices de Vegetação .....	11
3.2.4. Correção atmosférica.....	16
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
4.1. Área de estudo.....	18
4.2. Coleta de dados .....	20
4.2.1. Dados de sensoriamento remoto.....	23
4.2.1.1. Radiometria de campo .....	23
4.2.1.2. Imagens orbitais.....	27
4.2.2. Variáveis agronômicas .....	30
4.3. Análise estatística.....	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1. Relação entre indicadores de crescimento e produtividade da cana-de-açúcar ..	37
5.1.1. Introdução .....	37
5.1.2. Material e métodos .....	38
5.1.3. Resultados e discussão.....	41
5.1.4 Conclusões .....	49
5.2. Relação entre variáveis espectrais e indicadores de desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar.....	50
5.2.1. Introdução .....	50

5.2.2. Material e métodos .....	51
5.2.3. Resultados e discussão.....	56
5.2.4. Conclusões .....	64
5.3. Relação entre variáveis espectrais orbitais e indicadores de desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar.....	65
5.3.1. Introdução .....	65
5.3.2. Material e métodos .....	65
5.3.3. Resultados e discussão.....	70
5.3.4 Conclusões .....	79
6. CONCLUSÕES GERAIS .....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
ANEXOS.....	98



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo evolutivo da cana de 12 e 18 meses, na região Centro-Sul do Brasil.....	4
Figura 2 Mapa de solos da fazenda Santo Antônio da Usina São João em Araras/SP. Levantamento no nível de semi-detalhe e escala 1:20.000.....	19
Figura 3 Curva ilustrativa do crescimento sigmoidal de uma cultura agrícola.....	22
Figura 4 Intercalibração dos radiômetros usando as medidas simultâneas da irradiância na placa padrão e a irradiância incidente.....	25
Figura 5 Coleta de dados radiométricos com o radiômetros CIMEL.....	26
Figura 6. Mapa da grade amostral de radiometria. Os pontos pintados em laranja representam as células onde foram coletados os dados radiométricos.....	27
Figura 7. Obtenção da radiação direta com o radiômetro solar CIMEL-317, durante o período da passagem do satélite.....	30
Figura 8. Contagem do número de perfilhos em 2 m lineares de cana-de-açúcar.....	32
Figura 9. Coleta de dados de IAF utilizando o equipamento LAI 2000. (A) medição da radiação difusa incidente; (B) medição da radiação difusa transmitida pelo dossel.....	33
Figura 10. Realização dos aceiros pela colhedora para delimitação das parcelas de 10 linhas de cana por 15 metros (a) e a visão geral da área de estudo com os 18 aceiros (b). .....	34
Figura 11. Colheita manual da cana-de-açúcar com separação entre colmos, folhas e palhas (a) e pesagem dos feixes de cana com célula de carga (b). .....	34
Figura 12 - Mapa de solos e distribuição dos pontos amostrais.....	39
Figura 13 - Evolução temporal da biomassa total (BMT), produtividade (TCH), número de plantas por metro (NPM) e o índice de área foliar (IAF) (dados médios de 18 amostras) da variedade SP80-1842 nas safras 2000/2001 e 2001/2002.....	43
Figura 14 - Modelo Exponencial Cúbico ajustado para o NPM, Modelo Exponencial Quadrático ajustado para o IAF e Modelos Gompertz ajustados para BMT e TCH, obtidos para as safras 2000/2001 e 2001/2002. Relação entre valores observados em campo e valores estimados com os modelos empíricos.* significância a 1% (Teste F). .....	46

Figura 15 - Localização da área de estudo em imagem Landsat 7, órbita-ponto 220/75 de 05 de abril de 2000, com a distribuição dos pontos amostrais de radiometria e variáveis agronômicas na safra 2000 e 2001.....	52
Figura 16 - Evolução temporal da banda 3 (B3), banda 4 (B4), SR, RVI, NDVI e SAVI (dados médios de 18 amostras) da variedade SP80-1842 nas safras 2000/2001 e 2001/2002.....	59
Figura 17 - Modelos Cúbicos ajustados para B3 e RVI, Modelos Exponencial Cúbico ajustado para o B4, SR, NDVI e SAVI. ....	60
Figura 18 - Imagem Landsat 7 com a localização dos pixels amostrados para a obtenção da reflectância e as duas metodologias de coleta dos dados espectrais. (Pontos amostrais com janelas de 4 pixels-PtA e amostragem com dados médios do talhão-DMt.....	67
Figura 19 - Evolução temporal das variáveis espectrais orbitais ao longo de duas safras. ....	73
Figura 20 - Modelos Cúbicos ajustados para a B3, B4 e NDVI, Modelo Exponencial Cúbicos ajustados para o SR e SAVI, Modelo Quadrático ajustado para RVI, obtidos para as safras 2000/2001 e 2001/2002.* significância a 1% (Teste F). ....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados cadastrais dos talhões estudados.....	20
Tabela 2: Datas de coleta e dados coletados .....	21
Tabela 3. Características do radiômetro Cimel CE 313a. ....	23
Tabela 4. Características das plataformas Landsat 5 e Landsat 7. ....	28
Tabela 5 - Histórico e descrição do talhão de estudo.....	38
Tabela 6 - Caracterização da variedade SP80-1842, 4 <sup>o</sup> e 5 <sup>o</sup> cortes, na região de Araras/SP nas safras 2000/2001 e 2001/2002.....	42
Tabela 7 - Modelos de regressão múltipla obtidos com dados das duas safras estudadas. .....	47
Tabela 8 - Características do radiômetro Cimel CE 313a.....	53
Tabela 9 - Variáveis espectrais e variáveis agronômicas médias e coeficiente de correlação em relação aos dias após o corte (DAC). ....	57
Tabela 10 - Coeficientes de correlação entre as variáveis agronômicas e espectrais.....	62
Tabela 11 - Modelos de regressão linear múltipla para estimativa da TCH e da BMT para as safras 2000/2001 e 2001/2002. ....	63
Tabela 12. Dados agronômicos e dados espectrais da variedade SP80-1842 durante as safras 2000 e 2001.....	71
Tabela 13. Índices de vegetação espectrais da variedade SP80-1842 durante as safras 2000 e 2001.....	71
Tabela 14 - Índices de correlação entre os dados de reflectância dos pontos amostrais (PtA) de nove imagens Landsat, os dias após o corte e os dados agronômicos usando-se os dados médios do talhão com a variedades SP80-1842 nas safras 2001 e 2002.....	77
Tabela 15. Modelos de regressão múltipla das variáveis agronômicas da variedade de cana-de-açúcar SP80-1842 e de variáveis espectrais orbitais dos sensores TM e ETM+ do Landsat das safras 2000/2001 e 2001/2002.....	79

## RESUMO

O conhecimento das relações entre variáveis biofísicas das culturas agrícolas e dados espectrais é uma das informações mais importantes para a aplicação de sensoriamento remoto na estimativa da produtividade e em estudos de previsão de safra. Este trabalho estuda as relações entre variáveis agronômicas da cana-de-açúcar e dados espectrais em dois níveis de aquisição: terrestre e orbital. A área de estudo foi um talhão comercial da variedade de cana-de-açúcar SP80-1842, plantada em 1996, localizado no município de Araras, SP. Durante as safras 2000/2001 e 2001/2002, foram realizados nove trabalhos de campo, simultaneamente à aquisição de nove imagens orbitais, os quais representaram as três principais fases do ciclo da cultura. O relacionamento das variáveis agronômicas índice de área foliar (IAF), número de perfilhos por metro (NPM), produtividade agrícola (TCH) e biomassa aérea total (BMT), com os dados espectrais terrestres e orbitais, foi avaliado por meio de análise temporal, regressões lineares simples e múltipla (Stepwise), e coeficiente de correlação de Pearson. Os dados espectrais terrestres foram adquiridos utilizando-se o radiômetro Cimel CE 313a e os dados orbitais foram obtidos de imagens dos sensores TM e ETM+ a bordo dos satélites Landsat-5 e Landsat-7. As bandas espectrais do vermelho (630 a 690 nm - B3) e do infravermelho (760 a 900 nm - B4) nos dois níveis de aquisição de dados de sensoriamento remoto foram utilizadas para estudar as relações com as variáveis da cana-de-açúcar. Além das bandas espectrais, foram estudadas as relações das variáveis agronômicas da cana-de-açúcar com os índices espectrais de vegetação, índice de vegetação da razão simples (SR), índice de vegetação da razão (RVI), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI). As variáveis agronômicas tiveram seu comportamento temporal explicado por curvas do tipo sigmoidal e exponencial. Os dados espectrais, por outro lado, tiveram comportamento temporal explicado por modelos cúbicos, exponenciais cúbicos e quadráticos. Os dois níveis de dados espectrais (terrestre e orbital) não diferiram estatisticamente. Os índices de vegetação NDVI, SR e RVI foram os dados espectrais mais correlacionados com as variáveis agronômicas, nos dois níveis de dados de sensoriamento remoto. As regressões lineares múltiplas, geradas para estimar a TCH e a

BMT, apresentaram coeficientes de determinação ( $r^2$ ) superiores a 0,90, nos modelos com os dados de radiometria de campo, e superiores a 0,85 com os dados orbitais, mostrando-se uma técnica eficiente para a estimar a produtividade e a biomassa aérea da cana-de-açúcar.

Palavras chave: Cana-de-açúcar; indicadores de crescimento; dados espectrais terrestres; dados espectrais orbitais.

## ABSTRACT

The knowledge about the relations between agronomic variables and spectral data is a challenging issue when adopting remote sensing technique for crop yield forecast. This study analyses the relationship between sugarcane agronomic variables and spectral data derived from field spectroscopy and orbital data. One commercial field of sugarcane with the variety SP80-1842, planted in 1996, located in Araras municipality, São Paulo State, was monitored by biophysical data, field spectroscopy and satellite images in nine different dates during the crop seasons of 2000 and 2001. Leaf area index (LAI), number of stalks per meter (NPM), yield (TCH), total biomass (BMT) and spectral data were studied by temporal analysis, by linear and multiple regressions (Stepwise), and correlation analysis. Field spectroscopy data were obtained with Cimel 313a and orbital data were gathered from Landsat-5 and Landsat-7 images. All the three sensors have the same spectral resolution. The spectral data studied were red band, near infrared band and the spectral vegetation indices SR, RVI, NDVI and SAVI. The temporal behaviour of the agronomic variables were explained by sigmoidal and exponential models and the spectral data were explained by quadratic, cubic and exponential cubic models. No significant differences were found between the two levels of spectral data: field spectroscopy and orbital images. The best correlations between spectral vegetation indices and agronomic variables were with NDVI, SR and RVI. Multiple regression used to estimate yield and biomass obtained  $r^2$  values greater than 0,90 for field spectroscopy and greater than 0,80 for satellite images. These results showed the feasibility of using regression analysis to estimate yield and biomass of sugarcane based on spectral data.

Key words: Sugarcane; growth analysis; field spectroscopy; orbital spectral data.

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A cana-de-açúcar está entre as principais culturas cultivadas no país e atualmente é considerada a terceira cultura mais importante. É plantada praticamente em todos os estados brasileiros e ocupa um total de 5,4 milhões de hectares no ano de 2004 (UNICA, 2005). Devido ao seu potencial produtivo e excelente adaptação ao clima do Brasil, a cana-de-açúcar destaca-se como uma cultura que vem exercendo grande importância econômica ao longo de nossa história. Nos últimos trinta anos, com o advento do Programa Pro-Álcool, a cultura da cana-de-açúcar passou a ser estratégica, não só como geradora de divisas pela exportação de açúcar, mas como fonte de energia renovável. O álcool combustível e a co-geração de energia elétrica do bagaço da cana-de-açúcar são atualmente pilares fundamentais na matriz energética do país (UNICA, 2005).

A cultura apresenta nível tecnológico entre os mais elevados da agricultura brasileira, lançando mão de técnicas como gerenciamento da lavoura através de bancos de dados, setorização da produção agrícola em talhões e emprego de imagens de satélites no mapeamento de variedades de cana-de-açúcar (JOAQUIM, 1998). Portanto, a demanda por avaliações de novas tecnologias aplicadas ao setor sucro-alcooleiro é sempre grande, não podendo ser diferente no caso do geoprocessamento e do sensoriamento remoto.

O sensoriamento remoto proporciona uma visão sinóptica da área estudada, além de possibilitar um monitoramento dos diversos estágios de uma cultura. O recente desenvolvimento de novos sensores, orbitais e não orbitais, de altas resoluções espacial e espectral, abriu a perspectiva da disponibilidade de imagens com melhor qualidade espectral e, por consequência, com maiores aplicações nos estudos desta cultura.

Embora em alguns trabalhos o comportamento espectral da cana-de-açúcar tenha sido estudado com diversos sensores (BATISTA et al., 1976; BATISTA et al., 1978; RUDORFF e BATISTA, 1990; JOAQUIM, 1998; MATTEO, 1998; PELLEGRINO, 2001; FORTES, 2003) ainda existe uma carência de estudos relacionando parâmetros agrônômicos da cultura com a sua resposta espectral. Neste enfoque encontra-se este trabalho, que busca avaliar as técnicas de sensoriamento remoto no estudo da cana-de-açúcar.

A hipótese do trabalho é que as características agronômicas número de perfilhos por metro e índice de área foliar da cultura da cana-de-açúcar são estimáveis por sensores remotos terrestres e orbitais ao longo do ciclo e que, portanto, a resposta espectral da cultura está correlacionada com a biomassa aérea e a produtividade da cultura.



## 2. OBJETIVOS

### GERAL

Esta pesquisa tem por objetivo estudar o comportamento espectro-temporal da cultura da cana-de-açúcar com base em dados de sensoriamento remoto e estabelecer relações entre a produtividade da cultura e índices espectrais de vegetação (IVs).

### ESPECÍFICOS

- Estudar e descrever o comportamento temporal das variáveis agrônômicas índice de área foliar, número de perfilhos por metro, produtividade agrícola e biomassa aérea total da cana-de-açúcar ao longo de duas safras;
- Avaliar o monitoramento do crescimento e a estimativa da produtividade da cultura da cana-de-açúcar com dados espectrais terrestres;
- Estabelecer relações entre a resposta espectral da cultura da cana-de-açúcar a partir de dados orbitais com a produtividade e a biomassa total utilizando diferentes índices de vegetação.

A presente tese apresenta a revisão de literatura e o “material e métodos” no formato tradicional. Os resultados, no entanto, são apresentados na forma de seções, onde cada seção corresponde a um trabalho científico. No total são apresentados três trabalhos, já submetidos à Revista Scientia Agrícola e que foram aqui compilados e unidos em um único documento. Ao final é apresentada uma conclusão geral da tese.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma gramínea semiperene pertencente ao gênero *Saccharum*, que apresenta máximo potencial de produção na fase vegetativa, e que completa seu ciclo através de um déficit hídrico ou térmico, a fim de acumular sacarose nos colmos (JOAQUIM, 1998).

O desenvolvimento vegetativo da cultura está associado às condições de fertilidade e de propriedades físicas dos solos, embora a cultura não seja exigente em solos.

Os ciclos de desenvolvimento da cultura estão apresentados na Figura 1, onde o primeiro ciclo representa a evolução da cana em 12 meses, chamado de cana de ano ou de cana de 12 meses. O outro ciclo representa as canas que se desenvolvem em 18 meses, sendo chamadas de cana de ano e meio ou de 18 meses. Após o primeiro corte, o ciclo passa a ser sempre de 12 meses para todas as variedades.

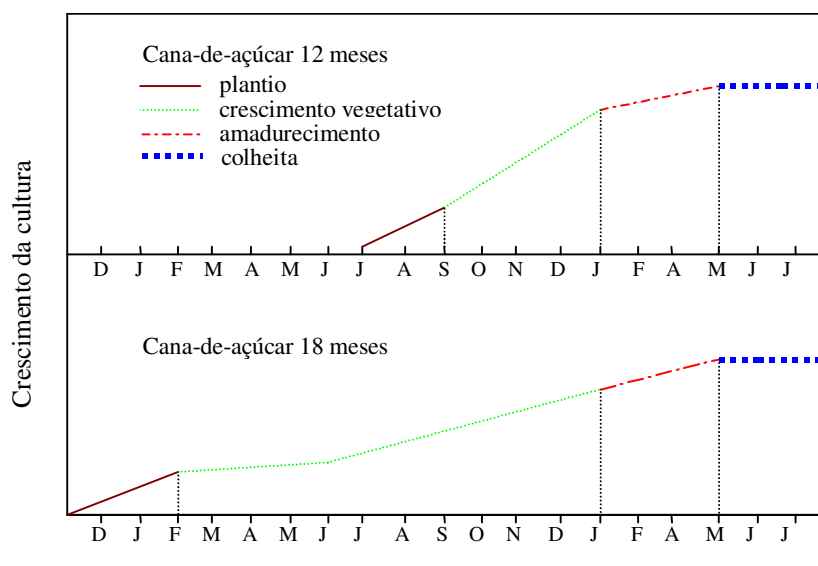


Figura 1. Ciclo evolutivo da cana de 12 e 18 meses, na região Centro-Sul do Brasil.

Fonte: ALFONSI et al. (1987).

MACHADO (1981) e MACHADO et al. (1982) estudaram a biometria de duas variedades de cana-de-açúcar (CB41-41 e NA56-79) na região de Piracicaba, SP com o objetivo de conhecer o desenvolvimento da cultura com fins de previsão de safra e modelagem matemática. Os autores propuseram curvas sigmoidais para descrever o desenvolvimento da matéria seca total das duas variedades. O peso seco das folhas também apresentou comportamento sigmoidal em relação à variável dias após o plantio (DAP), e a área foliar apresentou relação linear com a massa foliar ao longo de todo o ciclo da cultura. A porcentagem do peso de colmos no peso total da cana foi diminuindo com o desenvolvimento da cultura e a diminuição da massa foliar da cultura. As curvas que descreveram o desenvolvimento temporal do número de colmos das variedades foram caracterizadas por uma fase inicial de intenso aumento no número de colmos, seguido por outra fase de declínio até a estabilização do número de colmos por metro quadrado.

SHIH e GASCHO (1980) pesquisaram as relações entre a altura dos colmos, o índice de área foliar (IAF) e a matéria seca de quatro cultivares de cana-de-açúcar no Havaí, buscando expressar a produtividade da cana e o número de perfilhos por metro linear (NPM) como uma função do índice de área foliar. Os resultados obtidos mostraram que o IAF foi correlacionado significativamente com o NPM e com o peso da matéria seca de colmos, podendo esta relação ser expressa por regressões matemáticas do tipo exponencial-hiperbólica. Os autores atribuem o declínio dos valores de NPM ao aumento dos valores de IAF e ao fechamento do dossel, em decorrência do aumento da competição por iluminação no dossel da cultura. A matéria seca de colmos também foi altamente correlacionada com o IAF, contudo o aumento do IAF não ocasionou diminuição da matéria seca, o que ocorreu foi uma estabilização do aumento da matéria seca em virtude da estabilização dos valores do IAF.

ROBERTSON et al. (1996) estudaram o desenvolvimento de uma variedade de cana de ano e meio (cana de 18 meses) plantada sob condições de irrigação, na Austrália, para verificar a relação da radiação solar interceptada com o acúmulo de biomassa da cana. Os autores observaram que o aumento do peso de colmos acompanhou o comportamento do acúmulo de biomassa total da cultura. Também EVENSEN et al. (1997) encontraram relação linear estatisticamente significativa entre a biomassa total da cultura e o peso de

colmos ( $r^2=0,98$ ). Os valores de IAF aumentaram até atingirem valor máximo por volta dos 300 dias após o plantio (DAP) com posterior declínio nos valores até a colheita. Esta queda foi relacionada com a translocação de açúcares para os colmos aumentando o peso dos mesmos. O aumento da biomassa total foi apontado pelos autores como resultado do elevado aumento do peso dos colmos de cana, mesmo com a diminuição do NPM a partir dos 100 DAPs. Os autores obtiveram uma correlação linear estatisticamente significativa do NPM com o DAP e modelos sigmoidais para descrever a relação da biomassa total e o IAF e conseqüentemente com a radiação solar interceptada. Resultados similares também foram encontrados por MUCHOW et al. (1997) pesquisando o comportamento do IAF de seis cultivares de cana na Austrália e no Havaí.

A utilização de sensoriamento remoto voltado para a cultura de cana-de-açúcar, no Brasil, começou na década de 1970 com os estudos de BATISTA et al. (1976), BATISTA et al. (1978) e MENDONÇA (1980). Nesses estudos, a ênfase era dada na identificação das áreas plantadas com a cultura, por meio de métodos visuais. Mudando o enfoque, RUDORFF (1985) estudou o potencial do uso de dados Landsat para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar. Os resultados mostraram que a utilização de índice de vegetação e de dados agrometeorológicos explicou 56% da variação da produtividade da cultura, permitindo concluir que este tipo de dado pode estimar e avaliar a produtividade da cana-de-açúcar. Em outro estudo, RUDORFF e BATISTA (1990) encontraram a maior correlação entre a produtividade (matéria seca medida em campo) e a matéria seca estimada quando foram utilizados dados de sensoriamento remoto e modelos agrometeorológicos conjuntamente. A utilização dos dois métodos explicou 69% da variabilidade da produtividade, enquanto que a utilização somente de modelos meteorológicos e somente de dados de sensoriamento remoto baseados em índices de vegetação explicaram 64% e 59%, respectivamente.

JOAQUIM (1998), estudando a possibilidade de identificação de três variedades de cana-de-açúcar, em três tipos de solo, verificou que a cana-de-açúcar plantada em solos mais férteis (solos argilosos) apresentava maior nível de cinza nas bandas três e quatro, infravermelho próximo e infravermelho médio, respectivamente, do TM/Landsat-5, enquanto que a banda três apresentava valores espectrais menores. Este comportamento

mostra que índices de vegetação podem ser bons estimadores da variação da produtividade da cultura. Outro resultado obtido pelo autor mostrou que as diferenças entre os solos não interferiram significativamente na resposta espectral da cultura em estado avançado de desenvolvimento vegetativo, permitindo análises dos dados independentemente do tipo de solo no qual a cultura estava plantada. O autor também observou que a melhor época para obtenção de imagens orbitais para monitoramento da cultura foi o começo do outono, nos meses de abril e maio, devido à menor cobertura de nuvens, mas principalmente em virtude de a cultura expressar todo seu potencial de produção e atingir a máxima biomassa aérea e finalizar o ciclo de desenvolvimento vegetativo. Na mesma linha, FORTES (2003) conseguiu diferenciar quatro variedades de cana-de-açúcar na região de Paraguaçu Paulista usando dados do sensor ETM+ do Landsat-7 e a técnica estatística de análise discriminante.

RUDORFF (1985) concluiu que a melhor época para aquisição de dados Landsat para o estabelecimento de um modelo de produtividade para a cana-de-açúcar encontra-se próximo ao mês de fevereiro, um a dois meses antes do início da colheita.

Para obtenção de informações com vistas à estimativa da produção de cana-de-açúcar por meio de dados de sensoriamento remoto, é necessário, primeiramente, o conhecimento dos fatores que influenciam e conseqüentemente interferem na resposta espectral da cultura.

## 3.2. SENSORIAMENTO REMOTO

### 3.2.1. Radiometria de campo

MILTON (1987) afirma que a espectroscopia de campo é uma técnica de fundamental importância no sensoriamento remoto, tanto para a pesquisa básica, como para aplicações práticas. A espectroscopia de campo envolve o estudo das inter-relações entre características espectrais de objetos e seus atributos biofísicos no ambiente de campo.

Assim, é essencial que os dados espectrais coletados no campo sejam apoiados por informações adequadas e detalhadas sobre as condições de medição e por dados auxiliares, tais como localização da área de estudo (latitude e longitude), tempo de cada medição e tempo total das medições, condições meteorológicas e variações nas condições do céu

(presença de nuvens), altura do instrumento em relação ao terreno e em relação ao alvo, área efetiva do alvo vista pelo sensor em virtude do seu campo de visada e da sua altura, geometria de aquisição dos dados, variações nas posições do sensor e do alvo devido a problemas ambientais tais como vento, acamamento da cultura, variações no declive, entre outras informações apontadas por MILTON (1987). Caso estes cuidados de documentação não sejam tomados, raramente todo o potencial da espectroscopia de campo poderá ser utilizado.

Em geral, os alvos naturais não são refletores perfeitamente difusos, ou seja, lambertianos. Portanto, a intensidade do fluxo refletido varia com o ângulo que ela deixa a superfície. Conseqüentemente, pode-se dizer que o ambiente de radiação compreende duas distribuições hemisféricas da radiação eletromagnética, uma chegando (irradiância) no alvo e outra saindo (radiância) do alvo. É a interação entre estas duas distribuições que constitui o foco de interesse da espectroscopia de campo (FORMAGGIO, 1989).

Tanto a radiância (feixe refletido) quanto a irradiância (feixe incidente) variam com o zênite e com o azimute; portanto, para especificar integralmente o campo de reflectância do alvo, a radiância e a irradiância deveriam ser medidas em todas as possíveis posições e direções fonte/sensor, resultando em uma “função de distribuição da reflectância bidirecional” (FDRB). Contudo, no ambiente de campo, a medição de irradiância na superfície do alvo não é possível e uma alternativa à FDRB é o uso do “fator de reflectância bidirecional” (FRB). O termo bidirecional refere-se aos dois ângulos envolvidos no processo de reflexão: o primeiro refere-se à posição da fonte iluminante e o segundo à posição do sensor. A utilização do termo “fator de reflectância” (FR) é preferível ao termo Reflectância Bidirecional, já que sua definição é mais geral e se aplica a todos os casos (GUYOT, 1989).

Como não é exequível fazer medições em número suficiente de ângulos para caracterizar fielmente a FDRB de um dossel, define-se uma geometria padrão, que freqüentemente, é utilizada em medições da radiação refletida de uma superfície agrícola ( $I_r$ ) com ângulo zenital igual a  $0^\circ$ , de maneira que o feixe incidente de radiação passa a depender exclusivamente dos ângulos de incidência (zenital) solar e do ângulo azimutal solar.

A abordagem proposta por DUGGIN e CUNIA (1983) para o cálculo do fator de reflectância consiste em medir, simultaneamente, a irradiância solar com um receptor cosseno e a radiância do alvo agrícola com radiômetro convencional. O emprego de dois aparelhos obriga a execução de intercalibração entre os radiômetros, com a utilização de uma placa padrão de reflectância conhecida (placa de sulfato de bário).

Como a reflectância na faixa do infravermelho próximo é dominada pela estrutura interna das folhas, mudanças em seus valores podem revelar alterações no vigor da cultura, estágio de maturação, senescência da cultura, efeito de doenças e ataques de pragas (FORMAGGIO, 1989).

MOREIRA (2000) afirma que a curva espectral da vegetação é gradativamente modificada à medida que a vegetação entra em processo de senescência, com a desidratação e a perda de pigmentos. A absorção da radiação no visível é reduzida, com conseqüente mudança na forma da curva, que será mais suave e crescente, assemelhando-se ao perfil de resposta do solo. No infravermelho próximo (IVP), observa-se uma pequena redução na reflectância, causada pela diminuição dos espaços intercelulares, resultante do processo de desidratação. Finalmente, no infravermelho médio (IVM) ocorre a diminuição da intensidade das feições espectrais de absorção causadas pela água líquida da matéria viva, também resultante da desidratação. GAUSMAN (1985) comenta que a energia refletida pelas folhas é afetada pelos pigmentos, pelos espaços ocupados por água e por ar, pela estrutura celular do mesófilo foliar, pelo conteúdo de água, pela maturação ou idade da folha, pela posição nodal, pela condição de iluminação (expostas ao sol ou constantemente à sombra), pela quantidade de pêlos e pela senescência.

Em virtude da diferença dos valores de reflectância nas faixas do visível (400 nm a 740 nm) e do infravermelho próximo (740 a 1400 nm) e das diferenças nas informações contidas nestas faixas do espectro, é que se utilizam razões entre bandas para inferir as condições de vigor e produtividade da vegetação (WIEGAND et al., 1991).

O comportamento espectral das culturas agrícolas está intimamente relacionado com o comportamento espectral do solo, haja vista que, em condições de campo, a radiância detectada é função do comportamento espectral conjunto do solo e da cultura. 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. Na faixa do infravermelho, o dossel das culturas vai refletir e transmitir em direção ao solo uma porção significativa da radiação incidente. O solo, conseqüentemente, vai refletir de volta para o sensor parte desta energia refletida e transmitida pelo dossel. Na faixa do vermelho a radiação é fortemente absorvida pelo dossel, não permitindo que uma porção significativa da radiação seja refletida de volta para o sensor (HUETE et al., 1985).

Conhecendo os efeitos que a resposta espectral dos solos tem sobre o comportamento espectral da vegetação, diversos autores vêm se preocupando em separar estes efeitos, a fim de melhor caracterizar a vegetação e permitir que dados espectrais, como os índices de vegetação, possam ser utilizados no monitoramento da produtividade e no desenvolvimento de modelos que relacionem a resposta espectral com sua produtividade (HUETE, 1988; WIEGAND et al., 1991; QI et al., 1994).

### 3.2.2. Sensoriamento remoto orbital

O sensoriamento remoto orbital tem sido empregado em inúmeras aplicações em agricultura nos últimos anos. Aplicações na previsão de safra (IPPOLITI-RAMILO et al., 1999), planejamento do uso da terra (CAVALI, 1999), monitoramento de deficiências hídrica e nutricional em áreas agrícolas (MORAN et al., 1997), mapeamento e estimativa da produtividade de culturas agrícolas (MACHADO, 2003) e identificação de variedades (JOAQUIM, 1998; FORTES, 2003) têm incentivado a busca e o desenvolvimento de novas metodologias.

Outras aplicações estão sendo estudadas no sentido de integrar dados multiespectrais com dados biofísicos, IAF, radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) e temperatura, em modelos de crescimento agrometeorológicos, sendo esta uma das possibilidades de aplicação do sensoriamento remoto em agricultura de precisão, segundo MORAN et al. (1997) e BARNES et al. (1996).

MORAN et al. (1995) utilizaram dados simulados das bandas do Landsat-5/TM com radiometria de campo para estimar a evapotranspiração e a produção de biomassa em



um modelo de crescimento de alfafa. Os modelos usavam dados derivados da altura das plantas e do IAF para estimar a evapotranspiração e a biomassa. O IAF e a altura das plantas foram determinados através de razão simples das bandas vermelho e infravermelho (RVI) medidos com um radiômetro de bandas em 18 pontos amostrais na área experimental da cultura. Os resultados apresentados destacaram que os dados de evapotranspiração e IAF estimados pelos modelos apresentaram resultados similares com os dados medidos em campo, com diferenças mais acentuadas nos casos de intervalos maiores na coleta de dados de sensoriamento remoto.

Outros autores, pesquisando modelos para estimativas de biomassa e produção, mostraram boas correlações entre variáveis biofísicas de várias culturas, inclusive de cana-de-açúcar, e variáveis espectrais (CLEVERS, 1988; WIEGAND et al., 1979; 1986a, 1986b, 1991; RUDORFF e BATISTA, 1990, 1991 e PRICE e BAUSCH, 1995).

Especificamente para a cultura da cana-de-açúcar e a relação espectral entre suas variáveis biofísicas e dados espectrais orbitais, poucos são os trabalhos encontrados na literatura. Pode-se citar o trabalho de PELLEGRINO (2001) usando dados do satélite NOAA, o trabalho de JOAQUIM (1998) com dados do Landsat 5 e os trabalhos de MACHADO (2003) e de FORTES (2003) utilizando dados do sensor ETM+ do Landsat-7.

