

DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO PARA AMOSTRAGEM EM CANA-DE-AÇÚCAR, CONSIDERANDO A RESPOSTA ESPECTRAL DA BIOMASSA EM IMAGENS ORBITAIS

Development of methodology to sampling in sugarcane considering biomass spectral response in orbital images

Hermógenes Machado¹

Rubens A. C. Lamparelli²

¹**Centro de Tecnologia Canaveira,
Caixa Postal 162, CEP: 13400-970, Piracicaba/SP.
hmmachado@ctc.com.br**

²**Universidade Estadual de Campinas
Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura
Cidade Universitária Zeferino Vaz, CEP 13083-970 Campinas,SP.
rubens@cpa.unicamp.br**

RESUMO

A utilização do sensoriamento remoto permite analisar a distribuição espacial das áreas plantadas, possibilitando o mapeamento das diferenças de vigor da cultura (variações de biomassa), auxiliando no melhor direcionamento de amostragens e observações de campo, promovendo assim melhor avaliação do potencial de produção da área cultivada. Este trabalho tem como objetivo estudar a aplicação dos dados espectrais do satélite Landsat 7/ETM⁺, obtida no início do período de safra, para o mapeamento da variação espacial da biomassa da cultura de cana-de-açúcar, para determinar sua aplicabilidade no processo de amostragem para estimativa da produção. Foram realizadas duas amostragens relativas a dois anos safra, 2000/2001 e 2001/2002. As amostras, com dois tamanhos diferentes, foram distribuídas de acordo com a variação da biomassa. Os dados amostrais foram, posteriormente, comparados com os valores radiométricos expressos através de índices de vegetação calculados nas formas de Nível de Cinza (NC), Reflectâncias Aparente e de Superfície (Ref. Ap. e de Sup). Os resultados mostraram que, os índices GVI e GNDVI foram os que mais se correlacionaram com a produtividade, sendo o GVI mais sensível à sua variação. As correlações não mudaram considerando os dados como NC, Ref. Ap. e Ref. Sup. Durante todo o desenvolvimento metodológico do trabalho a cultura de cana apresentou muita variabilidade de biomassa.

As amostras de 40 x 40 metros foram as que mais se correlacionaram com os valores radiométricos apesar das amostras apresentarem maior variabilidade. Portanto apesar do trabalho de coleta de material ser menor para amostras de 15 x 15 metros ela não consegue expressar toda a variabilidade da cultura em termos de produtividade.

Palavras chaves: Cana-de-açúcar, Previsão de safra, Produção, Landsat, Amostragem

ABSTRACT

Remote Sensing allows to analyze the spatial distribution of cultivated areas making capable to distinguish differences in culture biomass vigor, it getting better in sampling and field observations, so supplying best potential production evaluation.

This work had the main objective to study the application of spatial data from Landsat 7/ETM⁺, obtained in beginning of the harvest period, to mapping the sugarcane biomass spatial variability, to determine its capacity to be used in sampling process to estimate the production. Sampling was carried out twice during harvest years, 2000/01 and 2001/02 and the samples, with different sizes, were placed in according of the biomass variation, identified by visual analysis from B4. The field samples data after were compared with vegetation index calculated using Gray Level (GL), Aparent Reflectance (Ap.Ref.) and Surface Reflectance (Surf. Ref.). The results showed that vegetation index chosen presented

similar coefficient of correlation values with yield except GVI that was best and it was more sensible the yield variation. The coefficient of correlation values not changed considering the calculus with GL, Ap.Ref. and Surf. Ref.. The data from the images as from the field, always indicated much biomass variability. The 40x40 meters samples were more correlated with yield than 15x15 meters samples, on the other hand those showed more biomass variability than these, therefore despite of the field collect data to be lesser to 15x15 m it don't express all yield variability.

Key words: Sugarcane, Harvest forecast, Production, Landsat, Sampling

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico, técnicas de sensoriamento remoto têm-se mostrado úteis para o monitoramento de áreas agrícolas onde tem provado elevado potencial de utilização, em especial, dos dados do sistema LANDSAT, no fornecimento de informações sobre a cultura da cana-de-açúcar. Dentre estas técnicas pode-se citar a aplicação de índices de vegetação obtidos através de transformação linear entre o valor espectral das diferentes bandas do sensor.