### 3.2.3. Índices de Vegetação

Os índices de vegetação (IVs) foram concebidos para ressaltar o comportamento espectral da vegetação e estão baseados fundamentalmente nas diferenças quantitativas entre a radiação refletida, absorvida e a transmitida no vermelho e no infravermelho. No infravermelho a radiação é basicamente transmitida e refletida, e pouco absorvida, enquanto que no visível a radiação absorvida é a que predomina, com pequena reflexão e transmissão (JACKSON e HUETE, 1991).

Há duas classes principais de índices de vegetação, as razões espectrais e os índices ortogonais (HUETE, 1988). As razões podem ser resultado de uma simples divisão entre duas bandas espectrais individuais, ou o quociente de somas, diferenças ou produtos de

determinado número de bandas. Os índices ortogonais são combinações de  $n$  equações lineares, calculadas usando dados de  $n$  bandas espectrais.

As equações abaixo descrevem alguns índices discutidos a seguir na revisão de literatura:

$$SR = \frac{V}{IVP} \quad \text{- Índice de vegetação da razão simples} \quad [1]$$

$$RVI = \frac{IVP}{V} \quad \text{- Índice de vegetação da razão} \quad [2]$$

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad \text{- Índice de vegetação por diferença normalizada} \quad [3]$$

$$WDVI = IVP_{cult} - \left(\frac{IVP_{solo}}{V_{solo}}\right) * V_{cultura} \quad \text{- Índice de vegetação por diferença ponderada} \quad [4]$$

$$SAVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V + L)} * (1 + L) \quad \text{Índice de vegetação ajustado ao solo} \quad [5]$$

$$MSAVI = \frac{2 * IVP + 1 - \sqrt{(2 * IVP)^2 - 8 * (IVP - V)}}{2} \quad \text{Índice de vegetação ajustado ao solo modificado} \quad [6]$$

$$OSAVI = \frac{2 * IVP + 1 - \sqrt{(2 * IVP)^2 - 8 * (IVP - V)}}{2} \quad \text{Índice de vegetação ajustado ao solo otimizado} \quad [7]$$

$$NRI = \frac{(IVP/Vd)alvo\ interesse}{(IVP/Vd)referencia} \quad \text{Índice de reflectância do nitrogênio} \quad [8]$$

onde IVP, V e Vd são as reflectâncias correspondentes aos comprimentos de onda do infravermelho próximo, do vermelho e do verde, respectivamente.

Segundo essas duas classes gerais, diversos índices foram propostos na literatura (KAUTH e THOMAS, 1976; TUCKER, 1979; JACKSON, 1983; HUETE, 1988; KAUFMAN e TANRÉ, 1992; QI et al., 1994). Cada um dos índices propostos tem uma particularidade, realçando ou considerando um determinado fator de interesse, devendo-se escolher aquele que melhor se ajusta aos objetivos do estudo e à experiência do usuário.

As grandes vantagens do emprego de dados de sensoriamento remoto transformados em índices de vegetação são a redução do número de bandas utilizadas e a correlação com variáveis agronômicas e biofísicas das culturas (MOREIRA, 1992). No caso do NDVI, vários estudos mostraram a sua alta correlação com parâmetros associados com o vigor e a 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), conteúdo de clorofila (CHAPELLE et al., 1992) e estado das culturas (WIEGAND et al., 1992) e a possibilidade de seu emprego em modelos de estimativa da produtividade de culturas (RUDORFF e BATISTA, 1990; RUDORFF e BATISTA, 1991; MORAN et al., 1995; SINGH et al., 1992).

JACKSON et al. (1983) estudaram o comportamento de vários IVs derivados da informação das bandas espectrais do sensor Landsat-MSS tentando avaliar, entre outras coisas, a sua capacidade de discriminar o solo nu e o solo coberto com baixa percentagem de vegetação. Observaram que o Índice da vegetação da razão (Ratio vegetation index) RVI apresentou-se pouco sensível à presença de vegetação quando a cobertura foi menor que 50%. Ao avaliar o NDVI, observaram que este foi mais sensível às pequenas percentagens de recobrimento por vegetação do que o RVI. Quando a porcentagem de cobertura alcançou 15%, o NDVI aumentou significativamente em relação aos valores apresentados para solo nu. Para porcentagens de vegetação entre 25% e 80%, este índice apresentou um comportamento linear, passando posteriormente a ser menos sensível aos acréscimos da vegetação. Este índice também detectou vegetação cobrindo o solo entre 15-25% e aumentou rapidamente com o aumento da vegetação, até uma percentagem de cobertura de 80%. Acima deste nível, a sensibilidade do índice decresceu. Estes resultados indicaram a maior sensibilidade do NDVI a densidades menores de vegetação, mas, por outro lado, menos sensível que o RVI às altas densidades de plantas, mostrando que cada um desses índices pode ser utilizado em uma época específica do desenvolvimento das culturas, maximizando a informação contida sobre a cultura (JACKSON e HUETE, 1991).

WOOD et al. (2003) analisaram a possibilidade de utilização do NDVI calculado de fotografias aéreas digitais na identificação da variabilidade espacial da cultura da cevada. Essa técnica foi utilizada como opção no manejo de práticas agrícolas, ajudando no

diagnóstico da condição da cultura. Em outro trabalho, TAYLOR et al. (1998) demonstraram a potencialidade de utilização de fotografias aéreas para estimar a produtividade da cultura da cevada. O trabalho mostrou boas correlações entre o NDVI e o peso de grãos por unidade de área ( $r^2 = 0,78$ ). Este foi o parâmetro da planta, medido em campo, e escolhido para fazer a correlação com as medidas de NDVI. Mas, nas fases iniciais do ciclo, em virtude de a cultura estar ainda na fase vegetativa e não apresentar nem espigas, nem grãos, a estimativa da produtividade da cultura foi feita através da contagem do número de plantas por metro linear, obtendo também boas correlações com o NDVI. ANDERSON e YANG (1996) também obtiveram bons resultados em um experimento empregando o NDVI de imagens obtidas de uma câmera digital multiespectral aerotransportada. Os resultados observados foram promissores para o emprego do NDVI em mapeamentos da produtividade da cultura do sorgo e da sua utilização na estimativa de variáveis agronômicas da cultura, como a produtividade e o IAF, em virtude das altas correlações encontradas ( $r^2=0,95$  e  $0,85$  respectivamente).

STEVEN e MILLAR (1997) estudaram seis campos de trigo de inverno na Inglaterra e constataram que o NDVI, obtido de imagens SPOT multiespectrais, apresentou elevadas correlações com a produtividade ( $r^2=0,77$ ), superiores às apresentadas pelas bandas separadamente e explicou 60% da variância nos dados de produtividade. Os autores pesquisaram também a possibilidade de estimar a produtividade da cultura da beterraba usando modelos derivados do NDVI e do OSAVI (Optimised Soil Adjusted Vegetation Index) e verificaram a inexistência de diferenças estatísticas significativas, ao nível de 99% de significância, entre os dois índices. Contudo, ambos foram eficientes em mapear as variações na produtividade da cultura.

A instabilidade da relação dos dados espectrais com parâmetros agronômicos causada por problemas de calibração dos sensores e pela interferência atmosférica são as principais causas da limitação do uso de sensoriamento remoto para fins de estudos da produtividade das culturas. Contudo, a utilização de dados radiométricos coletados ao nível terrestre minimizam estes efeitos e possibilitam o estudo preciso e específico destas relações (RUDORFF e BATISTA, 1989b).

Em outro experimento, desenvolvido por DIKER et al. (1998), os autores encontraram resultados que indicaram que o índice NRI obtido de radiometria de campo, foi o índice que melhor se correlacionou com a produtividade de duas variedades de milho, em comparação com o NDVI e MSAVI. Os autores encontraram também boas correlações entre todos os índices e parâmetros da planta medidos em campo (índice de área foliar, matéria seca). Dependendo do estágio fenológico da cultura e do tipo de arquitetura do dossel, um índice pode ser mais bem correlacionado que os outros. QI et al. (1994) analisaram vários índices (NDVI, SAVI, MSAVI, WdVI) para caracterizar as variações temporal e espacial da vegetação, utilizando sensoriamento remoto não orbital, com o intuito de diminuir as influências do solo. O MSAVI, de acordo com os estudos, comportou-se bem na caracterização da vegetação, pois o fator L introduzido na equação de NDVI funciona como um peso (0-1), de acordo com a maior ou menor exposição do solo. Quanto maior a exposição do solo, mais próximo de 1 ficará o fator L, tornando o SAVI igual á outros índices, como o WdVI. Para coberturas vegetais totais, o fator L torna-se zero, igualando o SAVI ao NDVI e para coberturas intermediárias o MSAVI torna-se igual ao SAVI.

Uma análise crítica e comparativa dos índices aqui apresentados sugere que o RVI é menos sensível a variações na quantidade de vegetação nas fases iniciais de desenvolvimento das culturas que o NDVI, sendo o contrário também verdadeiro. Desta forma, o primeiro é mais indicado para estudos nas fases desenvolvimento vegetativo e maturação das culturas (JACKSON e HUETE, 1991). Por outro lado, o SAVI, pela sua própria formulação, é mais indicado para mapeamento da biomassa nas fases intermediárias de desenvolvimento das culturas, devido à eliminação da interferência da reflectância do solo na resposta espectral da cultura (HUETE, 1988). QI et al. (1994) apontam que o MSAVI possui intervalo de resposta em relação à 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 que 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.

Grande parte dos trabalhos desenvolvidos utilizando IVs em agricultura são baseados em dados de NDVI, devido ao bom conhecimento de suas relações com parâmetros agronômicos. Contudo nem sempre seu emprego é o que ogera os melhores resultados. Por isso, outros índices precisam ser avaliados para outros sensores e para outras aplicações, para que sejam abertas novas perspectivas para a aplicação de índices de vegetação em agricultura (PELLEGRINO, 2001).

#### 3.2.4. Correção atmosférica

O mecanismo de aquisição de dados de sensores orbitais apresenta limitações, uma vez que entre o sensor e a superfície existe um meio extremamente dinâmico: a atmosfera. A atmosfera interage com a radiação eletromagnética, provocando significativas alterações no fluxo radiante proveniente do alvo (LATORRE, 1998).

Os principais fatores causadores destas alterações (como perda de nitidez na imagem, diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor, diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e deformação do brilho superficial) são o espalhamento molecular, o espalhamento por aerossóis e a absorção pelos gases atmosféricos (vapor d'água, oxigênio e dióxido de carbono e aerossóis). (ZULLO Jr., 1994).

Para a completa utilização do potencial dos dados de sensoriamento remoto orbital, é necessária a conversão dos dados de saída dos sensores orbitais de números digitais (DN) para valores de radiância real ou reflectância.

ZULLO Jr. (1994) desenvolveu um sistema computacional denominado de Sistema de Correção Radiométrica de Imagens de Satélite (SCORADIS) com o objetivo de remover os efeitos atmosféricos de imagens de sensoriamento remoto, baseado na teoria e nos parâmetros atmosféricos calculados pelo Modelo 5S (Simulation du Signal Satellitarie dans le Spectre Solarie) (TANRÉ et al., 1990).

ZULLO Jr. (1994) observou que a correção atmosférica de alguns alvos em imagens LANDSAT através do sistema SCORADIS tiveram os seus valores de NDVI subestimados devido à presença da atmosfera. Por outro lado, em uma área de cana foi observada uma diferença entre os valores de NDVI de 0,6 na imagem corrigida e 0,4 na imagem original. Se estes dados fossem utilizados para a estimativa de biomassa da cultura e se fosse considerado a relação entre o NDVI e biomassa encontrada por TUCKER (1979), essa diferença corresponderia a um acréscimo de 140% na biomassa estimada, unicamente devido à correção atmosférica. MORAN et al. (1991) também ratificam a importância que a correção atmosférica das bandas do sensor TM do Landsat-5 possuem, mostrando erros similares entre o método de subtração usando-se objetos escuros na imagem com uma imagem não corrigida.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi conduzido em um talhão de cana-de-açúcar da Usina São João Açúcar e Álcool, localizada no município de Araras, SP. A Figura 2 mostra o mapa de solos da Fazenda Santo Antônio onde foi realizado o estudo.

Segundo o levantamento de solos no nível de semi-detalhe na escala 1:20.000, realizado pela usina em parceria com a Copersucar (COPERSUCAR, 1997), os solos predominantemente são o Latossolo Vermelho textura muito argilosa (LVef), Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa (LVd), e Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura argilosa (LVAd) e Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura argilosa moderadamente drenado (LVAd-mod.drenado). Embora o mapeamento dos solos tenha indicado estes tipos de solos, a usina em suas operações agrícolas de plantio, adubação e tratos culturais considera todos estes solos como uma única unidade de manejo. A declividade da área não ultrapassa 12%, valor limite para colheita mecanizada sem queima.

A área de estudo é identificada por OLIVEIRA et al. (1982), segundo o sistema Köppen, com um clima do tipo CWa, ou seja, clima mesotérmico de inverno seco. A distribuição pluvial segue o regime típico das zonas tropicais de baixa altitude, ou seja, verão chuvoso e inverno seco. O balanço hídrico histórico assinala discreto período de deficiência hídrica, que se estende de maio a setembro. As médias do inverno chegam em junho e julho a valores inferiores a 18°C, superando 22°C em janeiro e fevereiro. No Anexo 1 estão apresentados os dados de clima coletados pela estação agrometeorológica da Universidade Federal de São Carlos, em Araras, para os anos de 2000, 2001 e 2002.

A variedade plantada na área de estudo é a variedade SP80-1842, uma variedade precoce com hábito decumbente e acamamento regular. O perfilhamento é médio, com colmos de crescimento vigoroso. As folhas são de largura média, comprimento longo e pontas dobradas. Os ensaios realizados pelo Centro de Tecnologia Copersucar revelaram que a SP80-1842 é uma variedade de baixa exigência em fertilidade de solo e que apresenta produtividade superior nas soqueiras quando comparada com a cana de primeiro corte (cana planta) (COPERSUCAR, 1993).



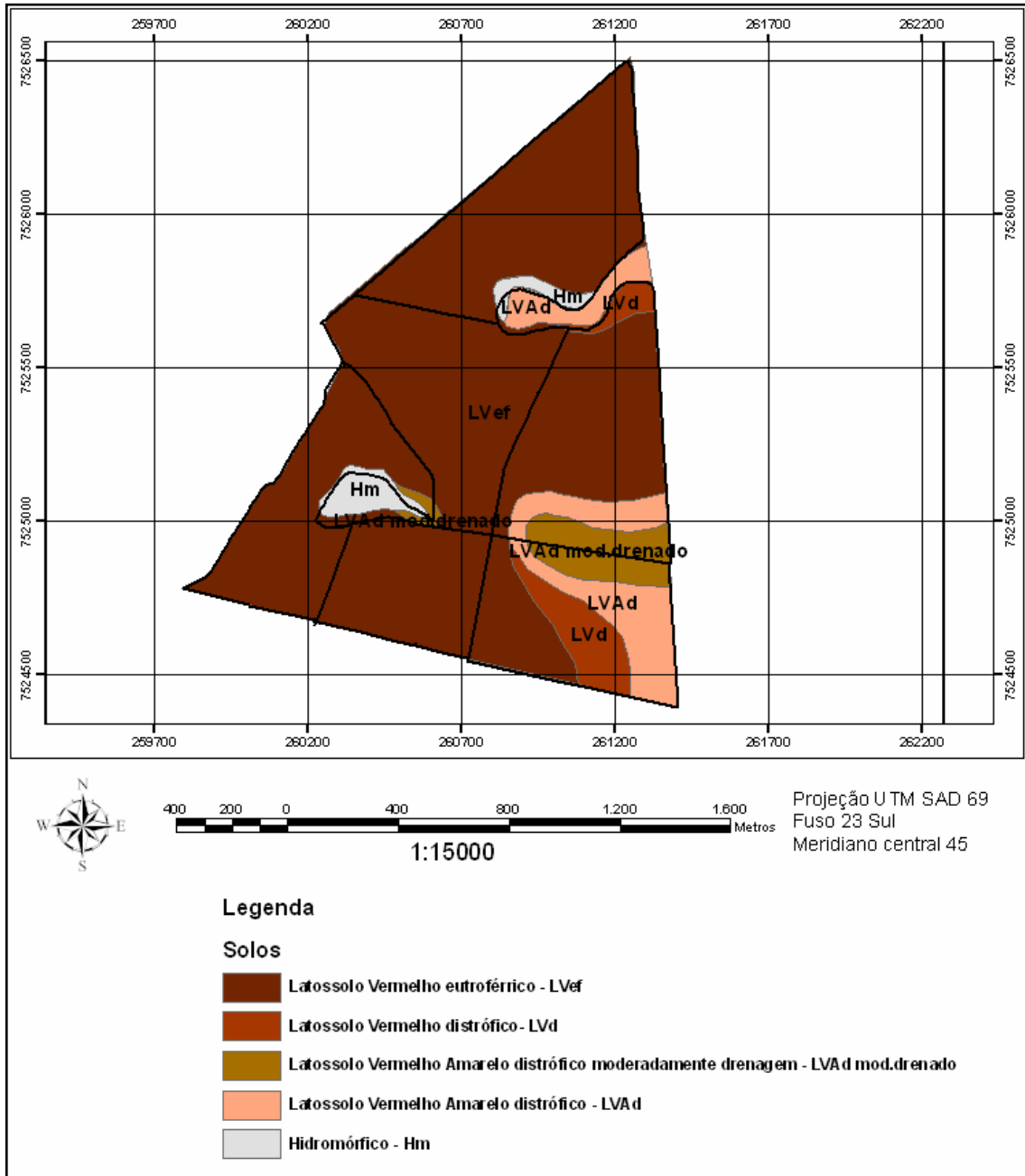


Figura 2. Mapa de solos da fazenda Santo Antônio da Usina São João em Araras/SP. Levantamento no nível de semi-detalhe e escala 1:20.000.

Fonte: COPERSUCAR (1997).

Os dados de plantio e de colheita realizados na área pela usina nas safras 1997-1998, 1998-1999 e 1999-2000 estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados cadastrais dos talhões estudados.

	1997-1998	1998-1999	1999-2000
Tipo de corte	Queimada Mecanizada	Crua Mecanizada	Crua Mecanizada
Estágio de corte	Cana de ano	Segundo corte	Terceiro corte
Data do corte	27/06 e 03/09	04/05 e 26/05	14/06
Área total (ha)	27,98	26,47	26,47
Ton. Colhida	2558	2843	2415
Ton. Analisada	533	784	503
Prod. Ton./ha	91	108	91

Fonte: USINA SÃO JOÃO (1999).

Como a área de estudo consiste de um talhão com 27 ha, uma área extensa para os padrões de áreas experimentais, houve a necessidade de estabelecimento de uma grade amostral, a fim de diminuir o volume de dados e para a obtenção dos dados de campo representativos. A grade amostral selecionada para o trabalho foi a grade alinhada, regular com espaçamento de 50 metros e bordadura de 25 metros em torno dos carregadores.

#### 4.2. COLETA DE DADOS

A área de estudo foi monitorada nove vezes ao longo das safras 2000-2001 e 2001-2002 (Tabela 2), de maneira a representar as três fases básicas de crescimento da cultura e permitir o acompanhamento do desenvolvimento da cultura com dados de sensoriamento remoto, por meio do estudo da correlação de dados agronômicos com dados espectrais.

As três fases nas quais foram obtidos os dados de sensoriamento remoto e parâmetros agronômicos da cultura correspondem às fases básicas de desenvolvimento das culturas em estudos de análise de crescimento. De acordo com MAGALHÃES (1985), as culturas de modo geral possuem três fases de crescimento. A primeira fase corresponde à fase de estabelecimento, que começa logo após a germinação e se estende até que as reservas das sementes se extingam e o sistema radicular e a emergência das folhas se

desenvolvam a ponto de permitir que a planta possa começar os processos anabólicos da fotossíntese. A segunda fase corresponde à fase de desenvolvimento vegetativo, que se traduz por um intenso crescimento vegetativo, estendendo-se até o momento em que a cultura atinja o seu tamanho definitivo. A partir daí, se inicia a última fase do ciclo, que é caracterizada pela estabilização da produção de biomassa vegetal e pelo declínio do metabolismo biológico. A Figura 3 ilustra, com uma curva hipotética, 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 permitiu a coleta de dados em cada uma destas três fases, ao longo dos anos agrícolas 2000-2001 e 2001-2002.

Tabela 2: Datas de coleta e dados coletados.

Data	Radiação direta	Irradiância	Radiância	Landsat	Biomassa	IAF	Perfilhos
22/09/00	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
28/09/00	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
14/10/00	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim
22/10/00	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
30/10/00	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim
03/02/01	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
19/02/01	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
23/03/01	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
08/04/01	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
05/07/01	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
18/07/01	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
25/10/01	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
02/11/01	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
10/03/02	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
11/04/02	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
17/06/02	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
13/08/02	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim

As coletas de dados de campo e a obtenção das imagens Landsat foram realizadas nas seguintes datas e condições da cultura:

- **1ª Coleta de dados** – 28 de setembro, 14 e 30 de outubro de 2000 e 02 de novembro de 2001 - fase de estabelecimento 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). Nessa fase a cultura já cobriu totalmente o solo, passando a resposta espectral a ser resultado predominante da fitomassa, eliminando conseqüentemente grande parte das interferências do solo e da palha deixada na área após a colheita.

- **3ª Coleta de dados** – 18 de julho de 2001 e 13 de agosto de 2002 – fase de maturação da cana, com parada no desenvolvimento vegetativo da cultura e acumulação de açúcar nos colmos.

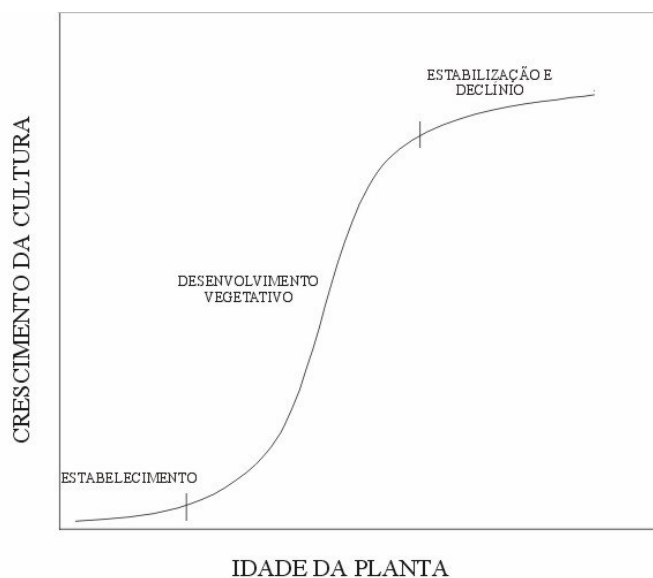


Figura 3. Curva ilustrativa do crescimento sigmoidal de uma cultura agrícola.

Fonte: MAGALHÃES (1985).

Independente da fase de desenvolvimento em que se encontrava a cultura, foi realizada a medição de parâmetros agrônômicos da cultura, tais como o número de

perfilhos por metro (NPM), o índice de área foliar (IAF), a biomassa aérea total (BMT) e o peso de colmos industrializáveis ou produtividade de cana (TCH). As medições radiométricas obtidas em campo também foram realizadas em todas as fases do ciclo da mesma maneira. E, concomitantemente a estas coletas de dados foram adquiridas as imagens de satélite.

Somente na colheita do talhão é que os procedimentos para a obtenção da TCH foram diferenciados. Nessa fase foi realizada a coleta adicional de parcelas de 15 metros por 15 metros de cana-de-açúcar para representar a produção real da célula amostral.

#### 4.2.1. DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

##### 4.2.1.1. Radiometria de campo

Os dados terrestres de sensoriamento remoto foram obtidos com radiometria de campo utilizando dois radiômetros CIMEL CE 313a, descritos na Tabela 3. Pode-se verificar que as bandas do radiômetro coincidem com as existentes nas plataformas orbitais Landsat, permitindo que os dados terrestres sejam extrapolados e comparados com os dados orbitais (MILTON, 1987; NANNI, 2000).

Tabela 3. 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	IVP	B4
F2	648	53	621,5	674,5	Si	V	B3
F3	548	85	505,5	590,5	Si	G	B2
F4	450	40	430,0	470,0	Si	B	B1
F5	1640	165	1557,5	1722,5	Ge		B5
F6	837	91	791,5	882,5	Ge	IVP	B4

Fonte: CIMEL (1998).

Os radiômetros Cimel foram disponibilizados pelo Centro de Pesquisa em Agricultura – CEPAGRI e permitiram um rendimento melhor na coleta de dados, elevando o número de repetições que puderam ser coletadas, evitando-se problemas de variações na

irradiância solar durante o dia, em decorrência das mudanças no ângulo de elevação solar. Por outro lado, criou a necessidade de intercalibração entre os equipamentos e boa sintonia e padronização na coleta de dados.

O radiômetro Cimel é um radiômetro direcional com FOV de 10°, que mede a radiância espectral com sensores de silício (Si) e de germânio (Ge) em cinco bandas espectrais. Em cada uma delas, filtros espectrais determinam a largura e o posicionamento das bandas.

Para o cálculo do Fator de Reflectância foi utilizados a irradiância solar, obtida pelo espectrorradiômetro LI 1800, da Licor. Com o temporizador deste espectrorradiômetro, obtiveram-se medidas da irradiância solar em intervalos de tempo constantes (uma medida a cada cinco minutos), de maneira que se eliminasse a necessidade da utilização da placa de sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ ) dentro da área plantada com a cultura. Este método visou eliminar os problemas operacionais de coleta de dados quando a cana-de-açúcar estava com uma altura que dificultasse o caminhar com equipamentos no interior da cultura. O espectrorradiômetro foi deixado fora da área plantada, em um carreador central ao lado do talhão em estudo. O espectrorradiômetro foi deixado sobre uma escada coletando dados, de maneira a eliminar qualquer interferência de radiância da cultura e de outros alvos nos valores de irradiância solar medidos.

O espectrorradiômetro Li-Cor 1800 possui um sistema de coleta de dados através de um receptor co-seno de radiação, permitindo o monitoramento da irradiância solar em um plano hemisférico ( $180^\circ$ ). Este equipamento também foi calibrado em relação aos dois radiômetros Cimel, de maneira a permitir ajustes nas medidas efetuadas em campo.

Foram realizadas cinco medições radiométricas em cada ponto de amostragem, de acordo com a metodologia proposta por HUETE et al. (1985), de forma que o radiômetro fizesse medições 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 amostrado.

Juntamente com as medidas de radiância da cultura, foi medida a irradiância solar com o espectrorradiômetro Li-Cor LI 1800 usando-se o coletor co-seno, o qual coletou

dados a intervalos constantes. De posse destes dados foi obtido o fator de reflectância (FR), como ilustra a Figura 5.

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:  $\frac{I_o}{I_{r(\text{padrão})}}$ ;

$RS_r$  é o fator de reflectância da placa padrão medido em laboratório.

Em decorrência da utilização de três radiômetros diferentes, a intercalibração é um procedimento imprescindível, e se baseia na metodologia proposta por DUGGIN e CUNIA (1983), na qual os radiômetros Cimel mediram a radiância da placa de sulfato de bário calibrada, enquanto o espectrorradiômetro Li-Cor mediu a irradiância solar incidente simultaneamente às medidas do Cimel, como está ilustrado na Figura 4.

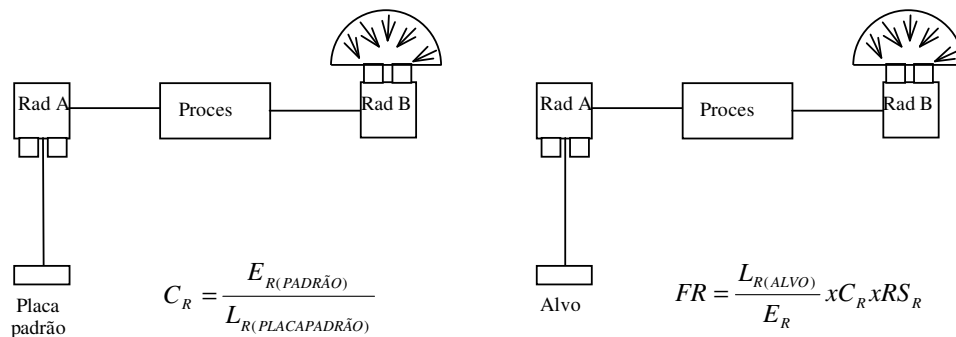


Figura 4. Intercalibração dos radiômetros usando as medidas simultâneas da irradiância de uma placa padrão e a irradiância incidente.

A geometria de aquisição dos dados em campo baseou-se na metodologia preconizada por GARDNER (1983), BAUER et al. (1986) e FORMAGGIO (1989) que sugere a realização de medidas de radiância do alvo com ângulo zenital igual a  $0^\circ$ . Esse ângulo foi obtido através da utilização de um mastro, como ilustra a Figura 6, de maneira que o peso do dispositivo contendo a “cabeça” sensora, o fizesse permanecer verticalmente e assim obter medidas sempre a nadir.



Figura 5. Coleta de dados radiométricos com os radiômetros CIMEL.

A utilização do mastro também permitiu a medição da radiância em alturas superiores a quatro metros, que correspondem à altura do dossel da cana na fase da pré-colheita. As medições foram realizadas direcionando-se o sensor para o Sol, a fim de evitar que a cabeça sensora fizesse sombra sobre o dossel da cultura e sobre a placa de sulfato de bário. As medições radiométricas foram obtidas sempre num período do dia compreendido entre 9:00 hs e 13:00 hs, tentando realizá-las sempre em dias claros, evitando-se dias com cobertura de nuvens, névoa, fumaça e rajadas de vento, fatores estes que poderiam interferir



na irradiância solar (MILTON, 1987). A Figura 6 mostra a localização dos pontos amostrais no mapa da área de estudo.

#### 4.2.1.2. Imagens orbitais

Foram utilizadas cinco imagens orbitais do sensor TM do Landsat-5 e quatro imagens orbitais do sensor ETM+ do Landsat-7, ambas com resolução espacial original de 30 m da órbita/ponto 220/75C, adquiridas no modo de correção 1G, ou seja, correção radiométrica e geométrica associada a um sistema de projeção cartográfica. Outras características básicas das plataformas estão descritas na Tabela 4.

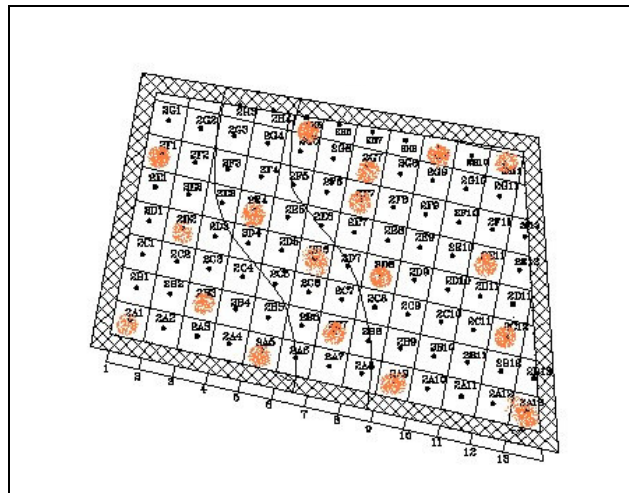


Figura 6. Mapa da grade amostral de radiometria. Os pontos pintados em laranja representam as células onde foram coletados os dados radiométricos.

A aquisição dos dados radiométricos foi realizada nos mesmos dias e horários das passagens dos satélites Landsat 5 e 7, compreendendo também as três épocas do ciclo vegetativo da cultura. Entretanto, não foi possível a coincidência de aquisição dos dados em algumas datas, devido a problemas de cobertura de nuvens (02/11/01), falha na aquisição das imagens por parte da operadora do satélite (03/02/01) e por falhas na aquisição dos dados terrestres (14/10/00) (Tabela 2).

Tabela 4. Características das plataformas Landsat 5 e Landsat 7.

	Landsat 5	Landsat 7
Sensor	TM Tematic Mapper	ETM+ Enhanced Tematic Mapper
Data de lançamento	01 de março 1984	15 de abril de 1999
Tipo de órbita	Quasi-polar, solar-síncrona	Quasi-polar, solar-síncrona
Horário de passagem	09:39	10:00
Banda 1	450 - 520 nm	450 – 520 nm
Banda 2	520 - 600 nm	530 – 610 nm
Banda 3	630 - 690 nm	630 – 690 nm
Banda 4	760 - 900 nm	780 – 900 nm
Banda 5	1.550 – 1.750 nm	1550 - 1750 nm
Banda 6	10.400 - 12.500 nm	10.400 - 12.500 nm
Banda 7	20.080 -20.350 nm	20.090 – 20.350 nm
Banda 8	-----	520 – 900 nm
Resolução Espacial	30 e 120 m	15, 30 e 60 m
Resolução Radiométrica	8 bits (256 níveis)	8 bits (256 níveis)
Resolução Temporal	16 dias	16 dias
Faixa de imageamento	185 km	185 km

Fonte: NASA (2000).

A aquisição dos dados radiométricos foi realizada nos mesmos dias e horários das passagens dos satélites Landsat 5 e 7, compreendendo também as três épocas do ciclo vegetativo da cultura. Entretanto, não foi possível a coincidência de aquisição dos dados em algumas datas, devido a problemas de cobertura de nuvens (02/11/01), falha na aquisição das imagens por parte da operadora do satélite (03/02/01) e por falhas na aquisição dos dados terrestres (14/10/00) (Tabela 2).

Além do pré-processamento, foram realizadas as correções radiométricas e atmosféricas e posterior correção geométrica das imagens. Nas correções radiométricas das imagens orbitais foi utilizado o Sistema de Correção Radiométrica de Imagens de Satélite (SCORADIS), desenvolvido por ZULLO JR. (1994).

O valor da reflectância real dos pixels de uma imagem orbital do sensor ETM+ do Landsat-7 pode ser calculado a partir das seguintes equações descritas por ZULLO JR. (1994) e implementadas no sistema SCORADIS, como sendo:

$$\rho_{alv} = \frac{\rho_{sat} - \rho_{atm} * t_g}{(\rho_{sat} - \rho_{atm} * t_g)s + T(\theta_s)T(\theta_v)t_g} \text{ e } \rho_{sat} = \frac{\pi V}{A_k E_o \cos(\theta_s) D_s}$$

onde:

$t_g$  é o fator de absorção gasosa;

$T(\theta_v)$  é o fator de transmissão atmosférica total no sentido Terra-satélite;

$\theta_v$  é o ângulo de visada do satélite;

$T(\theta_s)$  é o fator de transmissão atmosférica total no sentido Sol-Terra;

$\theta_s$  é o ângulo zenital solar;

$s$  é o albedo esférico da atmosfera (que exprime os pesos das reflexões múltiplas entre a superfície do solo e a atmosfera);

$V$  é o nível de cinza do pixel;

$A_k$  é o coeficiente de calibração do sensor;

$E_o$  é a irradiância solar no topo da atmosfera;

$\theta_s$  é o ângulo zenital solar e

$D_s$  é o coeficiente relacionado com a distância entre a Terra e o Sol.

O sistema SCORADIS é baseado na correção atmosférica realizada pelo Modelo 5S (Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire) desenvolvido por TANRÉ et al. (1990) que exige como parâmetros de entrada dados como localização geográfica (latitude e longitude), data e horário de aquisição da imagem, tipo e quantidade de aerossóis presentes na atmosfera, pressão atmosférica, temperatura e modelo atmosférico dos componentes gasosos (vapor d'água e ozônio). A data e o horário de passagem dos satélites determinam os ângulos de incidência solar e observação pelo satélite. O conteúdo de vapor d'água e a espessura ótica dos aerossóis foram determinados através de medições da radiação solar direta feitas com o fotômetro solar Cimel 317C em cinco bandas do espectro : S1 - 1020 nm ± 5 nm, S2 - 870 nm ± 5 nm, S3 - 670 nm ± 5 nm, S4 - 440 nm ± 5 nm e S5 - 936 nm ± 5 nm (ZULLO JR. e BEZERRA, 1993) (Figura 7).

As medições foram feitas em intervalos constantes de cinco em cinco minutos, das 9h00 às 10h00, nos dias de passagem dos satélites, permitindo a obtenção de um número representativo de pontos que permitisse o ajuste de uma curva de regressão estatística da espessura óptica da atmosfera (TANRÉ et al., 1990). A quantidade de ozônio foi obtida dos dados do satélite Earth Probe TOMS (MCPETERS, 2002) nas datas de passagem do satélite. De posse de todos estes dados, o sistema executa a correção atmosférica das bandas espectrais, gerando como saída do processo valores de reflectância real dos pixels da imagem calculados a partir da seguinte equação descrita por ZULLO JR. (1994):



Figura 7. Obtenção da radiação direta com o radiômetro solar CIMEL-317, durante o período da passagem do satélite.

#### 4.2.2. Variáveis agronômicas

Os dados referentes à cultura foram coletados em datas próximas das passagens do satélite e das coletas de dados radiométricos, obedecendo à mesma grade amostral anteriormente estabelecida para a coleta dos dados de radiometria de campo, caracterizada por 18 *pixels* de 50 m x 50 m, de forma que os dados coletados em um ponto amostral

representassem o *pixel* da grade amostral. A coincidência nos pontos amostrais permitiu que os dados das variáveis agrônômicas pudessem ser correlacionados espacialmente diretamente com os dados de sensoriamento remoto.

Os parâmetros agrônômicos da cultura amostrados foram: o número de perfilhos por metro linear (NPM), o índice de área foliar (IAF), a fitomassa aérea total por hectare (BMT) e a biomassa verde de colmos, que traduz a produtividade agrícola, ou seja, o peso de colmos industrializáveis por hectare (TCH) (GHELLER et al., 1999).

A contagem de número de perfilhos foi efetuada em todas as fases de desenvolvimento da cultura, mesmo naqueles onde ainda não havia a presença de colmos. Nestes casos, o número de perfilhos representa o potencial de produção de colmos e reflete a qualidade do meio físico para o desenvolvimento da cultura. A Figura 8 exemplifica a contagem de perfilhos executada em outubro de 2000 e permite observar que, naquela ocasião, a porcentagem de cobertura do solo ainda era baixa, bem como o IAF, e que a cultura ainda não apresentava colmos. Quando a cultura atinge as fases mais avançadas de desenvolvimento, a contagem passa a ser do número de colmos e não mais de perfilhos (GHELLER et al., 2002).

A coleta de dados de IAF foi realizada utilizando-se medidas indiretas com o equipamento LAI-2000 (LICOR, 1992). O equipamento LAI-2000 utiliza um sensor de luz que mede a radiação difusa, simultaneamente em cinco bandas angulares (0°-13°, 16°-28°, 32°-43°, 47°-58° e 61°-74°). O sensor é constituído de cinco fotodiodos, cujas superfícies ativas estão arranjadas em anéis concêntricos. A imagem desta visão quase-hemisférica, projetada dentro dos anéis, permite, para cada intervalo angular, a medição da radiação na banda e no ângulo zenital conhecido (LI-COR, 1992).



Figura 8. Contagem do número de perfilhos em 2 m lineares de cana-de-açúcar.

A área foliar computada pelo equipamento LAI-2000 é calculada pela soma de logaritmos dos valores de fração de abertura (WELLES e NORMAN, 1991), como sendo:

$$IAF = 2 \sum_{i=1}^5 \frac{-\ln(T_i)}{S_i} W_i ,$$

onde  $T_i$  são as cinco frações de abertura,  $W_i$  são os  $\sin \theta d\theta$  para os cinco ângulos de visada do equipamento e  $S_i = 1/\cos \theta$ .

Para cada ponto amostral, foram obtidas três medidas da radiação difusa incidente sobre o dossel e 12 sob o dossel. Da média das medidas sob o dossel e a média das medidas da radiação incidente resultou no IAF do ponto. Além disto, cada medição foi repetida três vezes, para efeito de repetição e posterior cálculo do valor médio do IAF por ponto amostral (Figura 9).

Em virtude da exigência do equipamento de realizar medições em condições de radiação difusa, as medições de IAF foram realizadas sempre no início da manhã, até às 8:00 h e no fim da tarde, a partir das 17:00 h, períodos em que a inclinação solar proporciona condições de alta radiação difusa e baixa radiação direta.



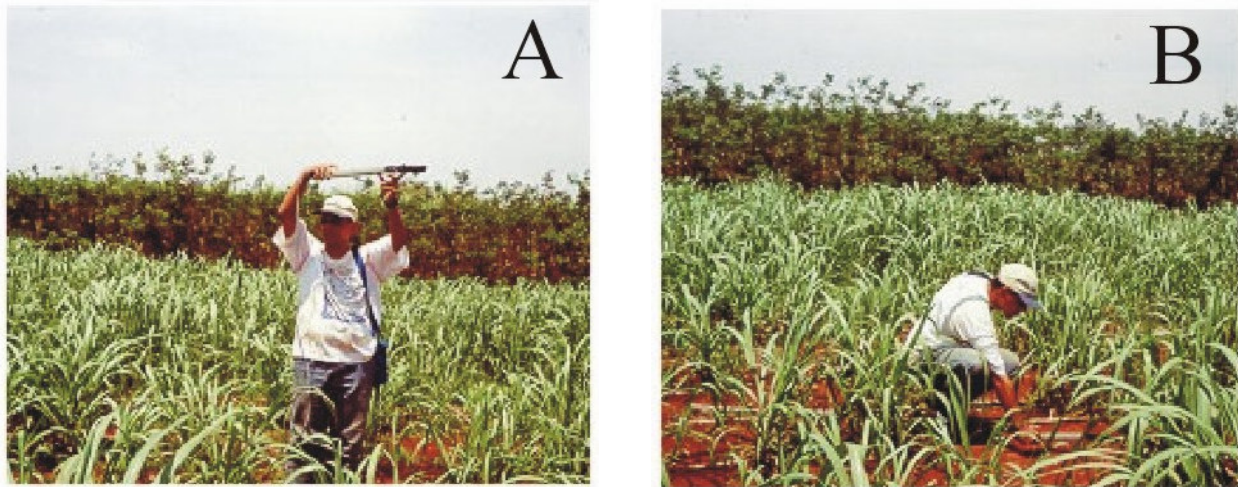


Figura 9. Coleta de dados de IAF utilizando o equipamento LAI 2000. (A) medição da radiação difusa incidente; (B) medição da radiação difusa transmitida pelo dossel.

As coletas da BMT e TCH da cultura nos 18 pontos amostrais foram feitas colhendo-se dois metros lineares de cana-de-açúcar em três linhas adjacentes de cana em cada uma das fases do ciclo de desenvolvimento da cultura. A fitomassa foi dividida em fitomassa aérea (folhas), fitomassa de colmo e fitomassa de palha.

As coletas de dados em julho de 2001 e julho de 2002, que se referiam à colheita das parcelas amostrais, foram feitas em parcelas maiores, na mesma localização das demais amostragens. Durante a colheita mecanizada no talhão não foram colhidos os aceiros de 10 linhas por 15 metros, permanecendo a cana em pé para permitir a coleta dos dados após a colheita (Figura 11). Os aceiros foram colhidos manualmente, de maneira a permitir a separação de folhas, colmo e palha. O peso dos colmos industrializáveis (TCH) foi obtido pesando-se os colmos com um sistema de células de carga/coletor de dados e correntes em uma carregadora de cana-de-açúcar. A Figura 12 mostra como foi realizada a marcação das parcelas dentro da área do canavial e a metodologia para obtenção do peso da parcela.

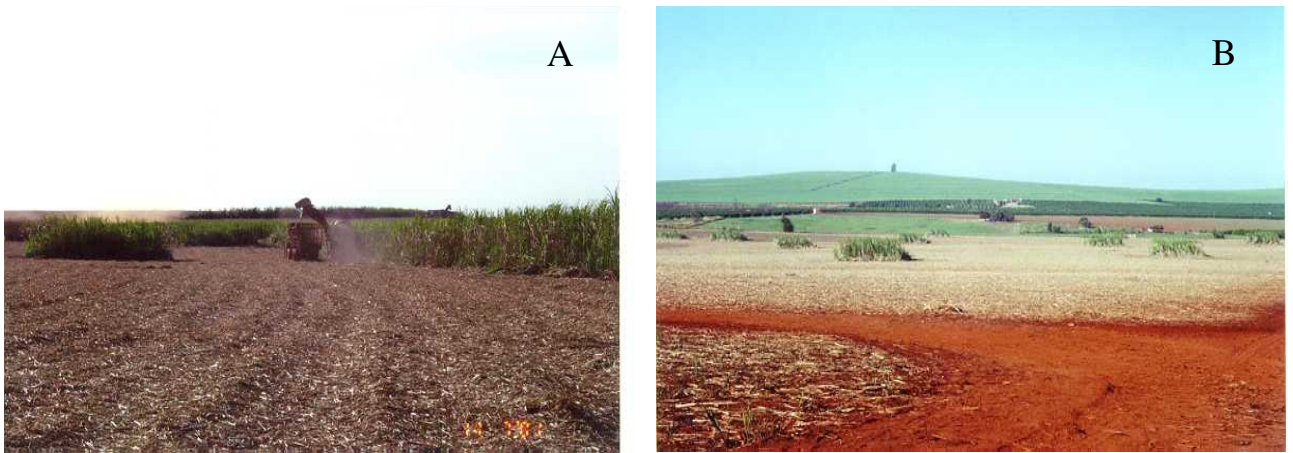


Figura 10. Realização dos aceiros pela colhedora para delimitação das parcelas de 10 linhas de cana por 15 metros (A) e a visão geral da área de estudo com os 18 aceiros (B).



Figura 11. Colheita manual da cana-de-açúcar com separação entre colmos, folhas e palhas (A) e pesagem dos feixes de cana com célula de carga (B).

Os dados meteorológicos foram obtidos diariamente ao longo de toda a safra, permitindo o acompanhamento das variações meteorológicas e contribuindo para o entendimento das relações entre as variáveis espectrais e as variáveis agrônômicas. Os dados foram obtidos na Estação Automática Agrometeorológica da Universidade Federal



de São Carlos - Faculdade de Ciências Agrárias, Campus de Araras, em Araras, SP. A estação está localizada a 611 metros de altitude, 22°18'00"S de latitude e 47°23'03"W de longitude, estando aproximadamente a nove quilômetros ao norte da área de estudo. A estação mede a pluviosidade diária (mm), temperaturas mínima e máxima (°C), umidade relativa do ar (%) e evapotranspiração do tanque Classe A (mm).

#### 4.3. Análise estatística

As variáveis agrônômicas e espectrais foram analisadas inicialmente por meio de gráficos que representassem o desenvolvimento temporal ao longo das duas safras estudadas, com curvas de desenvolvimento das variáveis em relação aos dias após o corte (DAC) (EVENSEN et al., 1997). Os dados de IAF, NPM, TCH, BMT, das bandas espectrais e dos índices espectrais de vegetação foram analisados acumulativamente, a partir dos dados médios dos 18 pontos amostrais do talhão estudado, mostrando os valores obtidos nas nove coletas de dados, permitindo uma visão temporal das mesmas.

Após a análise preliminar do desenvolvimento temporal das variáveis determinou-se quais seriam os modelos matemáticos que melhor explicariam o comportamento das variáveis ao longo do tempo. Os dados médios dos pontos amostrais em cada uma das coletas de campo foram submetidos à regressão linear simples no programa Ajuste desenvolvido por ZULLO e ARRUDA (1986). O programa Ajuste consiste de um sistema computacional que permite a geração de 17 diferentes modelos matemáticos para explicar o comportamento de duas variáveis por meio de regressão linear simples. Como o sistema foi concebido pelos autores para ser empregado em dados experimentais, grande parte dos modelos explicam fenômenos biológicos e ambientais, possuindo, portanto, modelos de forma sigmoideal, exponencial, potência curvilínea e logarítmica. Além do ajustamento de modelos de regressão, o sistema apresenta a análise estatística dos modelos sugeridos, apresentando além do coeficiente de determinação ( $r^2$ ), a significância estatística do modelo por meio do Teste F com probabilidade de 99% ( $p < 1$ ).

O coeficiente de correlação de Pearson foi calculado para analisar a relação entre pares de variáveis agronômicas e espectrais, sugerindo o tipo de relacionamento existente entre as variáveis e o grau de independência entre elas (WOOD et al., 2003). O programa MiniTab13 foi utilizado para calcular o coeficiente de Pearson e apresentar a significância estatística do coeficiente por meio do Teste F (p-valor).

A determinações das equações de ajuste de produtividade (TCH) e de biomassa aérea total (BMT) foi realizada usando-se a técnica do *Stepwise* no programa computacional MiniTab 13. O método do *Stepwise* empregado foi o *forward* de colocação sequencial de variáveis. Os critérios de exclusão de uma variável ou de um coeficiente foram obtidos pelo teste de significância (Teste F), pelo valor F de probabilidade, pela correlação entre as variáveis independentes e pela normalidade dos resíduos. A avaliação final comparativa de todas as equações de regressão para estimar a TCH e BMT foi feita com base no coeficiente de determinação ( $r^2$ ), no erro padrão da estimativa em percentagem (Er%), no Teste F, no teste de comparação entre os coeficientes de correlação e na significância dos coeficientes da equação.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e sua discussão são apresentados na forma de três trabalhos científicos. A formatação dos três trabalhos difere ligeiramente do restante da tese, em virtude de o texto estar sendo apresentado nas normas da Revista Scientia Agrícola. Além disto, cada trabalho possui sua introdução, seu material e métodos, seu resultado e discussão, sua conclusão e suas referências bibliográficas.

### 5.1. RELAÇÃO ENTRE INDICADORES DE CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR.

#### 5.1.1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da evolução temporal do crescimento das culturas agrícolas e do seu ciclo produtivo é informação inicial e imprescindível para estudos de sensoriamento remoto, modelagem agroclimatológica da produção e previsão de safra (RUDORFF et al., 1990).

Em cada fase do desenvolvimento das culturas, as variáveis agronômicas se modificam e, por consequência, determinam o comportamento espectral da cultura, ajudam a entender a influência dos parâmetros meteorológicos na produção, interferem no planejamento agrícola e determinam a magnitude do estresse fisiológico e os valores da produtividade final (PELLEGRINO, 2001; TERUEL, 1995; MIOCQUE, 1999). De acordo com MAGALHÃES (1985), a análise do crescimento de uma cultura baseia-se na medida sequencial da acumulação da fitomassa, de variáveis biofísicas e agronômicas, como o índice de área foliar (*IAF*), e taxa de produção de matéria seca e matéria verde, para a geração da curva de desenvolvimento da cultura ao longo do ciclo. De acordo com o autor, a curva de desenvolvimento da biomassa, para a maior parte das culturas agrícolas, deve ter forma sigmoideal, apresentando três fases distintas.

No caso específico da cana-de-açúcar, alguns estudos de análise do crescimento da cultura foram desenvolvidos, visando a diversas aplicações, como manejo da adubação (GAVA, 1999), manejo de irrigação (TERUEL, 1995), modelos de crescimento (MACHADO, 1981; MACHADO et al., 1982; MUCHOW et al., 1994), sensoriamento

remoto e previsão de safra (PELLEGRINO, 2001). Contudo, ainda é necessário o aprofundamento dos estudos a fim de obter informações mais detalhadas da evolução da cultura e da relação de variáveis agronômicas, como o número de plantas por metro (*NPM*), o *IAF*, e produtividade agrícola, ou seja, massa de colmos industrializáveis de cana-de-açúcar por hectare (*TCH*). Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivos a geração de informações para a descrição do crescimento da cana-de-açúcar e a compreensão da evolução da biomassa aérea total da cultura (*BMT*), do *IAF*, do *NPM* e da produtividade, (*TCH*) para aplicações em trabalhos de previsão de safra.

### 5.1.2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em um talhão comercial de 27 hectares localizado no município de Araras, SP, na latitude 47°19'01''S a 47°19'30''S e longitude 22°21'45''O a 22°22'17''O, com a variedade SP80-1842, plantada em 06/11/1997. O histórico da área está apresentado na Tabela 5. A variedade é caracterizada como precoce, de perfilhamento médio, com colmos de crescimento vigoroso, folhas de largura média, comprimento longo, de baixa exigência em fertilidade de solo e que apresenta produtividade superior nas soqueiras quando comparada com a cana de primeiro corte (cana planta) (COPERSUCAR, 1993).

Tabela 5 - Histórico e descrição do talhão de estudo.

Safra	1998	1999	2000	2001	2002
Data do corte	27/06 e 03/09	04/05 e 26/05	14/06	11/07	22/07
Estágio de corte	Cana de ano	Segundo corte	Terceiro corte	Quarto corte	Quinto Corte
Tipo de corte	Mecânica queimada	Mecânica queimada	Mecânica crua	Mecânica crua	Mecânica crua
Área total (ha)	27,98	26,47	26,47	26,47	26,47
Produção (Mg)	2.558	2.844	2.415	1.960	1.913
TCH média (Mg ha <sup>-1</sup> )	91,4	107,4	91,2	74,0	72,3

Fonte: USINA SÃO JOÃO (2002).

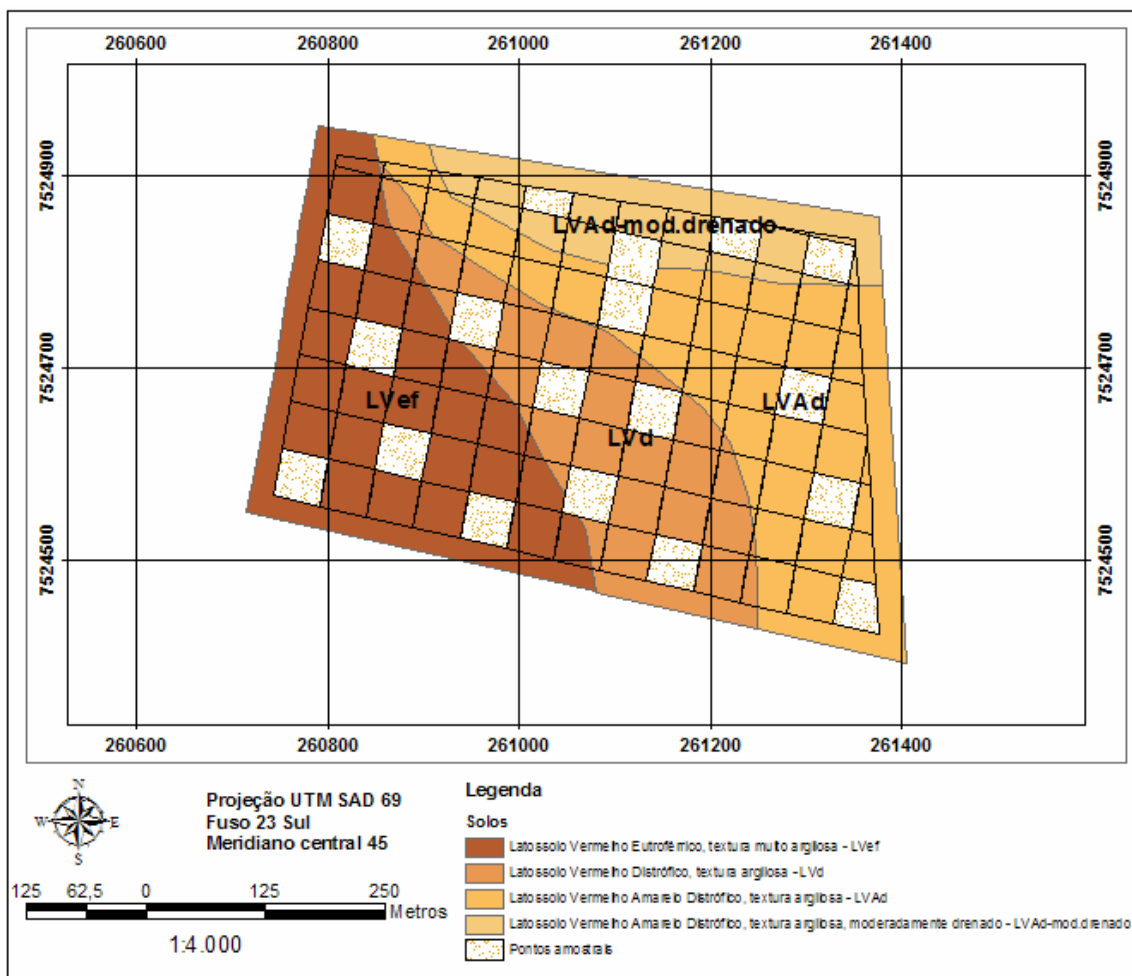


Figura 12 - Mapa de solos e distribuição dos pontos amostrais.

Os solos predominantes são LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico textura muito argilosa (LVef), LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, textura argilosa (LVd), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, textura argilosa (LVAd), sendo que, nesta classe, há uma área com drenagem moderada, como está apresentado na Figura 12 (EMBRAPA, 1999). A declividade da área não ultrapassa 12%, valor limite para colheita mecanizada sem queima, de acordo com os dados da Carta 1:10.000 Araras II (IGC, 1979). A área de estudo é identificada por OLIVEIRA et al. (1982), segundo o sistema Köppen, com um clima do tipo CWa, ou seja, clima mesotérmico de inverno seco.

Durante as safras 2000-2001 e 2001-2002, o ciclo vegetativo da cana-de-açúcar foi monitorado nas três principais fases de desenvolvimento da cultura, de acordo com MAGALHÃES (1985), com oito campanhas de campo nas seguintes datas: primeira coleta de dados – 11 de outubro de 2000 e 17 de outubro de 2001, segunda coleta de dados – 03 de fevereiro e 08 de abril de 2001, 05 de dezembro e 11 de maio de 2002, terceira coleta de dados – 18 de julho de 2001 e 01 de agosto de 2002.

Os pontos amostrais para a coleta das variáveis agronômicas foram distribuídos em uma amostragem estratificada que levou em conta o tipo de solo, totalizando 18 pontos amostrais, onde em cada ponto foram coletados dois metros lineares de cana-de-açúcar em três linhas para a estimativa da *BMT*, da *TCH* e do *NPM*. A Figura 1 ilustra a localização dos pontos amostrais e o tipo de amostragem efetuada na área de estudo.

As estimativas da produção de biomassa e da produtividade podem ser feitas por meio de medições de componentes da cultura. O número de plantas e o peso de colmos representam os principais componentes da cultura possíveis de serem medidos e com boa correlação com a produtividade, de acordo com YATES (1969) e GHELLER et al. (1999). A estimativa de produção da biomassa e da produtividade foi feita analisando separadamente a fitomassa aérea (folhas), a fitomassa de colmo e a fitomassa de palha em cada um dos pontos amostrais (PELLEGRINO, 2001), sempre trabalhando com dados de massa fresca ou verde. As variações do teor de água dos colmos são extremamente baixas. Para as folhas a variação é maior, devido à maior resposta das folhas à falta de água e às diferenças no número de folhas por planta (PRIMAVESI et al., 1988). Embora estes efeitos possam introduzir vieses de interpretação, como o objetivo era trabalhar com dados proveniente de talhões comerciais iguais aos usados normalmente nas usinas, o emprego de dados de massa seca não foi incluído neste estudo.

O *IAF* é um parâmetro biofísico que pode contribuir nas estimativas de produtividade das culturas (TERUEL, 1995). A coleta de dados de *IAF* foi feita usando medidas indiretas com o equipamento LAI-2000, que estima o *IAF* pela medida da radiação difusa em cinco bandas angulares (LI-COR, 1992). Em cada ponto amostral, foi feita uma medida da radiação difusa incidente sobre o dossel e quatro sob o dossel; a média destas

medidas é o *IAF* do ponto. Além disto, cada medida foi repetida três vezes, para efeito de repetição e posterior cálculo do valor médio do *IAF* do ponto.

Para a análise do crescimento da cana-de-açúcar nas duas safras, buscou-se o ajustamento de curvas que descrevessem o acúmulo da *BMT* e da *TCH* em toneladas por hectare ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), do *NPM* (número de plantas por metro linear de cana-de-açúcar) e do *IAF* ao longo da safra ou em relação aos dias após o corte (*DAC*). Os resultados também foram avaliados em relação às fases fisiológicas da cultura, para a verificação da concordância com a evolução da cultura e dados de campo. Com base nos dados médios do talhão foram realizadas análises de regressão para o ajuste de curvas, usando o programa Ajuste (ZULLO JR. e ARRUDA, 1986) para os dados de biomassa, produtividade, número de plantas e *IAF* das duas safras conjuntamente.

O estudo da relação entre as variáveis agrônômicas medidas (*NPM*, *IAF*) e a *TCH* e a *BMT* foi estudada por meio de regressão linear múltipla, usando Stepwise do programa computacional MiniTab 13 para Windows. As regressões foram geradas para as três fases do ciclo de crescimento da cultura, estabelecimento, desenvolvimento vegetativo e estabilização/maturação, relacionando *BMT* e *TCH* com o *NPM* e o *IAF* nas duas safras estudadas. Desta forma, os dados foram subdivididos em estabelecimento, desenvolvimento vegetativo e maturação, para a geração de regressões múltiplas com os dados das duas safras conjuntamente, a fim de aumentar o volume de dados e os graus de liberdade das regressões. Obteve-se um total de nove modelos de regressão, representando a fase de estabelecimento, a de desenvolvimento vegetativo e de maturação, as fases estabelecimento e desenvolvimento vegetativo juntas e do ciclo todo, com dados das três épocas.

Para cada modelo foi feita a análise da porcentagem de eficácia do modelo por meio do indicador  $r^2$  e da significância do modelo usando-se Análise de Variância (ANOVA) para a determinar a aceitação ou não dos modelos propostos.

### 5.1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados médios de *BMT*, de *TCH*, de *NPM* e do *IAF* do talhão, em cada uma das safras, mostram os mesmos comportamentos nas duas safras (Tabela 6 e Figura 13) e similares aos obtidos por ROBERTSON et al. (1996). O *IAF* foi a única variável que

apresentou um comportamento diferenciado entre as duas safras. Na segunda safra, o *IAF* mostrou uma queda acentuada nos valores médios das fases do crescimento da cultura, alterando a forma da curva de desenvolvimento temporal e mudando o patamar de seu valor máximo. Estas diferenças podem estar associadas à situação da cultura, quando foi verificado alto índice de tombamento, dificultando e interferindo nas medidas de *IAF*, por exposição dos colmos e diminuição da quantidade de folhas visíveis às medições realizadas com o LAI 2000.