Os dados de sensoriamento remoto permitem analisar a distribuição espacial das áreas plantadas, possibilitando o mapeamento das diferenças de vigor da cultura (variações de biomassa), auxiliando no melhor direcionamento de amostragens e observações de campo, promovendo melhor avaliação do potencial de produção da área cultivada.

Para a cultura da cana-de-açúcar, inúmeros trabalhos são encontrados na literatura utilizando dados espectrais, sendo que, os estudos desta natureza, em sua grande maioria, demonstram certa eficiência na identificação de áreas com cana-de-açúcar. Dentre eles pode-se citar XAVIER et al. (2006) e RUDORFF et al.(2005). Os primeiros encontraram 91% de exatidão no levantamento da cultura no Brasil e o segundo conseguiu diferenciar variedades. Desta forma ambos mostram, de forma complementar, a inegável importância do Sensoriamento Remoto no mapeamento da cultura da cana-de-açúcar.

Alguns 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; RUDORFF & BATISTA, 1991; EPIPHÂNIO & FORMAGGIO,1991; PRICE & BAUSCH, 1995; PELLEGRINO, 2001 e MACHADO, 2003).

Com o mesmo objetivo foi criado por ROUSE et al. (1973) o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e o índice de vegetação transformado (TVI), na tentativa de amenizar as influências do solo, atmosfera e variações do ângulo do Sol. Buscando reduzir a dependência do NDVI das propriedades atmosféricas alguns autores apresentaram proposições para minimizar estes efeitos. GITELSON et al. (1996) enfatizando o uso do canal verde (VD), obteve o índice verde de resistência atmosférica (GARI) e o índice verde-vermelho de resistência atmosférica (GRARI) .

Em uma abordagem diferente, pode-se, citar o índice resultante da transformação ortogonal "Tasseled

Cap". Este índice utiliza as seis bandas não-termais do sensor TM e atribui pesos diferentes, para cada uma delas, através de equações lineares. O resultado são três imagens-síntese: "brightness", "greenness" e "wetness" (CRIST & CICONE, 1984). A imagem "greenness" é descrita como um índice de vegetação composto pela equação matemática das respostas dos canais 1, 2, 3, 4, 5, e 7 do sensor TM/Landsat 5 (GVI). Este mesmo índice foi transformado para atender as características do sensor ETM+ do satélite Landsat 7 (HUANG et al. 2002)

De acordo com sua sensibilidade em relação às variáveis da vegetação, os índices de vegetação podem realçar a variação espacial da biomassa existente. O trabalho de JI & PETERS (2007) mostra uma função estatística que pode medir mais eficientemente a sensibilidade de alguns índices de vegetação. Eles encontraram que os índices de vegetação NDVI e RVI/RATIO (Índice de Vegetação da Razão de bandas) foram mais sensíveis que os índices GNDVI (VerdeNDVI) e WDRVI (Índice de Vegetação Dinâmico).

Utilizando-se de imagens SPOT multiespectrais, STEVEN & MILLAR (1997) constataram que, alguns índices específicos de monitoramento de culturas como o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada), apresentaram elevada correlação com a produtividade de trigo ($r^2=0,774$), superiores aos apresentados pelas bandas separadamente e explicou 60% da variância nos dados de produtividade.

Em outro experimento, utilizando sensoriamento remoto, GENOVESE et al. (2001) estudando uma série temporal de dados NOAA-AVHRR/NDVI, combinados com dados de uso da terra, concluíram que, este mecanismo pode aumentar a relação com estimativa de safra do que NDVI somente.

RUDORFF (1985) avaliou o uso potencial dos dados LANDSAT utilizando os índices de vegetação em conjunto com dados de um modelo agrometeorológico para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar. Considerou que os melhores resultados foram alcançados quando utilizou os dois modelos em conjunto (agrometeorológico e índice de vegetação). A regressão linear, considerando as variáveis em conjunto, explicaram 56% da variação, enquanto que analisados separadamente os modelos, agrometeorológico e índice de vegetação, explicaram respectivamente, 38% e 32% da variação.

Dentro deste contexto este trabalho assume o objetivo de estudar a aplicação dos dados espectrais,

expressos através de índices derivados de imagens multiespectrais do satélite Landsat 7, sensor ETM⁺, obtida no início do período de safra, para o mapeamento da variação espacial da biomassa da cultura de cana-de-açúcar, visando determinar o seu potencial de utilização no processo de amostragem para estimativa da produção.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada no estado de São Paulo entre as coordenadas 47°22'10'' e 47°29'40'' Oeste e 22°11'45'' e 22°26'07'' Sul nas áreas com a

cultura da cana-de-açúcar da Usina São João Açúcar e Álcool S.A.