O *IAF* teve um comportamento de crescimento lento na fase inicial do ciclo, seguido de uma fase de crescimento rápido nas duas safras (Figura 13). Após esta fase, o crescimento do *IAF* começou a diminuir, atingindo a estabilidade, para finalmente iniciar a fase de decréscimo em seus valores. Na fase de estabilização, ainda que a biomassa da cultura aumente, o *IAF* já atingiu seu valor máximo e pára de aumentar. Este comportamento foi similar ao encontrado por TERUEL (1995) e PELLEGRINO (2001), mostrando que, mesmo com a diminuição do *NPM*, o índice de área foliar permanece crescendo até a fase de maturação da cultura.

Tabela 6 - Caracterização da variedade SP80-1842, 4<sup>o</sup> e 5<sup>o</sup> cortes, na região de Araras/SP nas safras 2000/2001 e 2001/2002.

Data	DAC	Fase do ciclo	Altura (m)	NPM	CV%	IAF	CV%	TCH (Mg ha <sup>-1</sup> )	CV%	BMT (Mg ha <sup>-1</sup> )	CV%
11/10/00	118	Estabelecimento	0,80	24,96	10,6	0,92	54,2				
03/02/01	233	Des.vegetativo	1,80	16,80	9,5	3,34	20,3	58,63	6,4	78,28	5,4
08/04/01	297	Des.vegetativo	3,20	14,45	11,1	3,38	30,3	67,40	4,2	86,11	3,6
18/07/01	398	Maturação	3,50	10,79	11,2	1,47	67,4	92,77	4,4	108,28	4,3
17/10/01	91	Estabelecimento	0,60	21,79	12,7	1,02	44,8	13,11	13,4	13,11	19,0
05/12/01	140	Des.vegetativo	2,00	23,57	7,9	2,06	36,4	25,13*	9,0	25,13*	12,8
11/05/02	297	Des.vegetativo	2,80	14,80	11,9	1,88	39,5	33,78**	7,0	33,78**	7,0
01/08/02	379	Maturação	3,20	10,23	13,7	1,56	38,4	88,63	4,9	111,63	4,1

\*Biomassa aos 97 dias após o corte. \*\*Biomassa aos 130 dias após o corte.

NPM-número de plantas por metro, IAF-índice de área foliar, TCH-productividade e BMT-biomassa total da cultura.



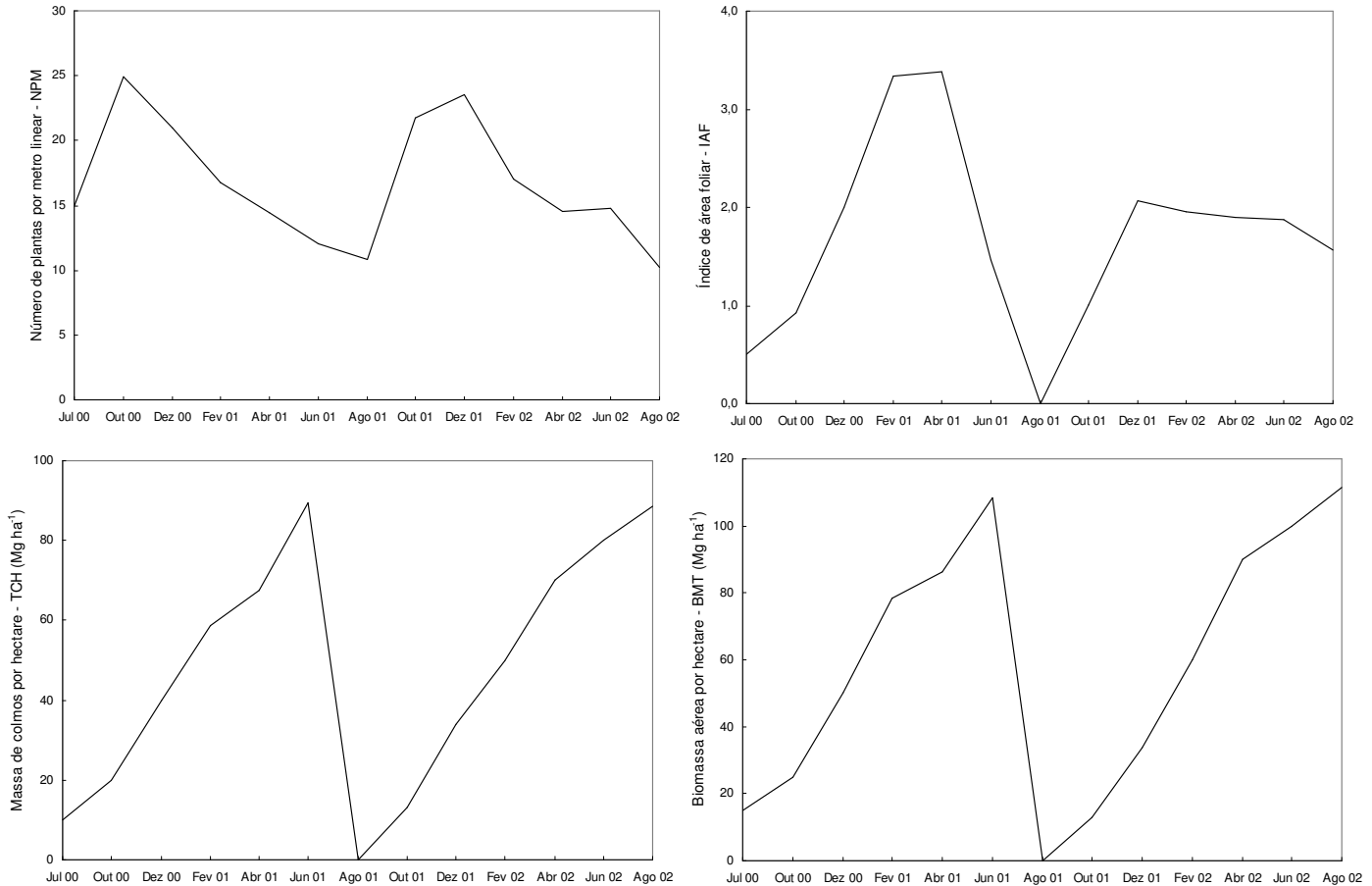


Figura 13 - Evolução temporal do índice de área foliar (*IAF*) (A), do número de plantas por metro (*NPM*) (B), produtividade agrícola (*TCH*) (C) e da biomassa total (*BMT*) (D) (dados médios de 18 amostras) da variedade SP80-1842 nas safras 2000/2001 e 2001/2002.

O *NPM* possui evolução bastante singular caracterizada por um valor elevado na fase inicial de desenvolvimento, fase conhecida por perfilhamento. Com o desenvolvimento da cultura, os perfilhos primários e secundários dominam o espaço aéreo, causando a morte dos perfilhos que nascem depois, levando à diminuição e à estabilização do número de plantas por metro, em aproximadamente 10 plantas por metro (PRIMAVESI et al., 1988).

Comparando os valores médios de produtividade agrícola (*TCH*) da área de estudo usando os 18 pontos amostrais (Tabela 6) e a média de produção do talhão obtida pela usina, por meio do peso da produção total do talhão medido na balança da usina dividida pela área de colheita (Tabela 5), houve diferença nos valores de produtividade. Provavelmente, o método amostral superestimou a produtividade, devido à baixa

representatividade, o pequeno tamanho das amostras e sua má localização dentro do talhão. A alta variabilidade verificada entre as amostras dentro do talhão, expressa pelo coeficiente de variação (CV%), apresentado na Tabela 6, mostram tanto a alta variabilidade espacial das variáveis estudadas, quanto a necessidade de uma amostragem mais precisa para estimar os dados. Também se junta a isto o fato de o modelo Gompertz ter superestimado a *BMT* e a *TCH*, como mostra a Figura 14. Por outro lado, no cálculo de produtividade feito pela usina, algumas áreas queimadas acidentalmente foram levadas em conta na área total de colheita, diminuindo a produtividade média do talhão e contribuindo para a diferença entre os valores médios obtidos pela usina e pela amostragem realizada.

Os resultados de acumulação da *BMT* nas duas safras ajustados em função dos *DAC* estão apresentados na Figura 14. A acumulação da *BMT* em todo o talhão teve o comportamento descrito por MAGALHÃES (1985) e também obtido por MUCHOW et al., (1994), GAVA (1999) e PELLEGRINO (2001) para a cultura da cana-de-açúcar. O comportamento se caracteriza por uma fase inicial de crescimento lento e baixa acumulação de biomassa, sendo que a assimilação de fotossintetizados é dirigida para o perfilhamento da cana, produzindo grande número de plantas por metro, que podem ser verificados na análise dos dados de número de plantas por metro linear (Figura 14). A segunda fase caracteriza-se por um intenso crescimento vegetativo, expresso pelo aumento do índice de área foliar, da biomassa aérea e do peso dos perfilhos (colmos). A fase final é identificada na análise temporal como sendo a fase em que a cana-de-açúcar deixa de aumentar a biomassa e entra na fase de maturação. Este comportamento pode ser verificado pela diminuição do *IAF*, do número de colmos por metro e pelo aumento da biomassa de colmos e queda da biomassa foliar.

O modelo que melhor se ajustou à *BMT* foi o modelo Gompertz, modelo sigmoidal, que permite representar bem a fase assintótica característica do final do ciclo da cultura, um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,90, com significância estatística a 1% (Teste F). O mesmo não ocorreu para outros modelos como o cúbico e o logístico que, embora tenham apresentado altos coeficientes de determinação ( $r^2$ ), não mostraram significância estatística ao nível 1% no Teste F, deixando claro que embora, a curva se apresente bem ajustada aos pontos amostrados, o comportamento médio da *BMT* não pode ser explicado por estas

curvas. Ainda que o ajustamento tenha obtido alto coeficiente de determinação, o modelo Gompertz superestimou os dados medidos de *BMT*, mostrando um crescimento mais acelerado nas fases de desenvolvimento vegetativo (Figura 14D). Na fase inicial e final do ciclo de desenvolvimento, o modelo Gompertz praticamente não subestimou os valores medidos em campo, mostrando estar mais bem ajustado a estas fases do ciclo do que à fase de desenvolvimento da cultura.

A curva Gompertz foi a que apresentou o melhor ajuste para a *TCH*, com  $r^2$  de 0,96 e significância estatística (Figura 14C). A análise da divergência entre os valores medidos e os valores estimados pelo modelo (Figura 14C) mostram que o modelo Gompertz fornece excelente explicação do comportamento e acerto na estimativa de produtividade da cana-de-açúcar, abrindo a possibilidade de utilização deste tipo de modelo em estudos de predição e previsão de produtividade da cana-de-açúcar.

Em virtude do comportamento temporal irregular do *NPM* em relação às outras variáveis estudadas, o modelo que melhor se ajustou foi o modelo Exponencial Cúbico, por contemplar as diferenças do parâmetro nas fases de desenvolvimento e por modelar a fase final de estabilização do número de plantas por metro.

O parâmetro *IAF* foi o que teve o pior ajuste entre todas as variáveis estudadas. O modelo que melhor se ajustou, apresentando coerência com o desenvolvimento fisiológico da cultura, foi o modelo Exponencial Quadrático. Embora este modelo represente as fases de rápido aumento do *IAF* no início do ciclo da cultura, estabilização e ligeira queda na fase de maturação, em decorrência dos dados coletados, o modelo exagerou a queda do *IAF* no final do ciclo da cultura, criando um comportamento distorcido em relação ao que MACHADO (1981) observou em seus estudos. As possíveis razões podem ser, como já comentado, o elevado índice de acamamento da cana-de-açúcar verificado na área no fim da segunda safra, contribuindo para a diminuição dos valores de *IAF* no fim do ciclo e para o comportamento distorcido apresentado pela curva. Além disto, os dados de *IAF* tiveram elevados valores de coeficiente de variação, mostrando que a coleta de dados pode ter sido influenciada por outros fatores, como a altura do dossel e a quantidade de radiação solar difusa, parâmetros levantados por XAVIER e VETORAZZI (2003b) como causadores de problemas nas estimativas de *IAF* usando LAI 2000.

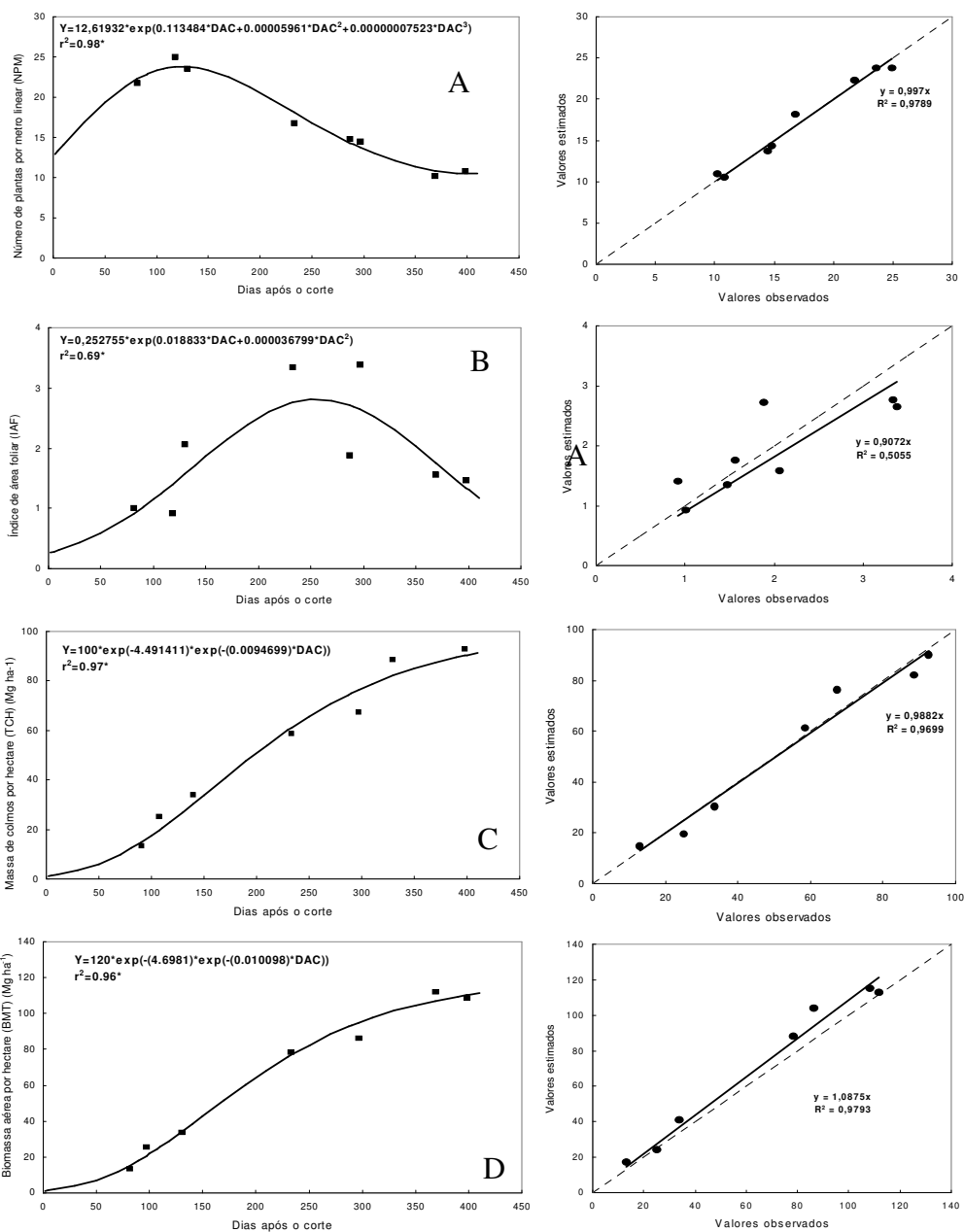


Figura 14 - Modelo Exponencial Cúbico ajustado para o *NPM* (A), Modelo Exponencial Quadrático ajustado para o *IAF* (B) e Modelos Gompertz ajustados para *TCH* (C) e *BMT* (D), obtidos para as safras 2000/2001 e 2001/2002. Relação entre valores observados em campo e valores estimados com os modelos empíricos.\* significância a 1% (Teste F).

Os modelos resultantes das regressões múltiplas usando Stepwise para as fases de estabelecimento, desenvolvimento vegetativo e maturação do ciclo da cultura nas duas safras estudadas estão apresentados na Tabela 3, onde a coluna Fenologia refere-se à fase do ciclo dos dados usados para a geração das regressões, a coluna Modelo apresenta os modelos obtidos, a coluna **n** refere-se ao número de amostras empregadas na regressão e a coluna **r<sup>2</sup>** aos valores do coeficiente de determinação obtidos pelos modelos.

Tabela 7 - Modelos de regressão múltipla obtidos com dados das duas safras estudadas.

<b>Fenologia</b>	<b>Modelo</b>	<b>N</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
Estabelecimento	$BMT = 15,2 * IAF$	36	0,88*
Des. Vegetativo	$TCH = 18,1 * IAF$	22	0,96*
Des. Vegetativo	$BMT = 24,3 * IAF$	23	0,96*
Maturação	$TCH = 8,32 * NPM$	29	0,97*
Maturação	$BMT = 8,64 * NPM + 11,1 * IAF$	28	0,98*
E + DV	$TCH = 34,44 \ln(IAF) + 15,473$	58	0,71*
E + DV	$BMT = 0,500 * NPM + 25,1 * IAF$	59	0,93*
E+DV+M	$TCH = 21,8 * IAF$	80	0,76*
E+DV+M	$BMT = 28,0 * IAF$	84	0,72*

E – Estabelecimento, DV – Desenvolvimento Vegetativo, M - Maturação

\* significância ao nível de 1% (Teste F)

Pela análise dos modelos é possível verificar que os modelos sempre tiveram **r<sup>2</sup>** com valores acima 0,7, portanto, com bom ajustamento. O método Stepwise sugeriu, algumas vezes, a retirada de uma das variáveis dos modelos, transformando sete regressões múltiplas em regressões lineares simples.

Analisando-se os modelos obtidos nas fases inicial e intermediária de desenvolvimento, verifica-se que o fator com maior influência na **BMT** é o **IAF** (dossel foliar), sendo estatisticamente desprezível a contribuição do **NPM**. Na fase inicial, como ainda não há formação de colmos, a **BMT** é igual a **TCH** e, desta forma, foi gerado apenas um modelo para esta fase. É compreensível que a **BMT** e a **TCH** dependam fortemente do volume de folhas e menos do número de plantas nesta fase do ciclo da cultura, já que o volume de folhas pode compensar o menor número de plantas e aproveitar melhor o espaço aéreo (PRIMAVESI et al., 1988). A possível explicação para a não significância do **NPM**,

talvez seja a alta variabilidade encontrada nesta variável nas fases de estabelecimento e desenvolvimento, quando a cultura se encontra com intenso perfilhamento. O comportamento temporal da *NPM*, que decresce com o desenvolvimento da cultura e, portanto, tem um comportamento inversamente proporcional ao crescimento da *BMT* e da *TCH*, também pode ser outra possível explicação para a ausência de correlação com a *BMT*.

O ajuste de modelos lineares para o comportamento da *TCH* e da *BMT* em relação ao *IAF* na fase inicial do ciclo, sugere que estes dados, quando analisados separadamente, tenham uma relação linear, fato também observado na análise temporal da acumulação das variáveis apresentadas na Figura 14, onde a acumulação temporal da *TCH* e da *BMT* apresenta um comportamento linear de aumento.

Na fase final de desenvolvimento, o *NPM* passou a ter relevância tanto na explicação da *BMT* quanto da *TCH*. Nesta fase, a *BMT* e *TCH* estão intimamente relacionadas com o *NPM*, já que a produção de cana-de-açúcar é função do número de plantas por metro e do peso individual de cada colmo, como citado por PRIMAVESI et al., (1988), estando este comportamento dentro do esperado. Juntamente com a alta correlação da *TCH* com o *NPM*, os valores de *IAF* sofrem uma queda acentuada nesta fase, diminuindo também sua importância na regressão (TERUEL, 1995).

As regressões, usando os dados da fase de estabelecimento e da fase de desenvolvimento vegetativo conjuntamente, mostraram uma relação exponencial entre o *IAF* e *TCH*, como a relação encontrada por PELLEGRINO (2001). Esta relação mostrou melhor ajuste pelo fato de representar a fase em que, mesmo aumentando o *IAF*, a biomassa e a produtividade não aumentam mais, fato não observado nos modelos lineares. No caso da *BMT*, a regressão mostrou dependência tanto do *IAF* quanto da *NPM*, sugerindo que, nestas duas épocas, a *BMT* é função tanto do *IAF* quanto da *NPM*, mesmo que nas fases de estabelecimento e de desenvolvimento vegetativo, estudadas separadamente, não haja relação significativa com o *NPM*. Assim, o desenvolvimento de modelos de estimativa de biomassa ou produtividade pode ser melhorado com o emprego de mais de uma época do desenvolvimento da cultura.

No estudo dos dados de todo o ciclo e das duas safras estudadas, as relações mostraram-se com menores valores de  $r^2$  e relações de menor significância que as

encontradas para os estudos das três fases separadamente e para as duas primeiras fases conjuntamente. Isto pode estar relacionado à queda acentuada do *NPM* e do *IAF* no fim do ciclo, comprometendo a correlação considerando o ciclo todo. Além disto, os dados de fim de ciclo foram os que apresentaram a maior variabilidade, também contribuindo negativamente para o ajuste das curvas. Mas, ainda assim, os modelos obtidos considerando todos os dados coletados, mostraram correlação com a variável *IAF* e excluíram do modelo a variável *NPM*, com  $r^2$  de 0,76 para a *TCH* e 0,72 para a *BMT*.

#### 5.1.4. CONCLUSÕES

As curvas de forma sigmoidal foram as que melhor ajustaram o crescimento da biomassa total (*BMT*) e da produtividade (*TCH*) da cana-de-açúcar em relação ao número de dias após o corte (*DAC*). Os modelos exponencial cúbico e exponencial quadrático foram os que melhor se ajustaram ao desenvolvimento do número de plantas por metro (*NPM*) e do índice de área foliar (*IAF*).

A *TCH* e *BMT* foram mais influenciadas pelo *IAF* que pelo *NPM* na fase de estabelecimento e de desenvolvimento vegetativo. Já na fase de maturação, a *TCH* foi influenciada basicamente pelo *NPM*.

O emprego de modelos de regressão para a estimativa de biomassa e produtividade da cana-de-açúcar usando variáveis agronômicas, como o *IAF* e o *NPM*, ainda precisa ser melhorado com a introdução de outras variáveis derivadas, por exemplo, de dados de sensoriamento remoto e de solos, melhorando a possibilidade de sua utilização em trabalhos de previsão de safras.

## 5.2. RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS ESPECTRAIS E INDICADORES DE DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR

### 5.2.1. INTRODUÇÃO

Embora com grande potencial de utilização na cultura da cana-de-açúcar, o sensoriamento remoto tem apenas alguns trabalhos com a cultura como objetivo de estudo. Alguns exemplos são: RUDORFF (1985), RUDORFF e BATISTA (1990), JOAQUIM (1998), PELLEGRINO (2001) e FORTES (2004). Por isto, ainda permanece uma carência de estudos do seu comportamento espectral usando radiometria de campo, base para estudos de sensoriamento remoto orbital, provavelmente em virtude das dificuldades de coleta de dados em uma cultura de grande porte e do seu longo período de crescimento.

Índices de vegetação espectrais (IVs), como o índice de vegetação da razão (*RVI*), o índice de vegetação por diferença normalizada (*NDVI*) e o índice de vegetação ajustado ao solo (*SAVI*), podem realçar as diferenças espectrais entre bandas espectrais e permitir a inferência das condições de vigor e de produtividade da vegetação (WIEGAND et al., 1991; JACKSON e HUETE, 1991). Diversos autores compararam esses índices e mostraram variações na sensibilidade da quantidade de vegetação das diferentes fases de desenvolvimento das culturas (HUETE, 1988). Estes resultados mostram que, dependendo da fase do ciclo em que se encontra a cultura, existirá um índice de vegetação mais adequado para estudos do ciclo de crescimento e com maior relação à biomassa da cultura, havendo a necessidade de avaliar o melhor índice para cada fase do ciclo e para as diferentes culturas. Os índices possuem alta correlação com parâmetros associados ao desenvolvimento e à produtividade das plantas, tais como densidade de vegetação e cobertura e biomassa foliar verde (TUCKER, 1979) e índice de área foliar (WIEGAND et al., 1991). Desta forma, espera-se que esses índices possam contribuir nos estudos de monitoramento do desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar e nos estudos de estimativa de produção, devido à relação destes com a produtividade.



Neste trabalho, buscou-se avaliar os IVs para o monitoramento do crescimento da biomassa e da produtividade e testar as relações entre os dados espectrais e a produtividade da cana-de-açúcar, com vistas ao emprego desta técnica na previsão da produção da cultura.

### 5.2.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em uma área comercial de cana-de-açúcar, localizada no município de Araras, SP, entre as longitudes 47°19'01"O e 47°19'30"O e as latitudes 22°21'45"S e 22°22'17"S (Figura 15), plantada com a variedade SP80-1842, no quarto e quinto cortes sob o sistema de colheita mecanizada sem queima (Copersucar, 1993) e cultivada em três classes de solos: LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico textura muito argilosa (LVef), LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, textura argilosa (LVd), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, textura argilosa (LVAd) (EMBRAPA, 1999).

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 nove campanhas de campo. Para representar o ciclo das culturas, os dados de radiometria de campo e variáveis agrônômicas precisam ser coletados nas fases básicas de desenvolvimento da cultura, estabelecimento, desenvolvimento vegetativo e estabilização/declínio (MAGALHÃES, 1985). Desta maneira, coletaram-se dados em três épocas diferentes para representar cada uma das fases do ciclo. A primeira coleta de dados ocorreu em 28 de setembro de 2000 para a obtenção da reflectância do solo e da palha. Em 30 de outubro de 2000 e 02 de novembro de 2001 foram coletados os dados de radiometria referentes à fase vegetativa da cultura (cana-de-açúcar com altura máxima de 70 cm). Os dados referentes à fase de desenvolvimento vegetativo foram coletados em 03 de fevereiro e 08 de abril de 2001; 10 de março e 11 de abril de 2002, com a cana-de-açúcar com altura de 1,50 m a 2,00 m. Na terceira fase do ciclo, que é a fase de maturação da cana-de-açúcar (altura de 3,5 m a 4,0 m) houve coleta de dados em 18 de julho de 2001 e 31 de agosto de 2002.

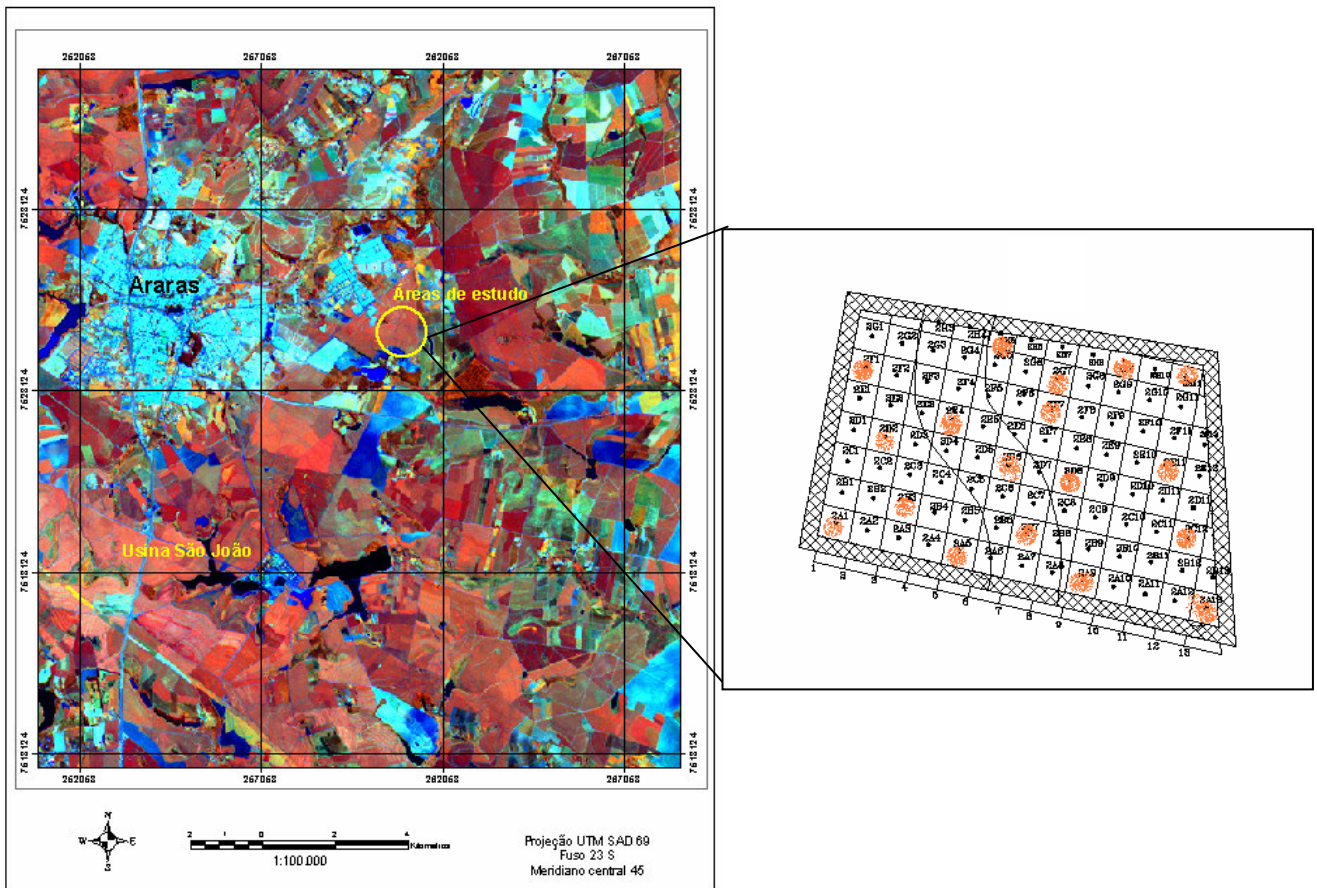


Figura 15 - Localização da área de estudo em imagem Landsat-7, órbita-ponto 220/75 de 05 de abril de 2000, com a distribuição dos pontos amostrais de radiometria e variáveis agrônômicas nas safras 2000 e 2001.

A grade amostral utilizada para a coleta de dados foi composta de 18 pontos amostrais e foi a mesma empregada por SIMÕES et al. (2003) para a coleta das variáveis agrônômicas da cultura. Os pontos amostrais para coleta dos dados radiométricos foram obtidos com uma amostragem estratificada com 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 medições radiométricas possíveis de serem realizadas no intervalo de 9:00 h às 13:00 h. A Figura 15 ilustra a localização dos pontos amostrais em imagem Landsat 7/ETM+, órbita-ponto 220/75 de 05 de abril de 2000.

Para a obtenção dos dados radiométricos foram utilizados dois radiômetros CIMEL CE 313a. A descrição das bandas destes radiômetros e suas características estão apresentadas na Tabela 8, mostrando também a coincidência com as bandas do Landsat-7/ETM+, o que permite que os dados coletados em campo possam ser comparados com os dados orbitais (MILTON, 1987). Desta forma, os dados dos filtros 1 e 2, como são equivalentes às bandas 4 e 3 do ETM+/Landsat-7 passarão a ser tratados como as bandas 4 e 3 (*B4* e *B3*), respectivamente. O radiômetro Cimel é um radiômetro direcional com campo de visada (FOV) de 10°, que mede a radiância espectral com sensores em silício (Si) e germânio (Ge) para suas cinco bandas espectrais. Em cada uma delas, filtros espectrais determinam as larguras e os posicionamentos das bandas.