A Figura 1 mostra a localização geográfica da área de estudo, onde se pode observar em uma imagem de satélite (LANDSAT-7) a distribuição espacial dos talhões a serem analisados (em amarelo).



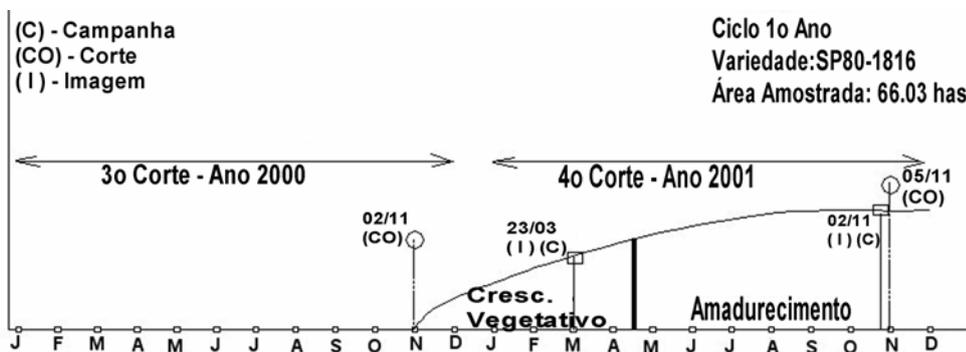
Fig.1 – Localização da área de estudo (município de Araras, Leme e Rio Claro) no Estado de São Paulo

As informações espectrais foram extraídas de imagens orbitais, pertencentes a órbita/ponto 220/75 do satélite Landsat 7 sensor ETM⁺ referentes a quatro passagens (23/03/2001, 02/11/2001, 27/04/2002 e 16/07/2002) coincidentes com o período que antecede a colheita (maturidade fisiológica). De acordo com os trabalhos realizados anteriormente, onde RUDORFF (1985) concluiu que a época mais propícia de aquisição de dados LANDSAT, para o estabelecimento de um modelo de produtividade para a cana-de-açúcar, encontra-se próxima ao mês de fevereiro, 1 a 2 meses antes do início da colheita. JOAQUIM (1998), em seu trabalho, constatou que as imagens Landsat mais

apropriadas foram aquelas adquiridas no mês de abril, por estar a cultura próxima ao seu máximo desenvolvimento vegetativo e antes do início da colheita.

É importante ressaltar que, as etapas metodológicas referentes ao processamento das imagens descritas a seguir foram realizadas nas quatro imagens orbitais adquiridas em duas safras agrícolas (2000/2001 e 2001/2002). A Figura 2 (a e b) mostra o ciclo vegetativo aproximado das variedades estudadas no período, assim como os momentos de coleta de dados no campo e aquisição de imagens.

a)



b)

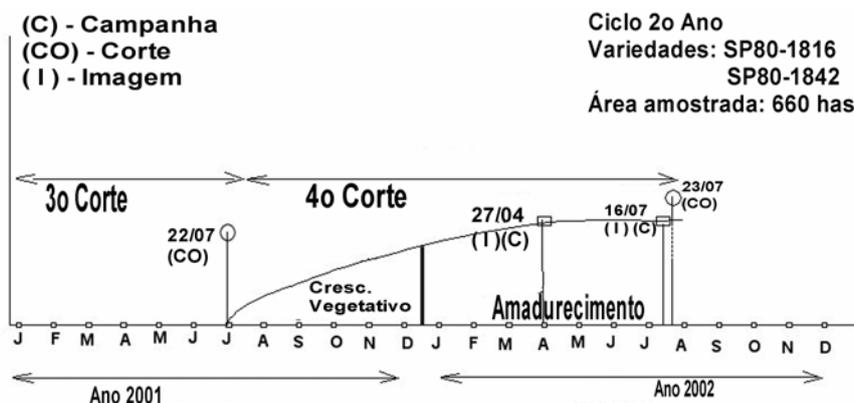


Fig. 2: Ciclo vegetativo aproximado das variedades estudadas.

Com o objetivo de melhorar a qualidade das imagens dos sensores ETM+, foi utilizado o sistema de correção radiométrica de imagens de satélite (SCORADIS), que estima o sinal recebido pelo satélite sem a interferência de fatores atmosféricos como gases e aerossóis. Os dados de entrada foram: coordenadas geográficas lat/long, data, hora, tipo e quantidade de aerossóis presentes, vapor d'água e ozônio (ZULLO Jr., 1994). Com os dados de radiação direta, estimado pelo radiômetro solar CIMEL-317, foi calculado o conteúdo de vapor d'água da atmosfera. A quantidade de ozônio foi avaliada utilizando-se dados do satélite "Earth Probe TOMS" (McPETERS, 2002). A massa ótica foi calculada em função do ângulo horário, da declinação e ângulo zenital do sol. A espessura ótica foi calculada por regressão linear em que foram consideradas as variáveis: transmitância gasosa global, a massa ótica e

Revista Brasileira de Cartografia N° 59/02, agosto 2007 (ISSN 1808-0936)

o fator de correção da constante solar. Os dados acima foram inseridos no programa SCORADIS, para processar as imagens e calcular a reflectância da superfície.

Após a correção dos efeitos atmosféricos, as imagens foram corrigidas geometricamente a fim de que suas informações se tornassem compatíveis com as informações advindas do banco de dados da usina, sendo incorporadas a outros dados, em um SIG.

Para representar a resposta espectral da biomassa do dossel de cana-de-açúcar e avaliar a sua correlação com a produtividade, foram escolhidos os seguintes índices de vegetação: RATIO, NDVI, TVI, SAVI (Índice de Vegetação Ajustado para o Solo), ARVI (Índice de Vegetação Atmosfericamente Resistente), GARI, GNDVI e GVI.

Para melhor descrição, a seguir, a metodologia de coleta de dados será dividida em duas partes, as quais se referem às duas safras de estudo.

Na primeira etapa, referente à safra 2000/2001, foram selecionados alguns talhões, levando em

consideração a homogeneidade de determinados parâmetros da cultura como a representatividade da variedade na área da usina, estádio de corte, ambiente de solo, tipo de colheita, entre outros.

Para coleta de dados espectrais foram utilizadas as imagens de 23/03/2001 e 02/11/2001. A variedade escolhida foi a SP 80-1816, estando no seu quarto ano de corte e sob as melhores condições de solo. As amostras foram distribuídas em dois talhões totalizando a área de 66,03 ha.

Escolhida a área a ser estudada, utilizou-se de alguns recursos do processamento de imagens (contrastes e aplicação de paletas de cores) para melhor

visualização da variação espacial da biomassa, identificando os diferentes padrões de resposta espectral mostrada na banda 4 (infravermelho próximo) da imagem do dia 23/03/2001. Para a distribuição das amostras foram consideradas três faixas de variação da resposta espectral. Uma correspondente à resposta da alta biomassa (amarelo escuro na Figura 3) e duas outras referentes, respectivamente, média (amarelo claro) e baixa (verde) biomassas. Sobre estas manchas, então, foram distribuídos 60 pontos de amostragem, conforme Figura 3.

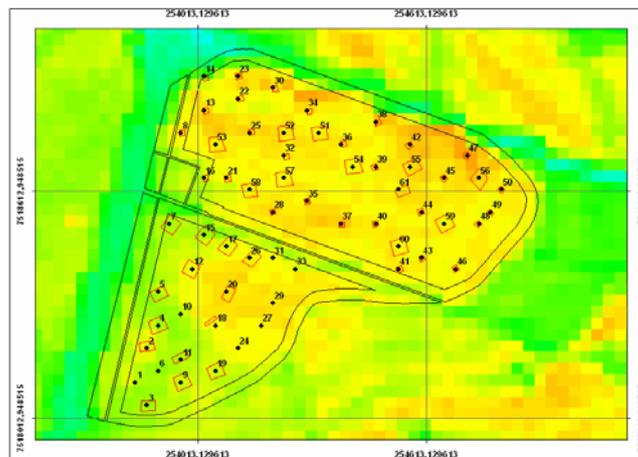


Fig. 3 – Distribuição espacial das amostras sobre uma imagem referente a banda 4, considerando a variação espacial da biomassa de cana-de-açúcar.