Tabela 8 - 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	IVP	B4
F2	648	53	621,5	674,5	Si	V	B3
F3	548	85	505,5	590,5	Si	Vd	B2
F4	450	40	430	470	Si	A	B1
F5	1640	165	1557,5	1722,5	Ge	IVM	B5
F6	837	91	791,5	882,5	Ge	IVP	B4

Fonte: Cimel (1998).

Optou-se pelo emprego de dois radiômetros a fim de melhorar o rendimento na coleta de dados, o que possibilitou maior número de medidas no período de tempo estabelecido. Por outro lado, houve 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 LICOR LI-1800. Este espectrorradiômetro possui um receptor co-seno de radiação, que permite o monitoramento da irradiância solar em um plano hemisférico (180° graus) em intervalos de tempo constantes (uma medida a cada cinco minutos, por exemplo). Desta maneira, foi eliminada a necessidade da utilização da placa de sulfato de bário (BaSO<sub>4</sub>) dentro da área cultivada e a sua utilização foi apenas para a intercalibração dos radiômetros em laboratório. O espectrorradiômetro foi deixado fora da

área plantada, no carregador central entre dois talhões, para evitar qualquer interferência da própria cultura e de outros alvos nos valores de irradiância solar. Foram realizadas cinco medições radiométricas com o radiômetro CIMEL CE 313a em cada ponto de amostragem, de acordo com a metodologia proposta por HUETE et al. (1985), de forma que o radiômetro obtivesse medições sobre a linha da cultura e sobre a entrelinha, e detectasse as diferentes condições de cobertura do solo e quantidade de matéria vegetal. A média destas cinco medições foi considerada a radiância espectral do ponto. Estas medições foram sincronizadas com as medições da irradiância solar, para que a obtenção do fator de reflectância (FR) fosse confiável e representasse fielmente a reflectância da cultura.

O fator de reflectância dos pontos foi calculado com a Equação 1, proveniente de DUGGIN e CUNIA (1983):

$$FR = \frac{I_r}{I_o} \times C_r \times RS_r \quad (1)$$

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.

Após a determinação da reflectância, os índices de vegetação foram calculados a partir das equações 2, 3, 4 e 5:

$$SR = \frac{IVP}{V} - \text{Índice de vegetação da razão simples} \quad (2)$$

$$RVI = \frac{V}{IVP} - \text{Índice de vegetação da razão} \quad (3)$$

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} - \text{Índice de vegetação por diferença normalizada} \quad (4)$$

$$SAVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V + L)} * (1 + L) - \text{Índice de vegetação ajustado ao solo} \quad (5)$$

onde  $V$  é a reflectância no vermelho ( $B3$ ),  $IVP$  é a reflectância no infravermelho próximo ( $B4$ ) e  $L$  é a constante de ajuste do efeito solo no índice de vegetação, cujo valor adotado neste trabalho foi 0,5.

Simultaneamente às campanhas de campo para coleta de dados de radiometria foram coletados dados referentes a parâmetros agrônômicos e biofísicos da cultura, como descrito em SIMÕES et al. (2003). 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 com boa correlação com a produtividade (GHELLER et al., 1999). Além desses, o *IAF* é um parâmetro biofísico que pode contribuir nas estimativas de produtividade das culturas e possui comprovada relação com dados espectrais (XAVIER e VETORAZZI, 2003a). As contagens de número de perfilhos por metro foram efetuadas em todas as campanhas de campo, assim como as medições de *IAF*, realizando-se três repetições por ponto amostral. Os dados de biomassa da cultura (*BMT*) nos 18 pontos amostrais foram obtidos pela colheita de dois metros lineares de cana-de-açúcar em três linhas adjacentes nas fases de estabelecimento e desenvolvimento da cultura. A fitomassa foi dividida em fitomassa aérea (folhas), fitomassa de colmo e fitomassa de palha para a obtenção da produtividade de colmos por hectare (*TCH*). A colheita foi realizada em 18 julho de 2001 e 13 agosto de 2002, e os dados se referiram à fase final ou de estabilização, por meio da colheita de parcelas de dez linhas por 15 metros na forma de aceiros no interior do talhão. 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 relação com a resposta espectral da cultura.

A análise temporal dos dados espectrais nas duas safras foi feita usando-se o programa AJUSTE (ZULLO JR. e ARRUDA, 1986). Buscou-se o ajustamento de curvas que descrevesse a evolução do comportamento espectral da cultura ao longo dos ciclos estudados. Os resultados também foram avaliados em relação às fases fisiológicas da cultura, para a verificação da concordância com a evolução da cultura e dos dados de campo. Com base nos dados médios do talhão foram realizadas análises de regressão para o ajuste de curvas, entre o DAC e os dados espectrais (*B3*, *B4*, *SR*, *RVI*, *NDVI* e *SAVI*).

O estudo da relação entre os dados espectrais *B3*, *B4*, *SR*, *RVI*, *NDVI* e *SAVI* e a *TCH* e a *BMT* foi estudada por meio de regressão linear múltipla, usando Stepwise do programa

computacional MiniTab 13 para Windows. As regressões foram geradas a partir dos dados médios nas duas safras estudadas. Para cada modelo foi feita análise da porcentagem de eficácia do modelo através do indicador  $r^2$ , análise de adequação do modelo por meio da Análise de Variância (ANOVA) para avaliar a significância do modelo, análise da normalidade dos resíduos e de auto-correlação dos resíduos, para determinar a aceitação ou rejeição dos modelos propostos.

### 5.2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise temporal do comportamento dos dados espectrais médios obtidos nas campanhas de campo das duas safras, mostra um comportamento correlacionado dos dados espectrais e com o desenvolvimento da cultura, medido pelos dias após o corte (*DAC*), indicado pelos altos valores do índice de correlação de Pearson (significância a 5%) (Tabela 9). Além disto, os dados espectrais apresentaram correlações mais elevadas que o *IAF* e o *NPM*, mostrando que estes dados podem ser mais adequados que os dados agrônomicos para os estudos de monitoramento temporal de culturas. Das variáveis espectrais estudadas apenas a *B4* teve correlação abaixo de 50% com o desenvolvimento temporal da cana-de-açúcar, representada pela variável *DAC*, possivelmente, devido à alta variabilidade do dossel nos estágios de cortes mais avançados como o quarto e quinto cortes estudados neste trabalho.

A variação no dossel expõe camadas inferiores, com maior quantidade de folhas mortas e palha, expõe também os colmos da cana, o que interfere na correlação da banda com as variáveis agrônomicas estudadas. Tal correlação deveria ser elevada, pois a *B4* tem alta relação com a estrutura do dossel e a quantidade de folhas (EPIPHANIO et al., 1996; WIEGAND et al., 1991). Mesmo com esta baixa correlação da *B4*, a correlação do *DAC* com os índices de vegetação não foi afetada, e apresenta valores superiores a 60%, o que sugere que o emprego de índices de vegetação no estudo de cana-de-açúcar pode ser melhor que o emprego da reflectância de bandas espectrais separadamente. Por outro lado, a *B3* e o *RVI* mostraram correlação negativa com o *DAC*, mostrando que com desenvolvimento da cultura seus valores diminuem, o que também era esperado, haja vista a rápida saturação da

*B3* ocasionada pelo aumento de biomassa da cultura e sua alta correlação com pigmentos foliares (EIPHANIO e HUETE, 1995).

Cada índice de vegetação contribui com informações diferentes e complementares sobre o comportamento do dossel da cultura e sobre o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, possibilitando seu emprego em estudos de acompanhamento de culturas e de comportamento espectral (BARET e GUYOT, 1991).

Tabela 9 - Variáveis espectrais e variáveis agrônômicas médias e coeficiente de correlação em relação aos dias após o corte (DAC).

Data da Coleta	DAC Dias	Banda 3 reflectância	Banda 4	SR	RVI	NDVI	SAVI	NPM pl/m	IAF	BMT Mg ha <sup>-1</sup>
28/09/00	0	0,19	0,29	1,55	0,64	0,22	0,16	-----	-----	13,11*
02/11/01	107	0,08	0,24	3,11	0,36	0,49	0,28	21,79	1,02	25,13
30/10/00	138	0,10	0,37	3,96	0,27	0,58	0,42	24,96	0,92	33,78**
10/03/02	233	0,05	0,45	9,15	0,12	0,79	0,59	23,57	2,06	-----
03/02/01	234	0,07	0,61	9,79	0,11	0,81	0,67	16,80	3,34	78,28
11/04/02	267	0,04	0,60	9,46	0,11	0,80	0,68	14,80	3,72	-----
08/04/01	297	0,07	0,33	7,69	0,13	0,77	0,49	14,45	3,38	86,11
13/08/02	391	0,06	0,35	6,02	0,17	0,71	0,47	10,23	1,01	111,63
18/07/01	398	0,07	0,37	6,21	0,18	0,70	0,48	10,79	1,04	108,28
Correlação com DAC		-75,9%	27,3%	60,4%	-77,9%	76,9%	62,4%	89,3%	0,05%	98,5%

\* coletada aos 91 DAC, \*\* coletada aos 140 DAC.

DAC – dias após o corte, SR – índice de vegetação da razão simples, RVI – índice de vegetação da razão simples, NDVI – índice de vegetação por diferença normalizada, SAVI – índice de vegetação ajustado ao solo, NPM – número de perfilhos por metro, IAF – índice de área foliar e BMT – biomassa área total.

O comportamento temporal dos dados espectrais apresentados na Figura 16 ilustra que todos os parâmetros espectrais estudados tendem à estabilização no fim do ciclo, acompanhando a estabilização dos valores de IAF, NPM e BMT (Tabela 9). A *B3* e RVI mostraram um comportamento bastante similar, com queda em seus valores desde as primeiras fases do ciclo, em decorrência da rápida saturação da *B3* devido ao IAF e à BMT. A pequena elevação dos valores do RVI no fim do ciclo é devida ao aumento da quantidade de palha na biomassa total da cultura e a diminuição da massa verde foliar. Todos os demais parâmetros espectrais apresentaram comportamento com intenso aumento da

reflectância ou do índice de vegetação nas fases de estabelecimento e desenvolvimento da cultura. Já na fase de maturação, os valores se estabilizaram e apresentaram ligeira queda (Figura 16).

Na Tabela 9, observa-se que o comportamento da *B4*, *SR*, *NDVI* e *SAVI* acompanhou o desenvolvimento das variáveis agronômicas *IAF* e *BMT* (EIPHANIO et al., 1996; BARET e GUYOT, 1991; SIMÕES et al., 2003). Este comportamento correlacionado com *IAF* e *BMT* ocorreu até que seus valores máximos fossem atingidos e começassem a diminuir com o avanço para a senescência da cultura, o que ocorreu nas duas safras em torno dos 240 dias após o corte. A diminuição dos valores espectrais e do *IAF* no final do ciclo da cultura é explicada pelo processo de maturação da cana-de-açúcar, que passa a translocar fotossintetizados para os colmos, diminuindo a massa verde de folhas e aumentando a quantidade de palha (PELLEGRINO, 2001).

Em relação à variável *DAC*, as variáveis espectrais estudadas tiveram curvas de ajuste similares, sendo seus comportamentos temporais explicados por modelos do 2º e do 3º graus simples e modelos exponenciais, com valores de coeficientes de determinação ( $r^2$ ) superiores a 0,80 (Figura 17). Os melhores ajustes ocorreram com estes tipos de modelos, devido à possibilidade de representação da fase de estabilização e queda nos valores de reflectância e dos índices de vegetação no final do ciclo da cultura.

O fato de o comportamento temporal dos dados espectrais estar acompanhando o desenvolvimento temporal das variáveis agronômicas confirma o potencial dos dados de sensoriamento remoto terrestre para o monitoramento das condições das culturas agrícolas (WIEGAND et al., 1991). Embora os dados espectrais tenham acompanhado o comportamento dos parâmetros agronômicos, a curva do *NDVI* e da *B4* não apresentaram a forma sigmoideal citada por MAGALHÃES (1985) e PELLEGRINO (2001) como sendo a padrão para o comportamento, provavelmente devido ao pequeno número de dados usados para o ajuste dos modelos e pelo efeito de saturação que ocorre no *NDVI* em altos valores de *IAF* e *BMT*.



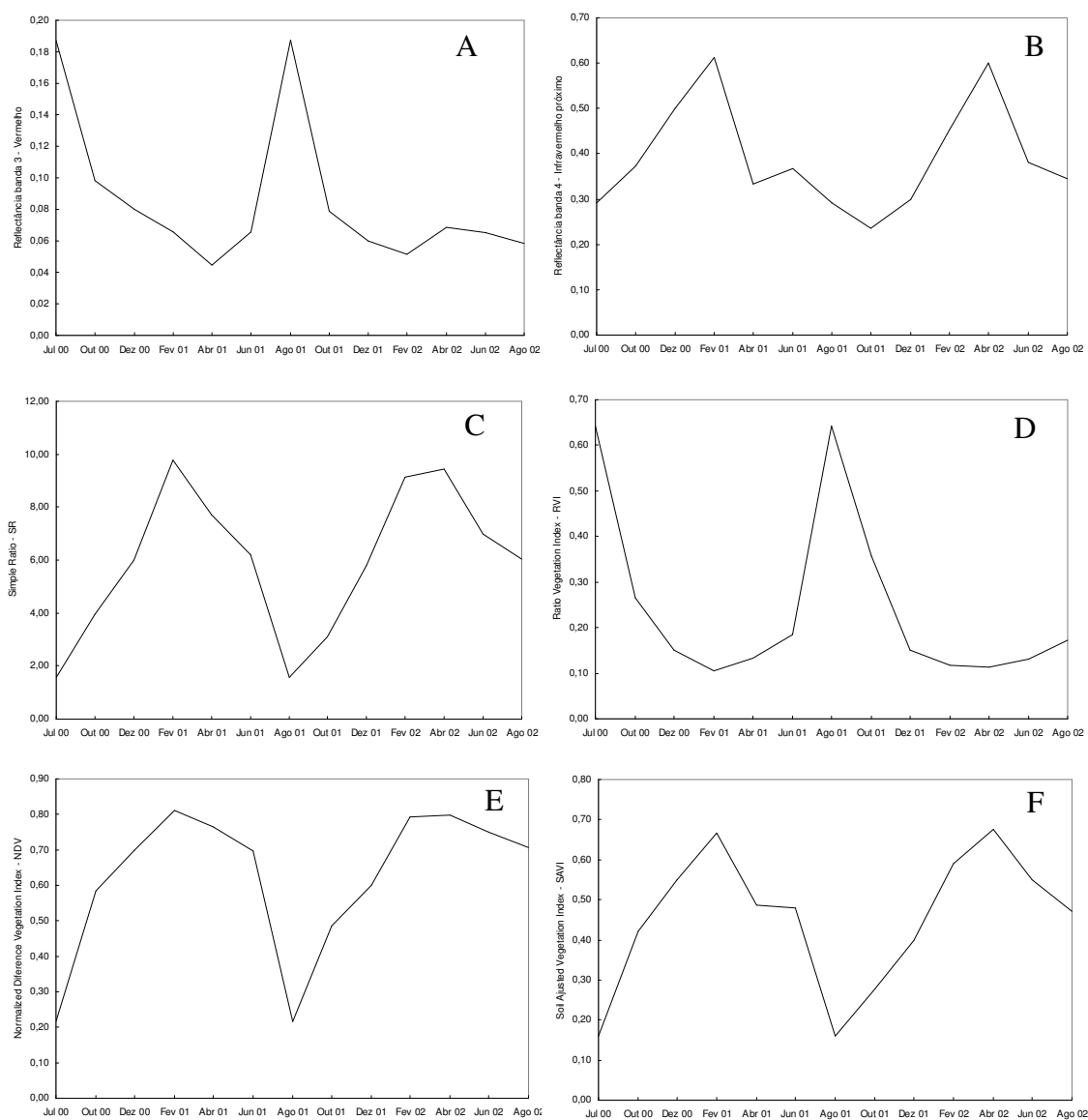


Figura 16 – Evolução temporal da banda 3 (B3) (A), banda 4 (B4) (B), SR (C), RVI (D), NDVI (E) e SAVI (F) (dados médios de 18 amostras) da variedade SP80-1842 nas safras 2000/2001 e 2001/2002.

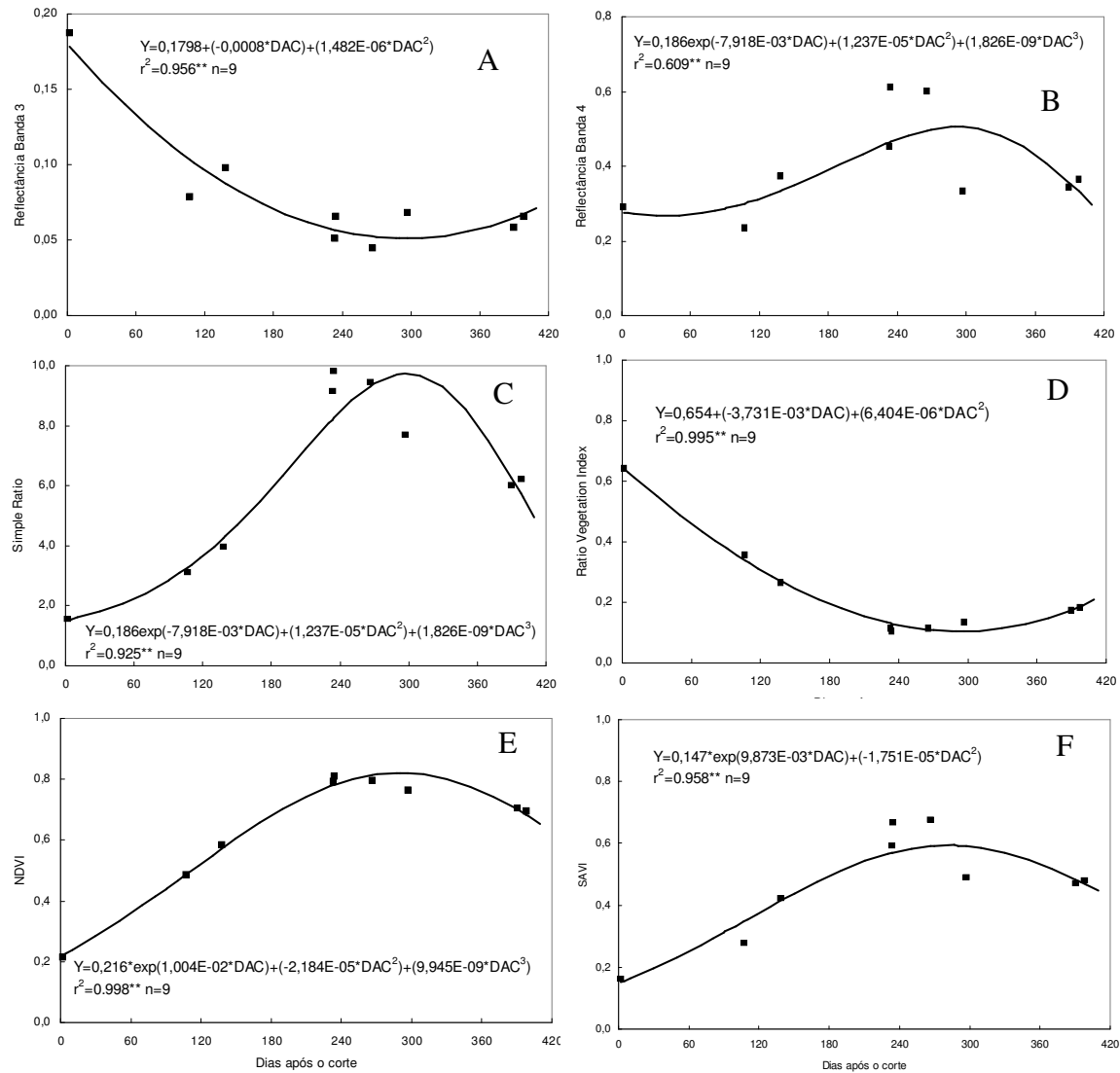


Figura 17 – Modelos Cúbicos ajustados para B3 (A) e RVI (D), Modelos Exponencial Cúbico ajustado para o B4 (B), SR (C), NDVI (E) e SAVI (F).

A Tabela 10 apresenta os coeficientes de correlação com significância a 5% dos dados médios das duas safras para a área estudada. A B3 mostra-se mais correlacionada com as variáveis *IAF*, *NMP*, *TCH* e *BMT* do que a B4. Este resultado contraria os resultados obtidos por EIPHANIO e HUETE (1995) para a alfafa e de EIPHANIO et al., (1996) para o trigo, onde as variáveis biofísicas foram mais correlacionadas com a B4, devido à

prematura saturação da *B3* com o aumento da biomassa. WIEGAND et al., (1991) e BARET e GUYOT (1991) também descreveram melhores correlações da *B4* com parâmetros biofísicos, já que esta banda tem maior poder de penetração no dossel foliar e, portanto, contém mais informação das camadas inferiores, enquanto que a *B3* é fortemente absorvida pela clorofila nas camadas superiores do dossel.

Este comportamento atípico da cana-de-açúcar, apresentando menor correlação da *B4* com variáveis agronômicas do que com a *B3*, pode ser explicado, como já observado na correlação da *B4* com o *DAC*, pela grande variabilidade do dossel foliar da cultura durante o ciclo. O tombamento da cana-de-açúcar expõe os colmos e a palha das camadas inferiores do dossel, comprometendo a correlação da *B4* com o *IAF* e a *BMT*. Contudo esta hipótese precisa ser mais bem estudada para verificar os reais efeitos destas variações no dossel da cana-de-açúcar sobre o comportamento espectral da cultura.

Em virtude da alta correlação da *B3* com o *NDVI*, *SR* e *RVI*, estes índices foram os que apresentaram as maiores correlações com as variáveis biofísicas estudadas. Estes tiveram melhores correlações que o *SAVI*, quando era esperado o contrário. O *SAVI* é mais indicado para estudos com culturas de elevada biomassa, como é o caso da cana-de-açúcar, por sua maior correlação com a *B4*, que interage mais profundamente com dosséis espessos e tem capacidade para atingir porções mais inferiores da biomassa das culturas (EPIPHANIO e HUETE, 1995). Embora este resultado seja uma novidade, mostra ainda que, pelas correlações obtidas, o *NDVI* mostra-se uma variável interessante para inclusão em modelos espectrais de previsão de biomassa e produtividade na cultura da cana.

Pelos coeficientes de correlação apresentados é possível verificar que o *IAF* teve melhores correlações com os dados espectrais que o *NPM* e valores de correlações próximos aos das variáveis *TCH* e a *BMT*, fato justificado pela maior interação da radiação com o dossel foliar do que com os colmos da cana-de-açúcar que é representado pelo *NPM*. As correlações dos Ivs com as variáveis agronômicas foram superiores às correlações com as bandas separadamente (Tabela 10), exceto para o *NPM* que teve correlação baixa com todos os parâmetros espectrais, mas um pouco maior com a *B3* ( $r^2=-0,53$ ). BARET e GUYOT (1991) mostraram ser este, justamente, um dos principais argumentos para o emprego de IVs em lugar do uso individualizado das bandas espectrais.

Tabela 10 – Coeficientes de correlação entre as variáveis agrônômicas e espectrais.

	<i>IAF</i>	<i>NPM</i>	<i>TCH</i>	<i>BMT</i>	<i>Banda 3</i>	<i>Banda 4</i>	<i>SR</i>	<i>RVI</i>	<i>NDVI</i>	<i>SAVI</i>
<i>IAF</i>	1									
<i>NPM</i>	-0,16	1								
<i>TCH</i>	0,07	-0,96	1							
<i>BMT</i>	0,19	-0,97	0,99*	1						
<i>Banda 3</i>	-0,53	0,40	<b>-0,79*</b>	-0,79*	1					
<i>Banda 4</i>	0,70	-0,09	0,47	0,51	-0,47	1				
<i>SR</i>	<b>0,82*</b>	-0,25	0,74	0,79*	-0,78	<b>0,82*</b>	1			
<i>RVI</i>	-0,71	0,43*	<b>-0,83*</b>	<b>-0,84*</b>	<b>0,94*</b>	-0,61	-0,89*	1		
<i>NDVI</i>	<b>0,74</b>	-0,40	<b>0,84*</b>	<b>0,85*</b>	<b>-0,92*</b>	0,66	0,93*	-0,99*	1	
<i>SAVI</i>	<b>0,76*</b>	-0,22	0,79	0,81*	-0,81*	<b>0,87*</b>	0,97*	-0,92*	0,94*	1

\* *P* valor a 5%.

Os resultados mostram que, ainda com as dificuldades de se realizarem medições radiométricas em culturas de grande porte e elevada biomassa vegetal, semiperene e com alta variabilidade espacial, sujeita a grandes variações de um ciclo para outro os dados de radiometria de campo podem ser empregados em estudos de monitoramento temporal de culturas agrícolas. A elevação do sensor sobre o dossel para a coleta dos dados é uma operação que introduz erros nas medidas espectrais, seja devido a variações no ângulo de visada, seja pelas variações na área medida pelo sensor em função da variação da altura do sensor em relação ao topo do dossel, com implicações na representatividade da medida em relação a todo o dossel da cultura. Todos estes problemas podem justificar os resultados diferentes obtidos neste trabalho em relação à literatura e que são verdadeiramente encontrados quando se trabalha com dados de sensoriamento remoto em áreas comerciais, sendo, portanto uma informação de grande valia.

O resultado do Stepwise mostrou modelos de regressão linear múltipla com as variáveis mais correlacionadas entre as apresentadas na Tabela 11. O número de observações utilizado na regressão foi de oito, contudo duas amostras tiveram que ser descartadas, porque não possuíam dados de *TCH* e *BMT* relacionados, para serem usados no ajuste da curva.

O comportamento da *TCH* e da *BMT* foi melhor explicado pelos dados médios de *IAF*, *NPM*, *B3*, *NDVI* e *RVI*, justamente os dados de maior correlação com as variáveis dependentes apresentados na Tabela 11. As variáveis *IAF* e *NPM*, quando utilizadas separadamente para descrever o comportamento das variáveis *TCH* e *BMT*, não apresentaram bons resultados, com  $r^2$  de 0,28 e 0,36, respectivamente. Porém, quando os dados espectrais foram acrescidos nas

regressões, a significância destas elevou-se, passando a valores de 0,96 e 0,98 como coeficiente de determinação (nível de significância 5%) para a *TCH* e *BMT*, respectivamente. RUDDORF e BATISTA (1990) obtiveram melhores explicações para a produtividade da cana-de-açúcar usando informações conjugadas de dados meteorológicos e dados espectrais, elevando as explicações de 28% (somente dados meteorológicos) para 69% (dados meteorológicos mais dados espectrais), mostrando que os últimos agregam informações aos modelos de acumulação de biomassa e de produtividade.

Os modelos de regressão encontrados por PELLEGRINO (2001), relacionando índices de vegetação e dias após o corte de cana-de-açúcar, também apresentaram  $r^2$  acima de 0,80, sendo que o melhor índice de vegetação foi o *SR*. O autor, entretanto, não encontrou bons modelos que relacionassem o *IAF* e os índices de vegetação com a produtividade e a biomassa da cultura.

Tabela 11 – Modelos de regressão linear múltipla para estimativa da *TCH* e da *BMT* para as safras 2000/2001 e 2001/2002.

Modelo	$r^2$
$TCH = 35,75 + 16,11 * IAF - 0,88 * NPM$	0,28
$TCH = -68,19 - 24,84 * IAF + 273,04 * NDVI$	0,87*
$TCH = -27,35 - 1,41 * NPM + 164,65 * NDVI$	0,72*
$TCH = -59,60 - 22,55 * IAF - 1,12 * NPM + 278,55 * NDVI$	0,96*
$TCH = 188,69 - 18,62 * IAF - 1,69 * NPM - 292,6 * RVI$	0,98*
$THC = -47,61 - 21,19 * IAF - 1,23 * NPM + 283,20 * NDVI - 45,72 * B4$	0,95
$TCH = -43,70 - 19,42 * IAF - 0,61 * NPM + 339,93 * SAVI$	0,61
$BMT = 43,17 + 23,08 * IAF - 1,52 * NPM$	0,36
$BMT = 206,81 - 3,45 * NPM - 1079,78 * B3$	0,91*
$BMT = 208,09 - 0,38 * IAF - 3,45 * NPM - 1086,71 * B3$	0,88*
$BMT = -72,57 - 23,84 * IAF - 1,80 * NPM + 338,12 * NDVI$	0,98
$BMT = 228,12 - 18,92 * IAF - 2,49 * NPM - 353,86 * RVI$	0,99*

\* regressões com significância a 5%. O número de amostras usadas para a obtenção das regressões foi igual a oito para todas as equações.

A inclusão de mais de uma variável espectral, ainda que não correlacionadas com as demais variáveis espectrais e com informações complementares como foi o caso da *B4* no modelo para estimativa da *TCH*, não agregou mais informação ao modelo com *IAF*, *NPM* e *NDVI*, diminuindo o  $r^2$  e retirando a significância do modelo. Da mesma forma, a inclusão do *NDVI* na explicação da *BMT* no modelo já contendo a *B3* também não adicionou informação, permanecendo como melhor modelo aquele contendo somente a *B3*. Por outro lado, as

regressões usando o *SAVI* e *SR* como parâmetros espectrais não tiveram significância estatística, mostrando que o *RVI* e o *NDVI* foram os melhores entre os índices de vegetação para explicar a produtividade da cultura e a sua biomassa. O *SAVI* é o índice de vegetação mais indicado para estudos com culturas de grande biomassa, em virtude, da maior correlação com a *B4*, que possui maior capacidade de penetração e, portanto, interage com dosséis mais espessos e profundos (EPIPHANIO e HUETE, 1995) (Tabela 11). No caso da cana-de-açúcar, estudada neste trabalho, a maior correlação da cultura com a *B3* pode ter comprometido a eficiência do *SAVI*, elevando o *RVI*, que possui alta correlação com a *B3*, ao posto de melhor índice.

#### 5.2.4. CONCLUSÕES

Medidas radiométricas obtidas em campo podem ser uma boa ferramenta para o acompanhamento da cana-de-açúcar, em virtude de seu comportamento correlacionado com parâmetros agronômicos da cultura como índice de área foliar, número de perfilhos por metro, produtividade e biomassa da cana-de-açúcar.

A *B3*, o *NDVI* e o *RVI* foram as variáveis espectrais que tiveram as maiores correlações com as variáveis agronômicas. Por consequência, os modelos de regressão múltipla, que tiveram estas variáveis espectrais, foram os que apresentaram os maiores coeficientes de determinação: 0,88 para a *B3*; 0,96 para o *NDVI* e 0,98 para o *RVI*.

As características da cultura, como tombamento, alta variabilidade do dossel foliar e as dificuldades de aquisição de dados radiométricos em áreas comerciais, podem ter causado a maior correlação da *B3* com as variáveis agronômicas e com a produtividade e a biomassa. Outros trabalhos, com um volume maior de dados radiométricos e realizando correlação com dados orbitais, podem eliminar estes problemas e contribuir ainda mais para a compreensão do comportamento espectral da cana-de-açúcar.

### 5.3. RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS ESPECTRAIS ORBITAIS E INDICADORES DE DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR

#### 5.3.1. INTRODUÇÃO

É indiscutível a importância da previsão de safra para a cultura da cana-de-açúcar, que tem impacto em *comodities* como o açúcar, e futuramente também o álcool. As extensas áreas ocupadas pela cultura criam a necessidade de metodologias alternativas às convencionais para auxiliar a estimativa de produção. A visão sinóptica proporcionada pelo sensoriamento remoto orbital permite o monitoramento dos diversos estágios da cultura e conseqüentemente a estimativa da produtividade (IPPOLITI-RAMILO et al., 1999).

A informação proveniente de imagens de sensoriamento remoto orbital para auxiliar a previsão de safra na cultura da cana-de-açúcar foi estudada por diversos autores como, BATISTA et al., 1976; BATISTA et al., 1978; RUDORFF e BATISTA, 1985; RUDORFF e BATISTA, 1990, PELLEGRINO, 2001 e MACHADO, 2003, FORTES, 2003, mas ainda existe carência de estudos da relação de variáveis agronômicas e dados espectrais, seja com as bandas espectrais separadamente, seja com os índices de vegetação .

A hipótese desta pesquisa é que existe relação entre variáveis agronômicas da cultura da cana-de-açúcar com dados espectrais orbitais e que este nível de sensoriamento remoto pode ser utilizado para mapear a produtividade da cultura. Desta forma, esta pesquisa tem por objetivo relacionar variáveis agronômicas que determinam a produtividade da cana-de-açúcar, como o índice de área foliar, o número de colmos por metro e a biomassa aérea total com a sua resposta espectral, utilizando diferentes índices de vegetação em três fases do desenvolvimento da cultura durante duas safras.

#### 5.3.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em um talhão comercial de 27 ha, localizado no município de Araras/SP, entre as coordenadas 47°19'01"S a 47°19'30"S e 22°21'45"O a 22°22'17"O, com três classes de solos predominantes, LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico textura muito argilosa (LVef), LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, textura argilosa (LVd), LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico, textura argilosa (LVAd)

(EMBRAPA, 1999) e baixa declividade (menor que 12%), permitindo a colheita mecanizada sem queima da área, no sistema de cana crua. A área de estudo é identificada por OLIVEIRA et al. (1982), segundo o sistema Köppen, com um clima do tipo CWa, a distribuição pluvial segue o regime típico das zonas tropicais de baixa altitude, ou seja, verão chuvoso e inverno seco. A variedade plantada na área de estudo é a SP 80-1842, estando em seu quarto e quinto corte nas safras 2000/2001 e 2001/2002, respectivamente. A variedade caracteriza-se por hábito decumbente e acamamento regular, perfilhamento médio e colmos de crescimento vigoroso, as folhas são de largura média, comprimento longo e pontas dobradas (COPERSUCAR, 1993).

Os dados de índice de área foliar (*IAF*), número de perfilhos por metro (*NPM*), produtividade (*TCH* – toneladas de colmos industrializáveis) e biomassa aérea total (*BMT*) e os dados radiométricos foram coletados simultaneamente às passagens do satélite Landsat 5/TM e Landsat 7/ETM+, representando as três fases características do desenvolvimento da cultura. Usando uma grade amostral regular com espaçamento de 50 metros e bordadura de 25 metros em torno dos carregadores, os dados de campo foram coletados de maneira que representassem a área de uma janela de quatro pixels nas imagens de satélite. A Figura 18 ilustra a localização dos pontos amostrais (janela de 4 pixels) dentro da área de estudo e o tipo de amostragem executada. A descrição detalhada da coleta de dados das variáveis agrônomicas e dos dados radiométricos está detalhada em SIMÕES et al., 2003.

As análises dos dados espectrais orbitais foram realizadas com dois métodos de amostragem. A primeira metodologia de amostragem foi realizada com os dados médios das 18 janelas de 4 pixels, apresentado na Figura 18, chamada de análises dos pontos amostrais (*PtA*). A segunda metodologia consistiu da coleta de dados de todo o talhão, usando-se uma única amostra. Essa metodologia foi chamada de dados médios do talhão (*DMT*), como ilustra a Figura 18. Nas datas 23/03/01, 05/07/01, quatro pontos amostrais tiveram que ser desconsiderados das análises pontuais e dos dados médios do talhão, por ocorrência de fogo acidental, que destruiu a biomassa da cultura. O mesmo ocorreu com seis pontos nas análises de 16/07/02.



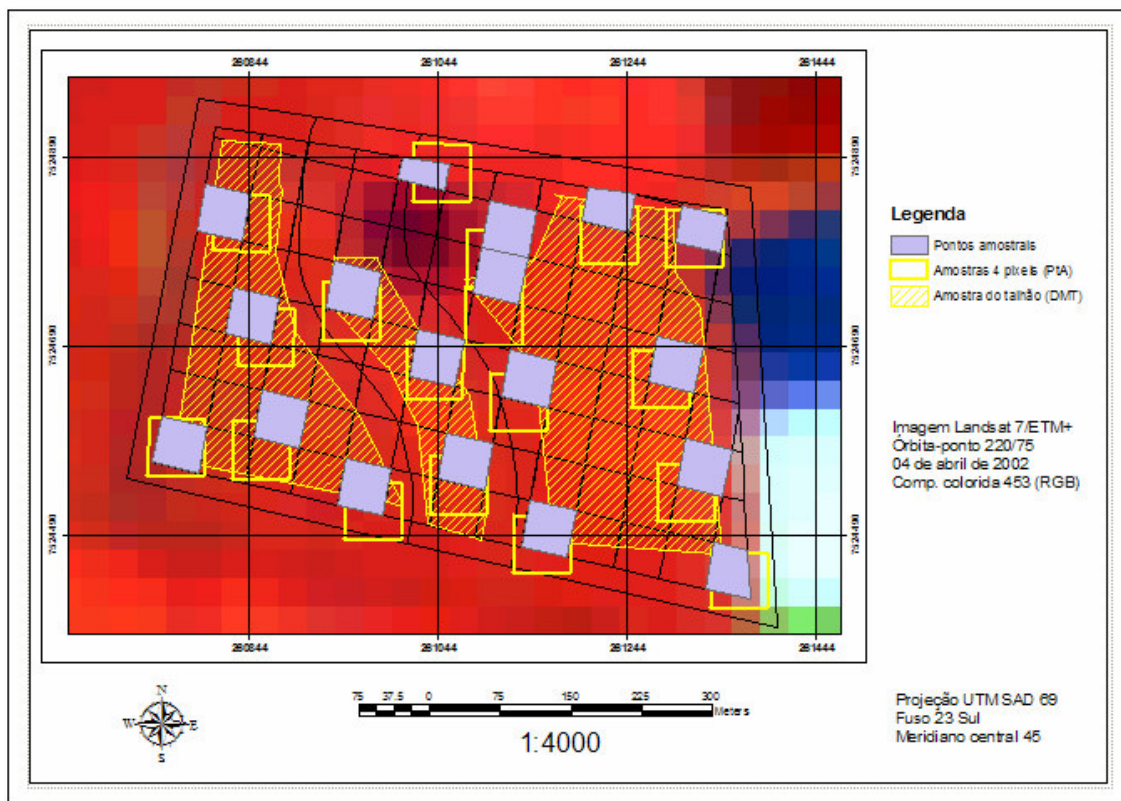


Figura 18 - Imagem Landsat 7 com a localização dos pixels amostrados para a obtenção da reflectância e as duas metodologias de coleta dos dados espectrais. Pontos amostrais com janelas de 4 pixels-PtA e amostragem com dados médios do talhão-DMT.

Pelo fato das bandas espectrais do radiômetro Cimel CE 313A coincidirem com as bandas dos sensores TM e ETM+, seus dados podem ser extrapolados (FORMAGGIO, 1983; DEMATTÊ e NANNI, 2003 e PELLEGRINO, 2001). As datas das imagens orbitais da órbita/ponto 220/76C WRS e os sensores empregados no estudo, estão apresentadas na Tabela 12. Todas as nove cenas passaram por correção radiométrica e correção atmosférica de acordo com os procedimentos descritos por ZULLO JR. e BEZERRA (1993), usando o Modelo 5S (Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire) desenvolvido por TANRÉ et al. (1990), para a remoção dos efeitos provocados pelos fenômenos de absorção e espalhamento atmosféricos. Para tanto, o modelo exige o valor de espessura ótica, o modelo de aerossóis e a quantidade de vapor d'água da atmosfera como parâmetros de entrada. A espessura ótica e ozônio da atmosfera foram calculados utilizando-se medidas de radiação direta (*RD*), realizadas nos dias de passagem das imagens com o fotômetro solar Cimel 317C. Este fotômetro mede a *RD* em cinco bandas do espectro, permitindo o ajuste de uma curva de

regressão estatística da espessura óptica da atmosfera e do ozônio nos dias de passagem do satélite. As medidas foram feitas em intervalos constantes de cinco em cinco minutos das 9:00 às 12:00 horas nos dias de passagem dos satélites (TANRÉ et al., 1990). Estes dados foram usados para a correção radiométrica no Sistema de Correção Radiométrica de Imagens de Satélite (SCORADIS) desenvolvido por ZULLO JR (1994).

Os índices de vegetação Razão Simples - Simple Ratio (*SR*), Índice de vegetação da razão - Ratio Vegetation Index (*RVI*), Índice de vegetação por diferença normalizada - Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*) e Índice de vegetação ajustado ao solo - Soil Adjusted Vegetation Index (*SAVI*) foram gerados a partir das reflectâncias reais das bandas espectrais dos sensores orbitais e do sensor Cimel 313A, segundo as equações abaixo descritas:

$$SR = \frac{V}{IVP} \quad (1)$$

$$RVI = \frac{IVP}{V} \quad (2)$$

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad (3)$$

$$SAVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V + L)} * (1 + L) \quad (4)$$

onde *IVP* e *V* são as reflectâncias correspondente aos comprimentos de onda do infravermelho próximo (bandas 4) e do vermelho (banda 3) dos sensores TM e ETM+, respectivamente.

Para avaliar a viabilidade do monitoramento da cultura da cana-de-açúcar com dados orbitais foi feita uma análise temporal da reflectância das *B3*, *B4* e *B5* e dos índices *SR*, *RVI*, *NDVI* e *SAVI* em relação aos dias após o corte (*DAC*), usando os dados dos pontos amostrais, os dados médios do talhão e os dados de radiometria de campo, apresentados nas Tabelas 12 e 13. A diferença entre os métodos de amostragem das reflectâncias orbitais e da radiometria de campo foi testada através de Teste de Médias (ANOVA de Fator Único), obtendo-se as diferenças significantes entre os dois métodos. Analisou-se também as curvas de desenvolvimento temporal das variáveis espectrais da amostragem pela janela de 4 pixels (*PtA*) em relação ao *DAC*, apresentada na Figura 19 e realizou-se análise de regressão simples

com o programa AJUSTE (ZULLO, JR. e ARRUDA, 1986), para verificar quais são os melhores modelos para explicar o desenvolvimento das variáveis espectrais na cana-de-açúcar durante os dois ciclos estudados. As curvas foram avaliadas à luz da evolução das variáveis agronômicas para a verificação da concordância com a evolução da cultura e da significância estatística (Coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e  $P$  valor  $< 0,01$ ).

O Índice de Correlação de Pearson das variáveis agronômicas da cultura com as variáveis espectrais do método de amostragem *PtA* foi testado, usando-se os dados da fase de estabelecimento, de desenvolvimento vegetativo, de maturação e do ciclo completo da cultura. A significância estatística foi avaliada pelo Teste F, representada pelo  $P$  valor de acordo com os resultados apresentados por e PELLEGRINO (2001) e XAVIER e VETORAZZI (2004). A matriz de Correlação entre as variáveis agronômicas e os dados espectrais foi obtida com os dados médios das duas safras estudadas, permitindo determinar quais os dados que apresentam maior explicação da variação nas variáveis agronômicas *TCH*, *BMT*, *IAF* e *NPM* ao longo de todo o ciclo da cultura.

A técnica de Stepwise foi empregada para obtenção de regressões lineares múltiplas que avaliassem a relação entre as variáveis espectrais dos dois métodos de amostragens *PtA* (maior conjunto de dados) e *DMT* (menor conjunto de dados) e a produtividade (*TCH*) e a biomassa aérea da cultura (*BMT*). Os dados *PtA* foram avaliados separadamente na primeira safra ( $1^{\text{a}}S$ ), na segunda safra ( $2^{\text{a}}S$ ) e conjuntamente com os dados das duas safras ( $2S$ ). Os dados *DMT* testados exclusivamente com os dados médios das duas safras. O programa computacional utilizado a realização do *Stepwise* foi o MiniTab 13 para Windows, onde foi usado como valor limiar para a retirada ou inclusão de variáveis no modelo o  $F$  valor superior a quatro ( $F > 0,04$ ). Para testar a eficácia dos modelos foi avaliado o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), a significância e a adequação dos modelos por meio de ANOVA.

O melhor índice de vegetação e qual a safra com maior explicação da variação dos dados espectrais orbitais em comparação com a *TCH/BMT* foi realizada avaliando-se os resultados de significância estatística das regressões e dos valores de  $r^2$ . A análise de regressão foi utilizada para correlacionar a *TCH* e os *IVs*, obtendo-se o grau de correlação de cada produto de sensoriamento remoto na explicação da produtividade.

### 5.3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 12 apresenta os dados médios dos parâmetros analisados no talhão estudado, nas nove campanhas de campo realizadas e sua correlação com o *DAC*. A avaliação dos dados espectrais orbitais para o monitoramento temporal da cultura da cana-de-açúcar mostrou valores de reflectância estatisticamente diferentes dos apresentados pelos dados espectrais ao nível terrestre (SIMÕES et al., 2003). Entretanto, os dados orbitais nos dois tipos de amostragem *PtA* e *DMT*, tiveram valores similares em sete das nove imagens. As datas com diferenças estatísticas foram 10/03/02, 11/04/02 e 17/06/02 para ambas as bandas (*B3* e *B4*). Estas diferenças podem ser resultado de variações na estrutura do dossel da cultura causadas pelo tombamento da cultura durante dois temporais ocorridos no mês de fevereiro de 2002. Estas diferenças nas duas bandas espectrais foram transmitidas para os valores dos *IVs* (Tabela 13), mostrando que os índices não conseguiram diminuir estes efeitos, mesmo utilizando-se a informação de mais de uma banda espectral (VAN LEEUWEN e HUETE, 1996).

A intensidade da resposta espectral nos dados de radiometria e nos dados orbitais foi estatisticamente diferente, com valores maiores para os dados obtidos com a radiometria de campo. A data 10/03/02, foi a que apresentou maior variação, seguida por 19/02/01 e por 11/04/02 (Tabela 12). Na primeira data, a variação atingiu aproximadamente, 328% na *B3* e 543% na *B4*. Nas demais datas, as variações foram menores, mas ainda estatisticamente significativas, mostrando a alta influência das variações espaciais do dossel na resposta espectral, além de mostrar que a diferença de resolução espacial entre os sensores impõe mudanças no nível de resposta espectral dos sensores (PINTER et al., 1990; PONZONI et al. 2002).

A passagem de escala do nível terrestre para o orbital introduz inúmeros fatores que interferem no comportamento espectral dos alvos detectados pelos sensores, tais como interferências atmosféricas, mesmo com a realização de correções para minimizar seus efeitos, aspectos de variabilidade espacial do alvo em virtude da maior área imageada e de geometria de aquisição de dados orbitais (PINTER et al., 1990).

Tabela 12. Dados agronômicos e dados espectrais da variedade SP80-1842 durante as safras 2000 e 2001.

Sensor	Data	DAC dias	IAF	NPM	TCH Mg ha <sup>-1</sup>	BMT Mg ha <sup>-1</sup>	B3 (reflectância-%)			B4 (reflectância-%)		
							Rad	PtA	DMT	Rad	PtA	DMT
TM	22/09/00	<b>10</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	18,74a	12,18b	12,53b	29,13a	23,21b	23,93a
TM	25/10/01	<b>99</b>	1,02	21,79	25,13	25,13	7,87a	10,54b	10,93b	23,51a	28,34b	28,93b
TM	22/10/00	<b>127</b>	0,92	24,96	33,78	33,78	9,83a	11,41ab	11,35b	37,24a	29,76b	29,07b
ETM+	10/03/02	<b>235</b>	2,06	23,57	----	----	5,12a	1,56b	4,00c	45,30a	8,33b	21,41c
ETM+	19/02/01	<b>249</b>	3,34	16,80	58,63	78,28	6,58a	2,52b	2,48b	61,24a	22,36b	22,53b
ETM+	11/04/02	<b>267</b>	3,72	14,80	----	----	6,84a	3,83b	3,64b	60,01a	19,82b	20,33c
TM	23/03/01	<b>281</b>	3,38	14,45	67,40	86,11	4,46a	4,39a	4,28a	33,28a	20,42b	20,63b
TM	05/07/01	<b>326</b>	1,47	10,79	92,77	108,28	6,57a	6,93a	6,74a	36,68a	32,80ab	33,52b
ETM+	17/06/02	<b>363</b>	1,56	10,23	88,63	111,63	5,84a	6,88b	6,60b	34,52a	26,23b	27,04c

Tabela 13. Índices de vegetação espectrais da variedade SP80-1842 durante as safras 2000 e 2001.

Data	DAC	SR			RVI			NDVI			SAVI		
		Rad	PtA	DMT	Rad	PtA	DMT	Rad	PtA	DMT	Rad	PtA	DMT
22/09/00	<b>10</b>	1,55a	1,91b	1,91b	0,64a	0,53b	0,52b	0,22a	0,31b	0,31b	0,16a	0,19b	0,20b
25/10/01	<b>99</b>	3,11a	2,71a	2,68a	0,36a	0,37a	0,38a	0,49a	0,46a	0,45a	0,28a	0,30a	0,30a
22/10/00	<b>127</b>	3,96a	2,61b	2,56b	0,26a	0,38b	0,39b	0,58a	0,45b	0,44b	0,42a	0,30b	0,29b
10/03/02	<b>235</b>	9,15a	5,37b	5,40b	0,12a	0,19b	0,19b	0,79a	0,68b	0,69b	0,59a	0,17b	0,35c
19/02/01	<b>249</b>	9,78a	9,08a	9,26a	0,10a	0,11a	0,11 <sup>a</sup>	0,81a	0,80a	0,80a	0,67a	0,40b	0,40b
11/04/02	<b>267</b>	9,45a	5,24b	5,61c	0,11a	0,19b	0,18c	0,80a	0,68b	0,70c	0,68a	0,32b	0,34c
23/03/01	<b>281</b>	7,69a	4,68b	4,82b	0,13a	0,22b	0,21b	0,77a	0,65b	0,66b	0,49a	0,32b	0,32b
05/07/01	<b>326</b>	6,21a	4,74ab	4,99b	0,18a	0,21a	0,20a	0,70a	0,65a	0,67a	0,48a	0,43ab	0,45b
17/06/02	<b>363</b>	6,02a	3,82b	4,14b	0,17a	0,26b	0,25b	0,71a	0,58b	0,60b	0,47a	0,35b	0,37c

A diferença entre as intensidades de reflectância dos sensores TM e ETM+ em relação aos dados de reflectância do sensor Cimel 313a pode ser explicada pelo tamanho da área detectada em cada um dos sensores, 0,0060 m<sup>2</sup> no caso do Cimel e 900 m<sup>2</sup> para os sensores TM e ETM+. Como a área detectada pelos sensores orbitais é maior, a integração da resposta espectral dentro de um mesmo pixel, compreende uma composição espectral também mais ampla que, no caso de culturas agrícolas, pode variar entre a vegetação sadia, a vegetação em senescência, a sombra, o solo e a palha (DAVIDSON e CSILLAG, 2001). Os valores de sinal recebidos pelos sensores terrestres tendem a ser maiores que os dados de satélite, em razão da interferência da atmosfera no sinal de resposta dos alvos recebidos pelos sensores orbitais. Embora tenha se efetuado a correção atmosférica das imagens, ela não elimina totalmente os efeitos atmosféricos e as aproximações empregadas no processo de correção podem introduzir outros erros no sinal recebido pelos sensores orbitais, corrigindo excessivamente os valores de reflectância e alterando a resposta espectral da cultura (MORAN et al., 1991).

A evolução temporal de *B3*, *B4* e dos índices espectrais *SR*, *RVI*, *NDVI* e *SAVI*, está apresentada na Figura 19. As curvas dos dados orbitais foram diferentes das curvas dos dados de radiometria, apresentadas por SIMÕES et al. (2003). As curvas das bandas espectrais *B3* e *B4* não tiveram um padrão temporal determinado que acompanhasse a evolução das variáveis agronômicas.

A *B3* apresentou dois picos de reflexão e dois picos de absorção (Figura 19). As altas reflexões estão relacionadas com a alta reflexão da palha da cana deixada sobre o terreno após a colheita mecanizada sem queima, representando o comportamento espectral do início do ciclo nas duas safras (BIARD e BARET, 1997). Por outro lado, a forte absorção é resultado do desenvolvimento do dossel da cultura, que cobriu totalmente a palha e expressa o comportamento espectral na fase de desenvolvimento da cultura (GITELSON et al., 2002).

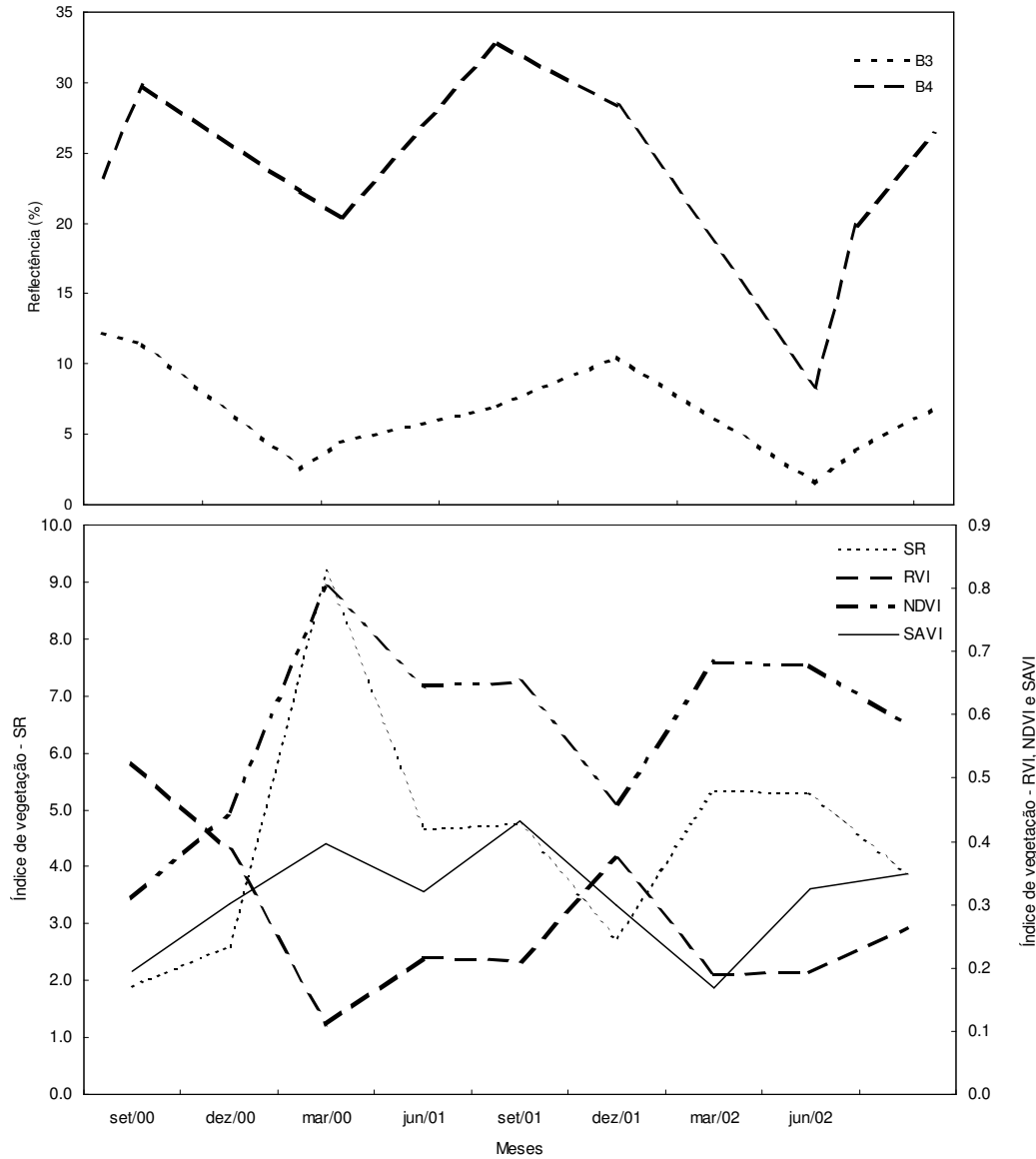


Figura 19 – Evolução temporal das variáveis espectrais orbitais ao longo de duas safras.

No caso da *B4*, o comportamento temporal não correspondeu com elevação dos valores de reflectância nesta banda, em virtude do aumento da biomassa da cultura nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura (PRICE e BAUSCH, 1995). O que parece ter ocorrido, foi uma saturação do sensor ao aumento de biomassa da cultura e da incapacidade dessa banda de detectar o aumento do IAF, da biomassa e da porcentagem de cobertura do dossel (GITELSON et al., 2002). Esta queda nos valores de reflectância pode ter sido causada pelo tombamento da cultura, que expõe a palha e os colmos da cultura, alterando o seu comportamento espectral característico da cultura (VAN LEUWEN e HUETE, 1996).

Este comportamento de queda da reflexão da radiação no infravermelho nos meses de janeiro a abril, também foi observado por RUDORFF e BATISTA (1985), tendo sido explicado pelos autores como um comportamento atípico do tradicional comportamento da vegetação no infravermelho próximo. Por outro lado, este comportamento correspondeu ao observado por KANEMASU (1974) para o sorgo, caracterizado por uma elevação dos valores de reflectância até a metade do ciclo, acompanhando o aumento da biomassa da cultura. Após esta fase, a B4 sofreu queda em seus valores mesmo com o aumento da biomassa e da porcentagem de cobertura. No caso da cana-de-açúcar, os valores de reflectância aumentaram nos meses anteriores à colheita nas duas safras, em uma fase que a cultura aumenta a translocação de fotossintetizados para os colmos e diminui a área fotossinteticamente ativa, sendo esperado uma queda da reflectância na banda do infravermelho (WIEGAND et al., 1991).

Os índices *RVI* e *NDVI* foram os que apresentaram comportamento correlacionado com a evolução temporal de culturas agrícolas como a cana-de-açúcar, caracterizada pelo acompanhamento da evolução temporal de variáveis agrônomicas como porcentagem de cobertura do solo, *IAF*, *NPM* e *BMT* (MORAN et al., 1995). Entretanto, as curvas não mostraram tendências contínuas (Figura 19). Os índices *SR* e *SAVI* não mostraram altas correlações com a banda do infravermelho (*B4*) (Tabela 14), como era esperado e seus comportamentos acompanharam a evolução da *TCH* e *BMT* (EPIPHANIO et al., 1995). Por outro lado, o *RVI*, que tem maior correlação com a faixa do vermelho (*B3*) teve comportamento inverso ao dos demais índices (Tabela 14), com queda nos valores de reflectância nos meses de grande desenvolvimento da biomassa da cana e ligeira elevação dos valores de reflectância no fim do ciclo (PRICE e BAUSCH, 1995).

Os resultados das regressões lineares dos dados de reflectância orbital com a variável *DAC* (Figura 20) também mostraram a falta de um comportamento definido das bandas espectrais em relação ao desenvolvimento da cultura e a evolução temporal das variáveis agrônomicas *IAF*, *NPM*, *TCH* e *BMT*. Nenhum modelo de regressão obteve significância à 1% (Teste T) e  $r^2 > 0,90$  para essas bandas. Contudo, as curvas cúbicas e senoidais, que não representam biologicamente o fenômeno temporal de desenvolvimento da cultura (MACHADO et al., 1982) foram as que mostraram os maiores valores de  $r^2$ , com valores de 0,86 e 0,77 respectivamente para a *B3* e 0,38 e 0,30 para a *B4*. A *B3* e a *B4*



deveriam ter seus comportamentos temporais explicados por curvas exponenciais, cuja fase assintótica representaria a estabilização do aumento da reflectância em virtude da saturação das bandas *B3* e *B4* e da estabilização do aumento da biomassa (KANEMASU, 1974; CARLSON e RIPLEY, 1997). A falta de ajuste de uma curva que descrevesse o comportamento temporal das bandas pode ser explicada: 1) pelos efeitos de variação da atmosfera nas datas estudadas, mesmo tendo-se realizado correção atmosférica (MORAN et al., 1990); 2) pelas diferenças de ângulo de elevação solar entre as imagens, efeito não eliminado totalmente com as correções radiométricas realizadas (EIPHANIO e HUETE, 1995) e; 3) pelas variações nas propriedades óticas do dossel e da cobertura vegetal da cultura (EIPHANIO et al., 1997). O emprego de modelos de mistura espectral podem contribuir com a separação dos efeitos de sombra, solos, palha e vegetação da resposta do dossel da cana, facilitando as análises espectrais (XAVIER e VETTORAZZI, 2003b) e a realização de normalização radiométrica das imagens também tendem a eliminar as variações na geometria de aquisição dos dados espectrais.

Entre os índices de vegetação, o *SR* e o *SAVI* não apresentaram significância estatística nos modelos de ajuste com o *DAC*. O *SR* teve seu comportamento temporal ajustado por um modelo exponencial cúbico com  $r^2 = 0,82$  e o *SAVI* por um modelo cúbico com  $r^2 = 0,39$ . Os demais índices, *RVI* e *NDVI*, tiveram ajustes com significância estatística com os modelos quadrático e cúbico respectivamente, mostrando que estes índices eliminaram parte dos efeitos atmosféricos e de geometria e melhoraram as correlações com variáveis biofísicas das culturas (JACKSON e HUETE, 1991) com os quais as bandas espectrais estão sujeitas quando empregadas separadamente (Tabela 14).

Estes dados sugerem que as bandas espectrais usadas separadamente não representaram satisfatoriamente a evolução temporal da cultura e que por isso devem ser usadas com reservas, no monitoramento temporal da cultura da cana-de-açúcar. Os valores de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) dos índices foram 0,88 para o *RVI* e 0,90 para o *NDVI*, sendo este último o que melhor explicou o comportamento temporal da cana-de-açúcar, provavelmente por que o *NDVI* é mais sensível às variações no vermelho que o *SAVI* e pelo fato de o *RVI* ser mais sensível que o *NDVI* às variações na cobertura do solo e da presença de palha na resposta espectral do dossel da cana (EIPHANIO e HUETE, 1995; HUETE, 1988). Os valores máximos dos índices espectrais foram observados nas imagens

de 19/02/01 e 10/03/02, como comentado anteriormente, data em que ocorreu o tombamento da cultura, fato que interferiu nos dados espectrais nas bandas espectrais *B3* e *B4*.

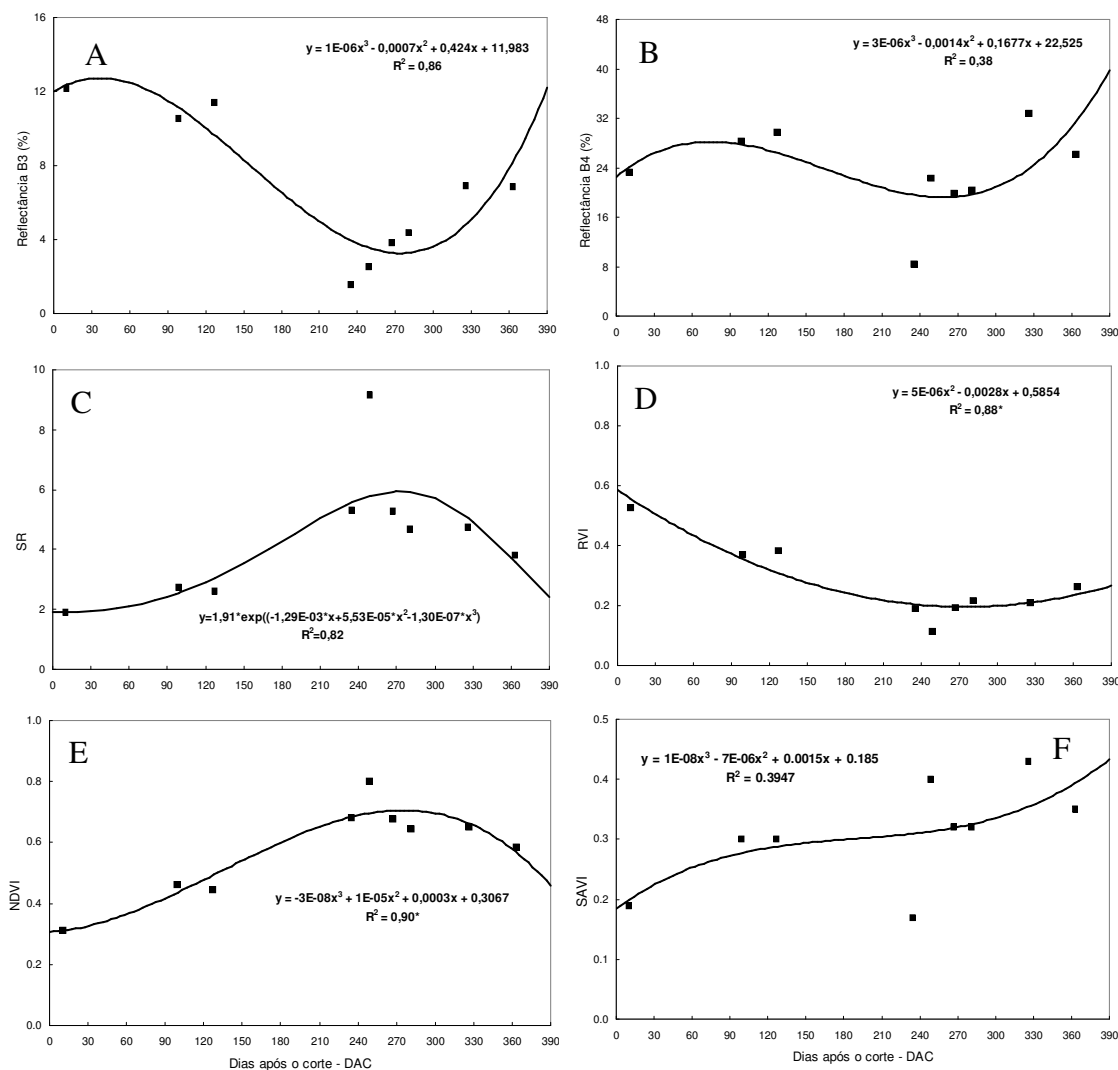


Figura 20 – Modelos Cúbicos ajustados para a B3, B4 e NDVI, Modelo Exponencial Cúbicos ajustados para o SR e SAVI, Modelo Quadrático ajustado para RVI, obtidos para as safras 2000/2001 e 2001/2002.\* significância a 1% (Teste F).

Os dados de correlação apresentados na Tabela 14 confirmaram os resultados obtidos pelos modelos de regressão e pela análise temporal das variáveis espectrais. A banda *B4* não obteve correlação com as variáveis agrônômicas medidas, usando-se os

dados médios das duas safras estudadas. Estes mesmos resultados ajudam a explicar a ausência de um modelo que se ajuste com significância à variável *DAC* e a falta de um comportamento definido para o desenvolvimento temporal desta banda.

Tabela 14 – Índices de correlação dos dados de reflectância dos pontos amostrais (*PtA*) de nove imagens Landsat, dos dias após o corte e dos dados agronômicos usando-se os dados médios do talhão com a variedades SP80-1842 nas safras 2001 e 2002.

	<i>DAC</i>	<i>IAF</i>	<i>NPM</i>	<i>TCH</i>	<i>BMT</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>SR</i>	<i>RVI</i>	<i>NDVI</i>
<i>IAF</i>	0,61	<i>Correl</i>								
	0,22	<i>ValorP</i>								
<i>NPM</i>	-0,05	0,25								
	0,99	0,38								
<i>TCH</i>	<b>0,99</b>	0,63	0,06							
	<b>0,00</b>	0,26	0,99							
<i>BMT</i>	<b>0,99</b>	0,65	-0,02	<b>0,99</b>						
	<b>0,00</b>	0,22	0,93	<b>0,00</b>						
<i>B3</i>	<b>-0,68</b>	<b>-0,94</b>	-0,10	<b>-0,66</b>	<b>-0,72</b>					
	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	0,97	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>					
<i>B4</i>	-0,05	-0,62	0,04	0,04	-0,04	0,66				
	0,98	0,30	0,70	0,69	0,80	0,14				
<i>SR</i>	0,53	<b>0,77</b>	0,13	<b>0,78</b>	<b>0,84</b>	-0,83	-0,33			
	0,10	<b>0,05</b>	0,96	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	0,31			
<i>RVI</i>	<b>-0,81</b>	<b>-0,87</b>	-0,29	<b>-0,87</b>	<b>-0,90</b>	0,92	0,33	-0,88		
	<b>0,005</b>	<b>0,04</b>	0,68	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,45	0,00		
<i>NDVI</i>	<b>0,78</b>	<b>0,87</b>	0,24	<b>0,86</b>	<b>0,89</b>	<b>-0,93</b>	-0,35	0,91	-0,99	
	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	0,77	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,40	0,00	0,00	
<i>SAVI</i>	<b>0,60</b>	<b>0,49</b>	0,12	<b>0,65</b>	0,59	-0,15	0,63	0,45	-0,50	0,49
	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	0,77	<b>0,01</b>	0,09	0,60	0,40	0,78	0,43	0,77

A banda B3, por outro lado, mostrou-se correlacionada com a *DAC*, *IAF*, *TCH* e *BMT* entre as variáveis agronômicas e com correlações acima de 83% com os índices espectrais, exceto com o *SAVI*, valores superiores aos obtidos pela *B4* com os mesmos índices. Este resultado pode ser atribuído ao comportamento da B3 que pareceu ser menos influenciada pelas variações na estrutura do dossel da cana-de-açúcar ao longo do ciclo e às mudanças do ângulo de elevação solar (PINTER et al., 1990).

Os índices espectrais apresentaram coeficientes de correlação bastante similares, destacando-se a correlação de 87% do *IAF* com o *RVI* e com o *NDVI*, o que mostra o potencial de utilização de dados orbitais Landsat na estimativa do *IAF* da cultura da cana-de-açúcar (PRICE e BAUSCH, 1995; XAVIER e VETTORAZZI, 2003a). A *TCH* e a *BMT*

tiveram maiores índices de correlação com o *RVI* e o *NDVI* respectivamente, permitindo afirmar que estes índices são indicados para serem empregados em modelos de estimativa de produção e produtividade da cultura de cana-de-açúcar (PELEGRINO, 2001; MACHADO, 2003).

As regressões múltiplas apresentadas na Tabela 15 mostram os modelos para a estimativa de produtividade de cana (*TCH*) e de biomassa aérea de cana (*BMT*) no talhão, usando-se diferentes conjuntos de dados. Os dados médios das nove campanhas de campo (*DMt*) mostraram modelos com significância ao nível de 95% para a *TCH* e a *BMT*, com exceção de um modelo de *BMT* que alcançou significância a 99% de probabilidade. Os valores de  $r^2$  foram maiores para os modelos com a *BMT* do que com a *TCH*, mesmo tendo o Stepwise selecionado as mesmas variáveis de entrada para a composição dos modelos (*B3*, *B4* e *NDVI*), o que sugere que os dados espectrais do Landsat tiveram melhores ajustes para a *BMT* do que para a *TCH*.

O segundo modelo gerado para a *BMT* com os dados médios (*DMT*) incluiu além da *B3*, a variável *IAF*, indicando que dados referentes ao dossel foliar complementariam as informações espectrais em modelos de estimativa da biomassa aérea da cana (PELEGRINO, 2001).

Os modelos obtidos somente com os dados da primeira safra (*1<sup>a</sup>S*-safra 2000/2001) foram os que tiveram as menores explicações da variabilidade pelas regressões múltiplas com significância de 95%, tanto para a *TCH* quanto para a *BMT* com valores de 0,59 e 0,37, respectivamente, mostrando baixa capacidade de explicação da *TCH* e da *BMT* pelos dados espectrais orbitais. Em contrapartida, os modelos da segunda safra (*2<sup>a</sup>S*-safra 2001/2002) para a *TCH* e *BMT* tiveram valores de  $r^2$  mais altos que os da *1<sup>a</sup>S* para as duas variáveis dependentes e em ambos os casos as regressões tiveram como variáveis independentes os índices *NDVI* e *SAVI*. Nos modelos para a *TCH* fizeram parte a *B3* e o *RVI* e para a regressão da *BMT* a *B4*. Na regressão da *TCH*, a entrada das variáveis *B3* e *RVI* confirma o que já foi observado na Figura 20 e na Tabela 14, a alta correlação desta banda e deste índice com a *TCH*. No caso da *B4*, esta variável fez parte da regressão em decorrência da alta correlação com a quantidade de biomassa foliar da cultura (WIEGAND et al., 1991).

Tabela 15. Modelos de regressão múltipla das variáveis agronômicas da variedade de cana-de-açúcar SP80-1842 e de variáveis espectrais orbitais dos sensores TM e ETM+ do Landsat das safras 2000/2001 e 2001/2002.

<b>Dados</b>	<b>Modelo</b>	<b>n</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>P</b>
<i>DMT</i>	$TCH=44,79-1129,51*B3+391,20*B4$	7	0,84*	0,02
<i>DMT</i>	$TCH=-118,25+1,58B4+245,17*NDVI$	7	0,79*	0,02
<i>DMT</i>	$TCH=-63,19+213,90*NDVI$	7	0,68*	0,01
1 <sup>a</sup> S	$TCH=30,21+3,27*IAF+10,15*B3-92,37*RVI$	38	0,59**	0,00
2 <sup>a</sup> S	$TCH=47,86*B3-1183,27*RVI+2390,69*NDVI-3800,70*SAVI$	30	0,97**	0,00
2S	$TCH = 152,79-2,80*NPM-4,88*B3-3,69*SR$	68	0,44**	0,00
<i>DMT</i>	$BMT=64,09-14,62*B3+4,63*B4$	7	0,88**	0,00
<i>DMT</i>	$BMT=91,06-7,08*IAF-16,47*B3+4,63*B4$	7	0,86*	0,03
<i>DMT</i>	$BMT=-146,32+1,60*B4+316,41*NDVI$	7	0,82*	0,02
1 <sup>a</sup> S	$BMT=65,16-4,65*B3$	38	0,37**	0,00
2 <sup>a</sup> S	$BMT=-1322,84+66,68*B4-6524,43*NDVI-11755,9*SAVI$	30	0,89**	0,00
2S	$BMT=202,17-3,20*NPM-8,02*B3-5,37*SR$	68	0,50**	0,00

DMT–Dados Médios do talhão, 1<sup>a</sup> S–dados da primeira safra, 2<sup>a</sup> S-dados da segunda safra e 2S-dados das duas safras conjuntamente, n–número de dados utilizados para a regressão e P valor. \* significância ao nível de 5% e \*\* significância ao nível de 1% (Teste F).

O coeficiente de determinação dos modelos para os dados das duas safras tiveram valores intermediários entre os dados da 1<sup>a</sup>S e da 2<sup>a</sup>S, com valores de 0,44 e 0,50, respectivamente, para a *TCH* e a *BMT*. Os modelos para a *TCH* e para a *BMT* foram compostos pelas mesmas variáveis, *NPM*, *B3* e *SR*. Curiosamente, a variável *NPM* foi incluída nos modelos, mesmo tendo apresentado baixa correlação com a *TCH* e a *BMT*. Isto pode ser decorrência da utilização de todos os dados e não somente dos dados médios como apresentados na Tabela 15. Quando se empregou os dados das duas safras o *NPM*, juntamente com a *B3* e o *SR*, passaram a ter maior correlação com a *TCH* e a *BMT*, explicando aproximadamente 0,50 da variação nos dados, justificando porque eles foram incluídos nos modelos.

#### 5.3.4. CONCLUSÕES

Os dados espectrais orbitais foram estatisticamente diferentes dos dados espectrais de campo (espectrorradiometria). Já os métodos de amostragens de pixels nas imagens

orbitais, pontos amostrais com janela de quatro pixels (*PtA*) e dados médios do talhão (*DMT*), não tiveram diferença estatística significativa.

O comportamento temporal da banda *B4* e do índice *SAVI* não foram explicados satisfatoriamente por nenhum dos modelos matemáticos testados, mas a banda *B3* e os índices *SR*, *RVI* e *NDVI* apresentaram comportamentos temporais representados por modelos de regressão exponencial cúbico, quadrático, cúbico e exponencial cúbica, respectivamente.

A *B3* e os índices *RVI* e *NDVI* foram os dados espectrais orbitais que apresentaram as melhores correlações com as variáveis agronômicas e de crescimento da cana. Os modelos resultantes das regressões lineares múltiplas gerados para os *DMT*, para a *1ªS*, para a *2ªS* e para as *2S* tiveram significância estatística de 95%, o que confirma o potencial de aplicação das espectrais orbitais conjugado com dados agronômicos no monitoramento e acompanhamento do desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar.

## 6. CONCLUSÕES GERAIS

O comportamento espectro-temporal da variedade SP80-1842 foi altamente correlacionado com as variáveis agronômicas dias após o corte (*DAC*), índice de área foliar (*IAF*), número de perfilhos por metro (*NPM*), produtividade (*TCH*) e biomassa aérea total (*BMT*), tanto para dados espectrais terrestres quanto para dados espectrais orbitais. Os índices de vegetação *SR*, *RVI*, *NDVI* e *SAVI* representaram com maior significância o desenvolvimento temporal da cultura ao longo das duas safras estudadas do que as bandas espectrais do vermelho e do infravermelho separadamente.

Como conclusões específicas, têm-se que:

i) A evolução temporal das variáveis *IAF*, *NPM*, *TCH* e *BMT* foi altamente correlacionada com o *DAC*, mostrando que estas variáveis representam satisfatoriamente o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Os modelos matemáticos representaram o desenvolvimento destas variáveis agronômicas com significância estatística, sugerindo que o emprego de modelos matemáticos podem ser empregados na estimativa destas variáveis.

ii) O comportamento espectral da cultura avaliado com dados espectrais de radiometria de campo e das imagens orbitais dos sensores TM e ETM+, não diferiram estatisticamente e tiveram comportamento semelhante ao apresentado pelas variáveis agronômicas. As curvas de desenvolvimento provenientes dos dados espectrais tiveram formato similar ao apresentado pelas variáveis agronômicas.

iii) Os índices de vegetação mostraram-se mais correlacionados com as variáveis agronômicas estudadas do que as bandas espectrais isoladas nos dois níveis de aquisição de dados.

iv) A técnica da regressão linear múltipla por meio de Stepwise mostrou-se eficiente para estimar as variáveis *TCH* e *BMT*, usando dados agronômicos e espectrais da cultura, confirmando seu potencial de utilização em estudos de previsão de safra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFONSI, R.R.; PEDRO, M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. São Paulo: Fundação CARGILL, Cap. 1, p. 42-87, 1987.

ANDERSON, G.L., YANG, C. Multispectral videography and geographic information systems for site-specific farm management. **3rd Proceedings of International Conference**. 23-26 June, 1996. Minneapolis, Minnesota. p.681 – 692, 1996.

ANTUNES, Mauro A.H.; BATISTA, Getúlio Teixeira; ASSAD, Eduardo D.; MOREIRA, Maurício Alves. Utilização de medidas espectrais para o monitoramento da cultura da soja (*Glycine Max* (L.) Merrill) ao longo do ciclo de crescimento. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7, 1993, Curitiba. **Anais**. Curitiba, p. 42-51, 1993.

ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.64, n.3, p.234-253, jun.,1998.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and Limits of vegetation Indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.35, v.2-3, p.161-173, 1991.

BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation. In: **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'89)**. Canadian Symposium on Remote Sensing, 12., Vancouver, 1989. Remote Sensing: an economic tool for the nineties. Piscataway: IEEE, 1989. v. 1, p. 1355-1358.

BARNES, E.M.; MORAN, M.S.; PINTER Jr., P.J.; CLARKE, T.R. Multispectral Remote Sensing and Site-Specific Agriculture: Examples of Current Technology and Future Possibilities. **3rd Proceedings of International Conference**. 23-26 June, 1996. Minneapolis, Minnesota. p.845 - 854. 1996.

BATISTA, G.T.; MENDONÇA, F.J.; LEE, D.C.L.; TARDIN, A.T.; CHEN, S.C.; NOVAES, R.A. **Uso de sensores remotos a bordo de satélite e aeronave na**



**identificação e avaliação de áreas de culturas para fins de previsão de safras.** São José dos Campos/SP, INPE, 1978.

BATISTA, G.T.; NOVAES, R.A.; TARDIN, A.T.; MENDONÇA, F.J.; LEE, D.C.L.; SANTOS, J.R. dos; CHEN, S.C.; TOSCANO, L.P. **Atividade do projeto estatísticas agrícolas durante o ano de 1975.** São José dos Campos/SP, INPE, 1976.

BATISTA, Getúlio Teixeira; TARDIN, Antônio Tebaldi; CHEN, Sherry Chou; DALLEMAND, Jean F. Avaliação de produtos HRV/SPOT e TM/LANDSAT na discriminação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 25(3): 379-386, mar.,1990.

BAUER, M.E., DAUGHTRY, C.S.T., BIEHL, L.L., KANEMASU, E.T., HALL, F.G. Field spectroscopy of agricultural crops. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-24 (1): 65-75. January 1986.

BIARD, F.; BARET, F. Crop residue estimation using multiband reflectance. **Remote sensing of Environment**, v. 59, p.530-536, 1997.

BURROUGH. P.A.; MCDONNELL, R.A. **Principles of Geographical Information Systems.** New York, Oxford University Press, 333 p. 1998.

CARLSON, T.; RIPLEY, D.A. On the relation between NDVI, l vegetation cover, and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v.62, p.241-252, 1997.

CAVALLI, Antônio Carlos. **Utilização de dados espectrais dos sensores TM/LANDSAT-5 e AVHRR/NOAA-14 como indicadores de processos de degradação do solo.** 153 p. Tese (Doutorado em Geociência) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1999.

CHAPELLE, E.M.; KIM, M.S.; MCMURTREY J.E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B, and carotenoids in soybean leaves. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.39, n.3, p.239-247, 1992.

CIMEL ELECTRONIQUE. **User Manual - Radiance meter CE 313a**. Cimel, Paris, 1998. 15 p.

CIMEL ELECTRONIQUE. **User Manual - Radiance meter CE 313a**. Cimel, Paris, 1998. 15 p.

CLEVERS, J. G. P. W. The application of a weighted Infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. **Remote Sensing of Environment**, New York, 29(1): 25-37, 1989.

CLEVERS, J.G.P.W. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 53-70, 1988.

COPERSUCAR. **Boletim Técnico Copersucar** – Edição Especial: Quarta geração de variedades de cana-de-açúcar Copersucar. Piracicaba/SP: Centro de Tecnologia Copersucar, 1993. 18 p.

COPERSUCAR. **Carta de solos da Usina São João** – Relatório Final. 1997. 356 p.

COPERSUCAR. **Recomendação de adubação para a cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba/SP: Centro de Tecnologia Copersucar, 1988. 7 p.

COX, G., HARRIS, H., COX, D. Application of precision agriculture to sugar cane. In: ROBERT, P.C. et al., **Precision Agriculture**, St. Paul, MN. ASA, CSSA, SSSA, 1998, Part A, p. 753-765.

COX, G; HARRIS, H. PAX, R. Development and testing of a prototype yield mapping system. In: **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists**, Brisbane, 1997, p. 38-43.

DAVIDSON, A.; CSILLAG, F. The influence of vegetation index and spatial resolution on a two-date remote sensing-derived relation to C4 species coverage. **Remote Sensing of Environment**, v.75, p.138-151, 2001.

DEMATTE, José Alexandre Mello; NANNI, Marcos Rafael. Weathering sequence of soils developed from basalt as evaluated by laboratory (IRIS), airborne (AVIRIS) and orbital (TM) sensors. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.23, p.4715-4738, 2003.

DEMETRIADES-SHAH, T. H.; COURT, M. N. Oblique view reflectance for assessing nitrogen status of incomplete canopies. **International Journal of Remote Sensing**, 8(7):1049-1050, 1987.

DIKER, K.; BAUSCH, W.C.; PODMORE, T.H. GIS Mapping of Plant Parameters and Yield Potential Estimated by Remote Sensing. **ASAE Meeting**, Orlando/ Flórida. July 12 – 16, 1998. Presentation Paper n. 983143.

DONZELI, Pedro L.; VALÉRIO FILHO, M.; PINTO, S. A. F. et al. Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao diagnóstico básico para planejamento e monitoramento de microbacias hidrográficas. In: LOMBARDI NETO, F. & CAMARGO, O. A., eds. **Microbacia do córrego São Joaquim (município de Pirassununga, SP)**. Campinas, 1992. p.91-120.

DUGGIN, M.J., CUNIA, T. Ground reflectance measurement techniques: a comparison. **Applied optics**, v. 22, n. 23, p. 3771-3777, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412p.

EPIPHANIO, José Carlos Neves.; ALMEIDA JUNIOR, Almir C.; FORMAGGIO Antônio Roberto. Wheat development evaluated by remote sensing using two vegetation indices. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.69, p.471-478, 1997.

EPIPHANIO, José Carlos Neves e FORMAGGIO, Antônio Roberto. Sensoriamento remoto de três parâmetros biofísicos de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.10, p.1615-1624, 1991.

EPIPHANIO, José Carlos Neves; FORMAGGIO, Antônio Roberto; FRANÇA, Geraldo Victorino de. Avaliação das bandas TM do satélite LANDSAT-5 na discriminação entre

culturas de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 25(3): 371-377, mar.,1990.

EIPHANIO, José Carlos Neves; GLERIANI, José M.; FORMAGGIO, Antônio Roberto; RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.6, p.445-454, jun., 1996.

EIPHANIO, J.C.N.; HUETE, A.R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfafa. **Remote Sensing of Environment**, v.51, p.351-360, 1995.

EIPHANIO, José Carlos Neves; LEONARDI, Luiz.; FORMAGGIO, Antônio Roberto. Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.3, p.439-447, 1994.

EVENSEN, C.I., MUCHOW, R.C., EL-SWAIFY, S.A., OSGOOD, R.V. Yield accumulation in irrigated sugarcane: I. Effect of crop agr and cultivar. **Agronomy Journal**, v. 89, p.638-646, 1997.

FORMAGGIO, Antônio Roberto. **Comportamento espectral de quatro solos do estado de São Paulo nos níveis orbital, de campo e de laboratório**. São José dos Campos, 1983. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais.

FORMAGGIO, Antônio Roberto. **Características agronômicas e espectrais para o sensoriamento remoto de trigo e feijão**. 161 p. Tese (Doutorado em Solos) - ESALQ/USP, 1989.

FORTES, Caio. **Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/Landsat 7**. 131p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2003.

GARDNER, B.R. **Techniques for remotely monitoring canopy development and estimating grain yield of moisture stressed corn.** Ph.D. Dissertation. University of Nebraska, Lincoln. 1983. 187 p.

GAUSMAN, H.W. Leaf reflectance of near-infrared. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 51(11): 1725-1734, 1985.

GAVA, G.J.C. **Utilização de nitrogênio da Uréia ( $^{15}\text{N}$ ) e da palhada ( $^{15}\text{N}$ ) por soqueira de cana-de-açúcar no manejo sem despalha a fogo.** Piracicaba/SP: ESALQ/USP, 1999. Tese (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura), Centro de Energia Nuclear na Agricultura, CENA/ESALQ/USP.

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.

GHELLER, A. C. MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F.; NASCIMENTO, R. Metodologia para estimativa da produtividade agroindustrial da cana-de-açúcar. In: Congresso Nacional da STAB, 8, 2002, Recife. **Anais...**Piracicaba: STAB, p. 483-487, 2002.

GITELSON, Anatoly A.; KAUFMAN, Yoram J.; MERZLYAK, Mark N. Use of a channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, New York, 58: 289-298, dec., 1996.

GITELSON, A.A., R. STARK, U. GRITS, D. RUNDQUIST, Y. KAUFMAN, D.DERRY. Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n.13, p.2537-2562, 2002.

GOEL, N. S. Models of Vegetation Canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing of Environment**, New York, 4(1): 1-212, 1988.

GUYOT, G. Signatures spectrales des surfaces naturelles. Télédétection satelliteire 5. Collection dirigée par Fernand Verger. Paradigme, Caen, 178 p. 1989.

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. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, 25(3): 295-309, 1988.

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.

INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DE SÃO PAULO-IGC. **Carta Planialtimétrica Araras II**, Escala 1:10.000. IGC, São Paulo, 1979.

IPPOLITI-RAMILO, Gabriela A.; EPIPHANIO, José Carlos Neves; SHIMABUKURO, Yosio .E.; FORMAGGIO, Antônio Roberto. Sensoriamento remoto orbital como meio auxiliar na previsão de safras. **Agricultura em São Paulo**, v.46, n.1., p.89-101, 1999.

JACKSON, R.D. Spectral indices in n-space. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.13, p.409-421, 1983.

JACKSON, R.D., HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Journal of Preventive Veterinary Medicine**, v.11, p.185-200, 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**, New York, v.13, n.3, p.187-208, 1983.

JOAQUIM, Antônio Celso. **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**. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

JOHNSON, Lee F. Nitrogen influence on fresh-leaf NIR spectra. **Remote Sensing of Environment**, New York, 78: 314-320, dec., 2001.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969.

KANEMASU, E.T. Seasonal canopy reflectance patterns of wheat, sorghum, and soybean. **Remote Sensing of Environment**, v.3, p.43-47, 1974.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 30(2): 261-270, 1992.

KAUTH, R.J.; THOMAS, G.S. The tasseled cap transformation – A graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: **Symposium on the Machine Processing of Remotely Sensed Data**, Purdue. Proceedings. Purdue: Purdue University, 1976. p. 4B41-4B51.

KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, 1(3): 155-159, 1970.

KORTE, H.; YULE, I.J. A comparison of Differential Global Positioning Systems for use in precision farm. **International Conference on Agricultural Engineering**. Madri, 23 a 26 de set., V.2, p.1021-1022. 1996.

LATORRE, Marcelo P. **Utilização de um método de correção atmosférica para o processamento de dados hiperespectrais do sensor AVIRIS em regiões tropicais**. 202p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1998.

LI-COR. **LAI-2000 plant canopy analyser: Instrction manual**. Li-Cor Inc. Lincoln, Nebraska, 1992, 182 p.

LONDOR, J.; BOJROU, R.J.; OLTMANS, S.; KELLEY, J.I. **Atlas of the global distribution of total ozone July 1957 – june 1967**. Ncar Technical Note n.13 + STR.1976

MACHADO, E.C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (Saccharum sp)**. Campinas/SP: UNICAMP, 1981. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, UNICAMP.

MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; FAHL, J.I.; ARRUDA, H.V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.17, p.1323-1329, 1982.

MACHADO, Hermogenes Moura. **Determinação da variabilidade espacial da biomassa da cana-de-açúcar por meio de dados espectrais do satélite Landsat 7/ETM+**. Campinas, 2003. 70p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Rural) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

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. 1985.

MATTEO, Katia Castro de. **Sistemas de informação geográfica para o monitoramento da cultura da cana-de-açúcar**. São José dos Campos/SP; INPE, 1998. (Dissertação Mestrado - Sensoriamento Remoto).

MCPETERS, Richard. **Total Ozone Mapping Spectrometer**. <[http://jwocky.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone\\_overhead.html](http://jwocky.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone_overhead.html)>, 20/02/2002.

MENDONÇA, F.J.; BATISTA, Getúlio Teixeira; TARDIN, Antônio Tebaldi. **Projeto CANASATE: sensoriamento remoto aplicado ao levantamento da cultura canavieira**. 69p. Relatório Técnico - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1989.

MENDONÇA, F.L. **Uso de dados do Landsat para avaliação de áreas ocupadas com cana-de-açúcar no estado de São Paulo**. São José dos Campos/SP; INPE, 1980. (Dissertação Mestrado - Sensoriamento Remoto).

MILTON, E.J. Principles of field spectroscopy. Review Article. **Internacional Journal of Remote Sensing**, v.8, n.12, p.1807-1827, 1987.



MIOCQUE, Jacques. Avaliação de crescimento e de produtividade de matéria verde da cana-de-açúcar na região de Araraquara-SP. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.17, p.45-47, 1999.

MORAN, M.S., INOUE, Y., BARNES, E.M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.61, p.319-346, 1997.

MORAN, S.M.; JACKSON, R.D.; SLATER, P.N.; TEILLET, P.M. Comparison of atmospheric correction procedures for visible and near-ir satellite sensor output. Courchevel-France. **Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Colloquium-Physical Measurements and signatures in remote sensing**. p.7-12, 1991. (ESA SP-319).

MORAN, S.M., MAAS, S.J., PINTER Jr., P.J. Combining remote sensing and modeling for estimating surface evaporation and biomass production. **Remote Sensing Reviews**, 12:335-353, 1995.

MORAN , M.S.; PINTER, P.J., JR.; ALLEN, S.A.; CLOTHIER, B.E. Effects of water stress on the canopy architecture and spectral indices of irrigated alfafa. **Remote Sensing of Environment**, v.29, p.251-261, 1990.

MOREIRA, Maurício Alves. **Análise de dados do Landsat/TM e do SPOT/XS através de índices de vegetação – Fase II**. São José dos Campos: INPE, 1992. 17 p. (INPE-5450-RPQ/663).

MOREIRA, Romero da Costa. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 114p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000. (INPE-7528-TDI/735)

MUCHOW, R.C., EVENSEN, C.I., OSGGOD, R.V., ROBERTSON, M.J. Yield accumulation in irrigated sugarcane: II. Utilization of intercepted radiation. **Agronomy Journal**, v.89, p.646-652, 1997.

MUCHOW, R.C., SPILLMAN, M.F., WOOD, A.W., THOMAS, M.R. Radiation interception and biomass accumulation in sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.45, p. 37-49, 1994.

NANNI, Marcos Rafael. **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.

NASA. **Landsat 7 - Documentation and Tools**. Jan/Fev. 2000. Disponível na Internet. <http://geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/l7.html>.

OLIVEIRA, João Bertoldo. **Levantamento pedológico do Estado de São Paulo: quadrícula de Araras**. Campinas, Instituto Agrônômico, 1982. 180 p. (Boletim técnico, 71).

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.

PEARSON, R. L.; MILLER, L. D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 8., Ann Arbor, 1972. **Proceedings**. Ann Arbor: ERIM, 1972. v. 2, p. 1355-1379.

PELLEGRINO, Giampaolo Queiroz. **Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar**. 114p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

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**, v.2, n.1, p.43-48, 1981.

PINTER, P.J.JR.; JACKSON, R.D.; MORAN, M.S. Bidirectional reflectance factors of agricultural targets: A comparison of ground-, aircraft-, and satellite-based observations. **Remote Sensing of Environment**, v.32, p.215-228, 1990.

PONZONI, F.J., GALVÃO, L.S., EPIPHANIO, J.C.N. Spatial resolution influence on the identification of land cover classes in the Amazon environment. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** v.74, n.4, p. 717-725, 2002.

PRICE, J.C., BAUSCH, W.C. Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. **Remote Sensing Environmental**, v.52, p.55-65, 1995.

PRIMAVESI, O.; DEUBER, R.; KORNDORFER, G.H.; FERNADES, A.C.; IDE, B.Y. **Perfil de variedades – Biometria e análise do crescimento de cana planta-1985/1986**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1988. 232p.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, New York, 48(2): 119-126, 1994.

ROBERTSON, M.J., WOOD, A.W., MUCHOW, R.C. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Fields Crop Research**, v.48, p.11-25, 1996.

RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, 55(2): 95-107, 1996.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, D. C., 1973. **Proceedings**. Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. v. 1, p. 309- 317. (NASA SP-351).

RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor. **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, Bernardo Friedrich Theodor; BATISTA, Getúlio Teixeira. **Avaliação do desempenho da classificação e estimativa da proporção da cultura da cana-de-açúcar pelo procedimento INPE, utilizando dados do LANDSAT.** São José dos Campos: INPE, 1989a. 16 p. (INPE-4899-PRE/1500).

RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor; BATISTA, Getúlio Teixeira. **Estimativa da produtividade do trigo através de radiometria de campo.** São José dos Campos: INPE, 1989b. 19 p. (INPE-4994-PRE/1556).

RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor; BATISTA, Getúlio Teixeira. 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.

RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor; BATISTA, Getúlio Teixeira. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological –spectral models. **Remote Sensing Environment**, 33:183-192, 1990.

RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor; BATISTA, Getúlio Teixeira. **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. 93p. Relatório Técnico – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1988.

SHIH, S.F., GASCHO, G.J. Relations among stalk length, leaf area, and dry biomass of sugarcane. **Agronomy Journal**, v.72, p.309-313, 1980.

SIMÕES, Maurício dos Santos; ROCHA, Jansle Vieira; LAMPARELLI, Rubens Augusto Carmago. Análise do comportamento espectral de uma área comercial de cana-de-açúcar em duas safras por meio de radiometria de campo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., Belo Horizonte, 2003. **Anais.** São José dos Campos: INPE, 2003. p.2367-2374. CD Rom.

SINGH, R.; GOYAL, R.C.; SAHA, S.K.; CHHIKARA, R.S. Use of satellite spectral data in crop yield estimation surveys. **International Journal of Remote Sensing**, v.13, n.14, p.2583-2592, 1992.

STEVEN, M.D.; MILLAR, C. Satellite Monitoring for Precision Farm Decision Support. In: The First European Conference on Precision Agriculture, 1997, J.V. Stafford. **Proceedings**. London, SCI. 1997.

TANRÉ, D., DEROO, C., DAHAUT, P., HERMAN, M., MORCRETTE, J.J., PERBOS, J., DESCHAMPS, P.Y. Technical Note: Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: The 5S code. **Internacional Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 4, p. 659-668, 1990.

TARDIN, Antônio Tebaldi; ASSUNÇÃO, Getúlio Vargas de; SOARES, João Vianei. Análise preliminar de imagens TM visando a discriminação de café, citrus e cana-de-açúcar na região de furnas, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 27(9): 1355-1361, set., 1992.

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.

TERUEL, D.A. **Modelagem do índice de área foliar da cana-de-açúcar em diferentes regimes hídricos**. Piracicaba/SP: ESALQ, 1995. Tese (Mestrado em Agrometeorologia), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/USP.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, 8(2): 127-150, 1979.

UNICA-União dos Plantadores de Cana-de-açúcar de São Paulo. **Estatísticas do Setor Sucroalcooleiro**. [www.unica.com.br](http://www.unica.com.br). 09/02/2005.

USINA SÃO JOÃO. **Banco de dados cadastrais da Usina São João**. 1999.

USINA SÃO JOÃO. **Banco de dados cadastrais da Usina São João**. 2002.

VAN LEEUWEN, W.J.D.; HUETE, A.R. Effects of standing litter on the biophysical interpretation of plant canopies with spectral indices. **Remote Sensing of Environment**, v.55, p.123-138, 1996.

WELLES, J.M., NORMAN, J.M. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. **Agronomy Journal**, v.83, n.5, p.818-825, 1991.

WIEGAND, C.L., RICHARDSON, A.J., JACKSON, R.D., PINTER JR., P.J., AASE, J.K., SMIKA, D.E., LAUTENSCHLAGER, L.F., MCMURTREY, J.E. Development of agrometeorological crop model inputs from remotely sensed information. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-24, n. 1, p. 90-98, Janeiro 1986b.

WIEGAND, C.L., RICHARDSON, A.J., NIXON, P.R. Spectral components analysis: A bridge between spectral observations and agrometeorological crop model. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-24, n. 1, p. 83-89, Janeiro 1986a.

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. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: I. Rationale. **Agronomy Journal**, v. 82, n. 3, 623-629, 1990.

WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J.; ESCOBAR, D.E.; GERBERMAN, A.H. Vegetation indices in crop assessments. **Remote Sensing of Environment**, New York, 35(2): 105-119, 1991.

WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J.; KANEMASU, E.T. Leaf area index estimates for wheat from LANDSAT and their implications for evapotranspiration and crop modeling. **Agronomy Journal**, v. 71, n. 2, p. 336-342, 1979.

WOOD; G.A.; TAYLOR; J.C.; GODWIN, R.J. Calibration methodology for mapping within-field crop variability using remote sensing. **Biosystems Engineering**, v.84, n.4, p.409-423, 2003.

XAVIER, Alexandre C., VETTORAZZI, C.A. Mapping leaf area index through spectral vegetation indices in a subtropical watershed. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, nº.00 , p.1-12, 2003a.

XAVIER, Alexandre C., VETTORAZZI, C.A. Leaf area index of ground covers in a subtropical watershed. **Scientia Agricola**, v.60, n.3, p.425-431, 2003b.

XAVIER, Alexandre C., VETTORAZZI, C.A. Monitoring leaf area index at watershed level through NDVI from Landsat-7/ETM+ data. **Scientia Agricola**, v.61, n.3, p.243-252, 2004.

XAVIER, Alexandre, SOARES, João Viane, ALMEIDA, A.C., FREITAS, Costa Costa. Estimativa de IAF de plantações de Eucaliptos a partir de dados TM/Landsat. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, IX, Santos/SP, 1998. **Anais**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. SRE, 11-18 set. 1998, Santos, BR, [CD-ROM].

YATES, R.A. Assessment of the effect of inter-cane variability on the sampling and harvesting of sugarcane. **Agronomy Journal**, v.61, p.113-115, 1969.

ZULLO Jr., Jurandir; ARRUDA, F.B. **Programa computacional para ajuste de equações em dados experimentais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 23p. (Boletim Técnico no 113).

ZULLO JR., Jurandir; BEZERRA, P. C. Correção Atmosférica de Imagens de Satélite Utilizando o 5S. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, VII, Curitiba/PR, 1993. **Anais**. 7p.

ZULLO JR., Jurandir. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações**. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

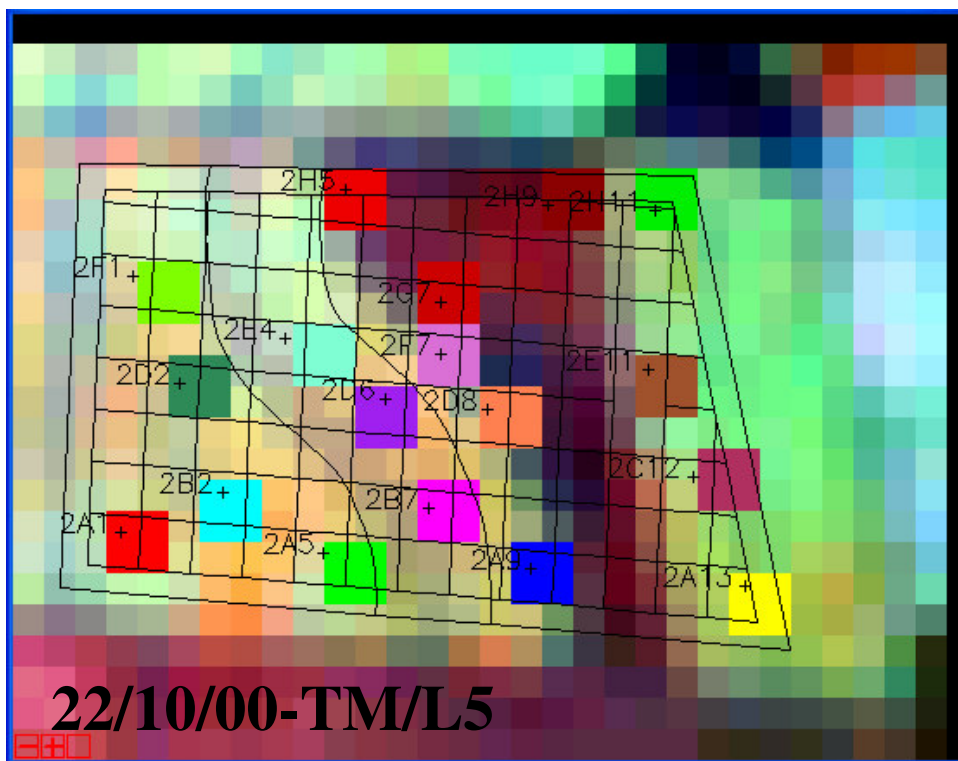
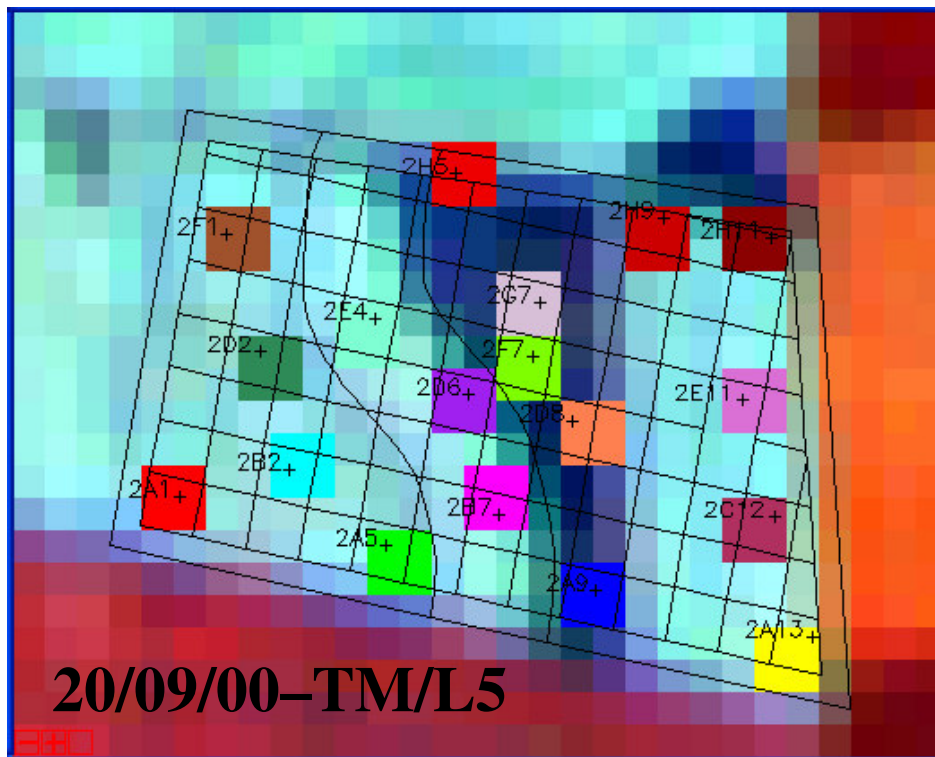
## ANEXOS

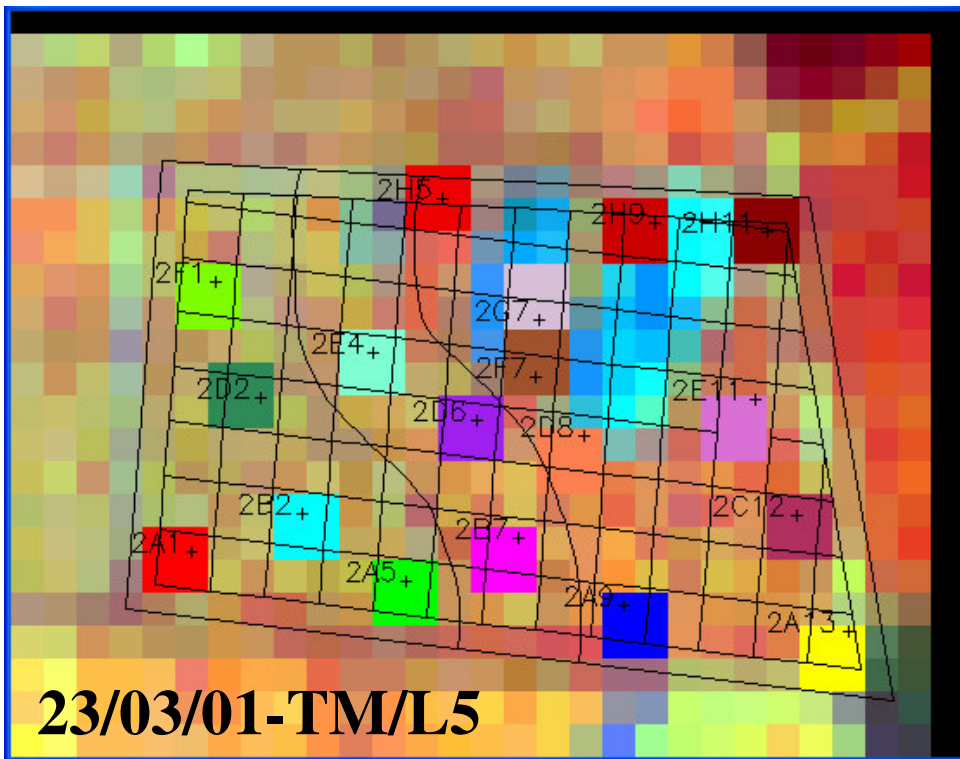
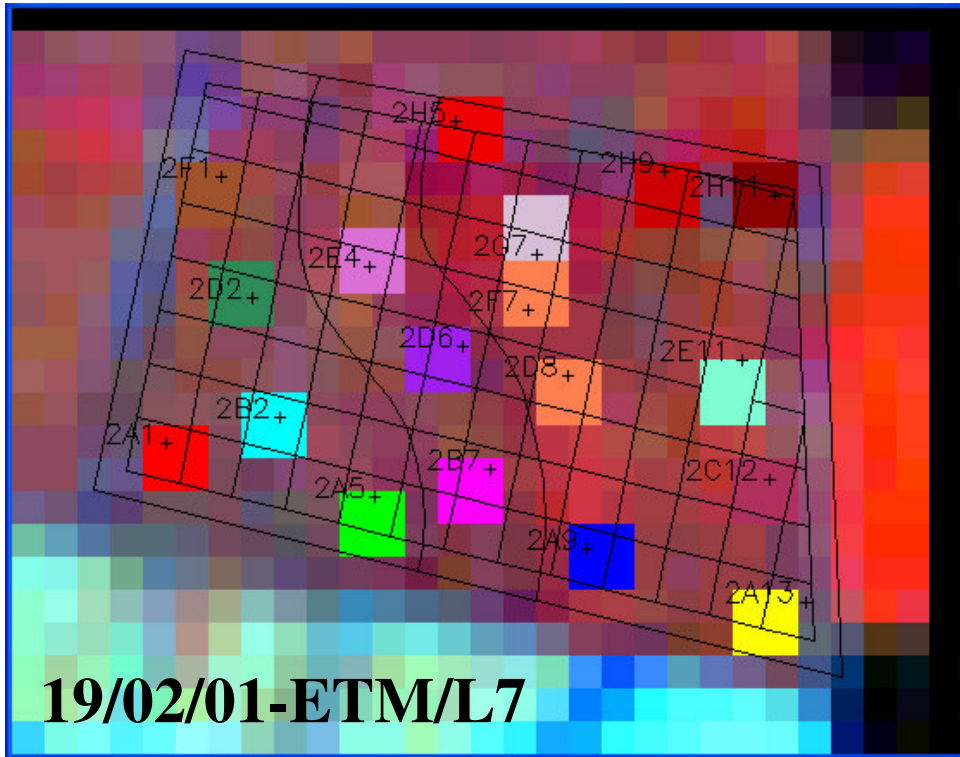
### Anexo 1. Dados climáticos.

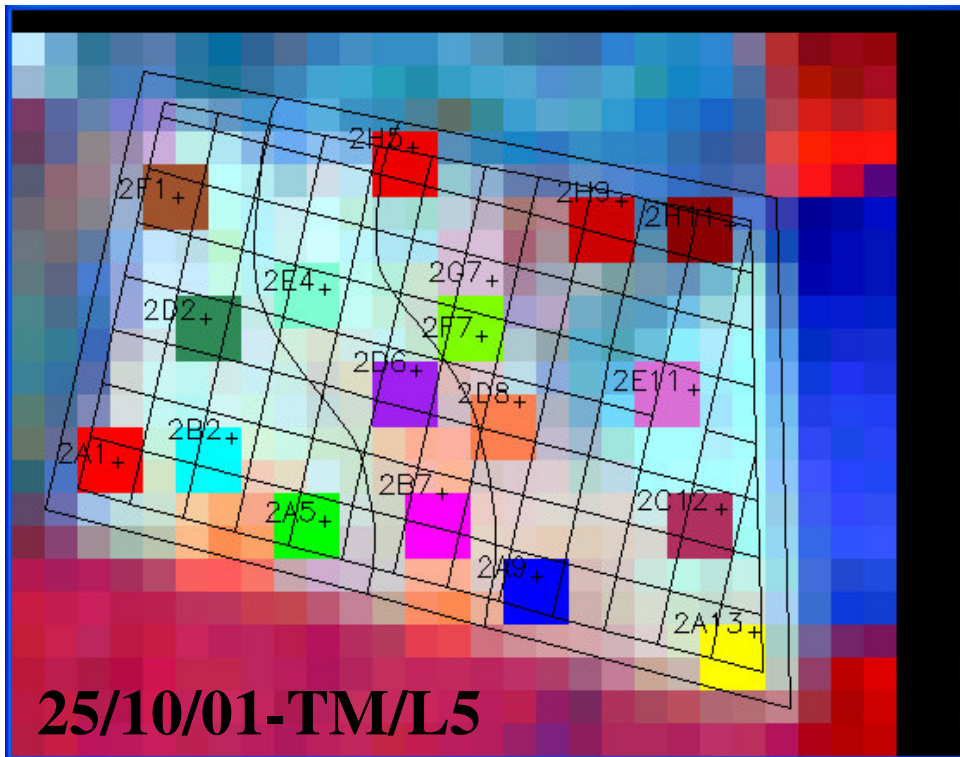
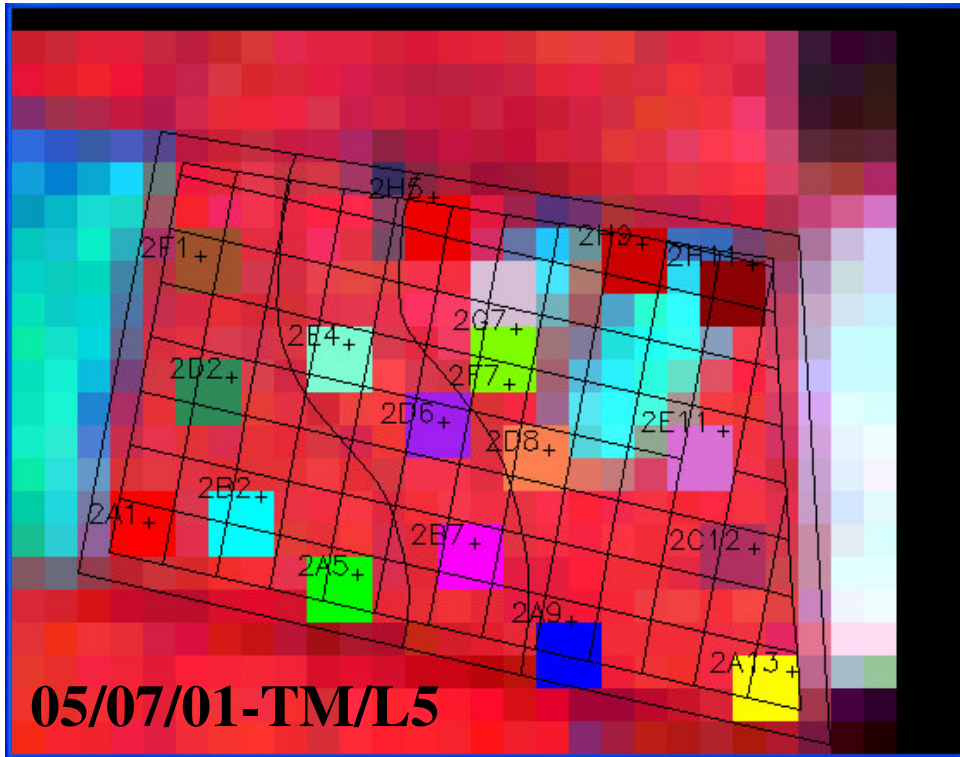
	Temperatura (°C)			Umidade relativa (%)			Velocidade do vento (m/s)		Pressão barométrica	Precipitação	Radiação (kJ/m <sup>2</sup> )	
	máx	min	méd	máx	mín	méd	Máxima	Média	mbar	mm	Global	Líquida
Set 2000	20,70	19,94	20,31	78,57	73,94	76,14	2,93	1,14	938,18	97,10	292154,98	124988,69
Out 2000	24,62	23,69	24,15	71,18	65,28	68,03	3,00	1,13	936,24	77,30	355733,10	193165,74
Nov 2000	22,83	22,05	22,43	82,45	77,09	79,63	3,20	1,28	933,95	343,90	332174,65	188035,53
Dez 2000	23,34	22,57	22,94	85,39	79,98	82,65	3,25	1,32	933,30	166,60	322455,82	187086,74
Jan 2001	24,16	23,33	23,74	83,96	77,29	80,51	2,80	1,10	936,07	227,90	394300,53	216262,37
Fev 2001	24,42	23,57	23,99	86,60	80,74	83,57	2,45	0,72	935,37	147,60	353358,01	-6439,77
Mar 2001	24,03	23,16	23,59	84,65	78,53	81,48	2,38	0,89	935,83	120,00	338905,56	2091,05
Abr 2001	23,24	22,26	22,79	78,41	72,73	75,46	2,27	0,83	937,94	36,30	298810,26	---
Mai 2001	19,12	18,34	18,72	81,59	77,02	79,24	2,23	0,82	937,78	67,20	---	---
Jun 2001	18,38	17,53	17,94	79,96	74,95	77,37	1,93	0,75	940,66	17,20	---	---
Jul 2001	23,18	22,23	22,69	54,98	49,48	52,41	2,63	0,90	908,11	2,10	---	---
Ago 2001	20,18	19,18	19,67	67,78	62,58	65,11	2,39	0,90	942,17	64,50	271883,90	138960,83
Set 2001	21,11	20,27	20,68	73,15	68,37	70,65	2,86	1,04	937,60	77,70	290997,46	163773,82
Out 2001	22,50	21,66	22,08	74,81	69,45	72,02	2,87	1,16	935,66	132,70	350197,74	195982,18
Nov 2001	23,73	22,92	23,32	80,87	75,59	78,09	2,93	1,12	933,94	146,20	329331,48	198807,57
Dez 2001	22,85	22,13	22,48	85,27	80,24	82,71	3,17	1,31	933,01	145,01	176296,16	107759,12
Jan 2002	23,23	22,51	22,87	90,40	85,43	87,99	2,69	1,04	934,20	301,70	309042,41	187104,14
Fev 2002	22,66	21,96	22,31	89,90	85,53	87,71	2,57	0,92	933,55	249,40	251908,35	151910,79
Mar 2002	24,84	23,93	24,38	82,93	76,62	79,70	2,13	0,69	934,74	61,10	339737,88	216689,20
Abr 2002	24,17	23,20	23,68	77,25	71,39	74,16	1,96	0,66	936,85	7,60	307974,21	165607,38
Mai 2002	20,19	19,37	19,77	83,80	79,30	81,51	1,74	0,63	938,38	38,40	214877,85	109615,41
Jun 2002	20,45	19,51	19,98	73,36	68,21	70,73	1,70	0,63	941,35	0,00	222125,84	104507,81
Jul 2002	17,14	16,32	16,73	77,65	73,36	75,43	2,09	0,89	940,87	3,50	87309,24	39979,28



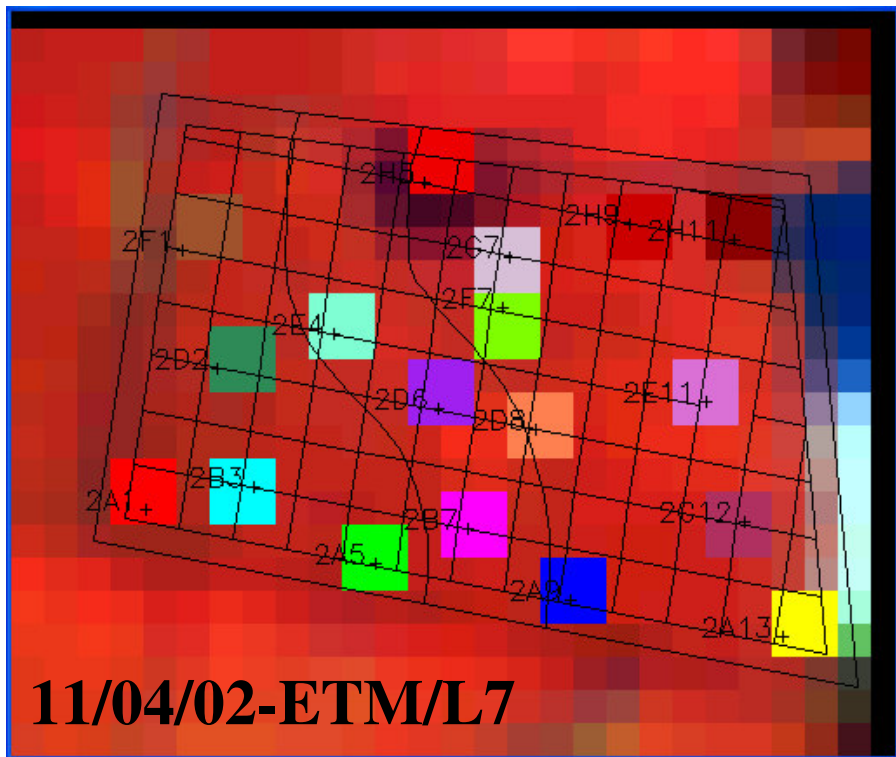
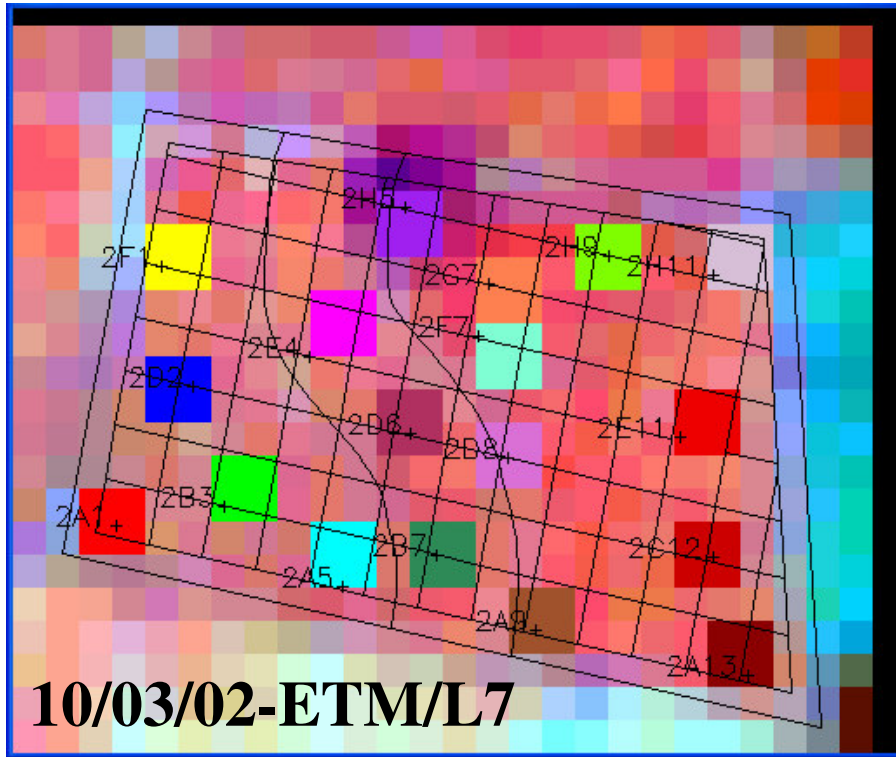
Anexo 2. Imagens de satélite e localização dos pontos amostrais.

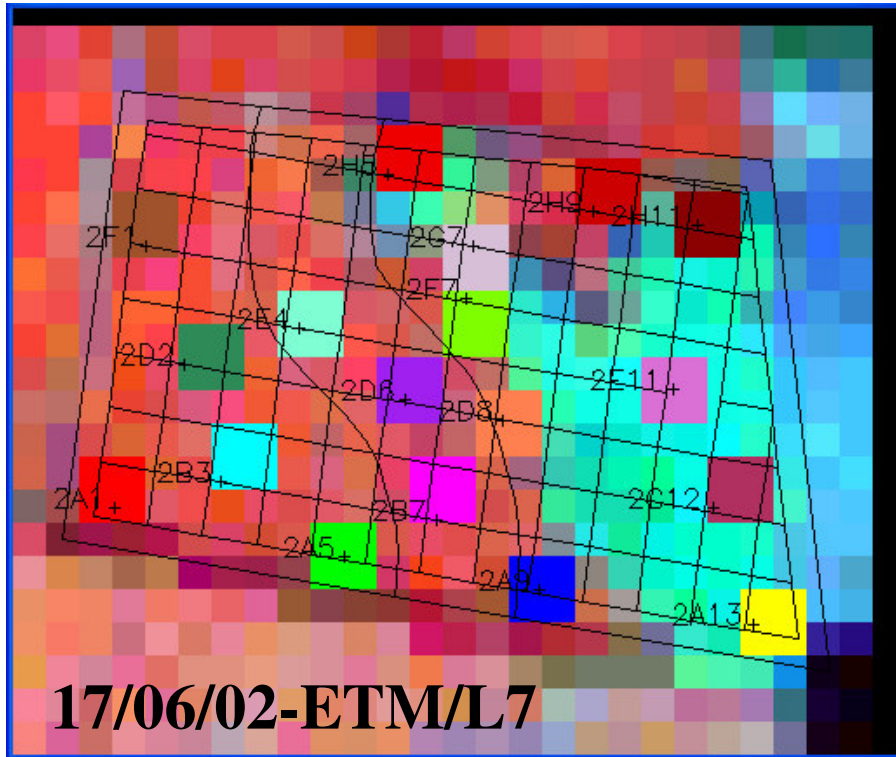












**17/06/02-ETM/L7**