As amostras foram formadas por dois tipos de parcelas: uma de 10 linhas de 1,5m de largura por 15m de comprimento ($225,0m^2$), e outra formada por 26 linhas de 1,5m de largura por 40m de comprimento ($1560m^2$), buscando-se utilizar dimensões semelhantes a

resolução espacial da imagem LANDSAT, na tentativa de se obter um valor de produção mais fiel a resposta espectral. As parcelas foram identificadas e delimitadas conforme a Figura 4a.

a)



b)



Fig. 4 – (a) Detalhe de uma parcela demarcada para sua posterior avaliação;
(b) Relação localização/seleção de pixels representativos da resposta espectral

O valor de produtividade foi obtido, na data de 02/11/2001, pela pesagem dos colmos colhidos, que é o mesmo método utilizado pela usina. Cada parcela foi cortada manualmente e carregada individualmente em caminhões, os quais foram pesados no momento da

entrada e saída no pátio da usina, obtendo-se desta forma, o peso líquido da cana-de-açúcar colhida em cada parcela. A produção de cada amostra foi dividida pela área de sua respectiva parcela, a fim de se obter sua produtividade.

Atenção especial foi dada à precisão da localização geográfica e a representatividade da resposta espectral para cada amostra analisada, ilustradas na Figura 4b. Para melhorar a avaliação da localização e auxiliar a determinação da área de cada parcela, foram levantados, com o aparelho GPS, o ponto central e seus limites com precisão sub-métrica, após a correção diferencial, sendo então compatível com dados LANDSAT (pixel de 30m x 30m).

A área de cada amostra também foi calculada através das anotações de campo computando o número de linhas da parcela, considerando o espaçamento de 1,5m, e o seu comprimento médio. Este procedimento possibilitou minimizar os erros de cálculo das áreas ocasionados pelas irregularidades nos limites e no formato das parcelas. Desta maneira, para aumentar o controle de qualidade na estimativa de áreas, as anotações de campo foram comparadas àquelas calculadas pelo levantamento com GPS, e por meio da análise da variação entre estes valores em relação à média, eliminaram-se as amostras que apresentavam coeficiente de variação superior a 10%.

Em relação à representatividade das informações espectrais, foi necessária a realização de análise estatística para cada amostra, utilizando-se para isto, uma janela de 2x2 pixels da imagem, sobre cada ponto de amostragem. As amostras foram representadas pela média dos quatro pixels selecionados e através da análise do coeficiente de variação foi determinada a sua representatividade como padrão de resposta espectral.

A metodologia de coleta de dados de campo, do segundo ano de estudo, referente à safra 2001/2002, sofreu algumas adaptações devido aos resultados e dificuldades experimentais encontradas no primeiro ano. Assim a descrição metodológica a seguir, procurou dar ênfase às mudanças metodológicas realizadas.

As amostras que apresentaram valores superiores a 10% de variação foram eliminadas.

A utilização do valor médio da resposta espectral e análise de sua variação auxiliou na eliminação das amostras representadas por pixels que se encontravam em uma região de transição entre os padrões de resposta espectral ou que estavam sofrendo interferência de outros alvos como falhas e carregadores.

Após a seleção das amostras, foi realizada a análise geral da correlação entre os dados de produtividade e seus respectivos valores espectrais obtidos dos índices de vegetação: RATIO, NDVI, TVI, SAVI, ARVI, GARI, GNDVI e GVI. Esta análise foi aplicada nas duas imagens adquiridas em 23/03/2001 e 02/11/2001 e ainda considerando os valores de nível de cinza (NC), reflectância aparente (ref. ap.) e reflectância de superfície (ref. sup.). A correlação foi representada pelo coeficiente de correlação e foi calculada entre os valores radiométricos e a produtividade do final do ciclo, isto é 02/11/2001.

Primeiro, foi realizada a seleção dos talhões que se apresentavam com as características mais próximas possível daquelas do primeiro ano de estudo em relação à variedade, estágio de corte e ambiente de solo, de acordo com o banco de dados da usina.

Para melhor representá-las, as amostras foram unidas em três grupos de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Descrição dos grupos de amostras analisadas no segundo ano.

	Grupo	Nº de amostras	Variedade	Estágio de Corte	Ambiente de Solo	Ciclo (meses)
Primeira Campanha	1	5	SP80-1842	4 Corte	A	9
	2	11	SP80-1816	4 Corte	A e B	9
	3	4	SP80-1816	5 Corte	B	6
Segunda Campanha	1	4	SP80-1842	4 Corte	A	11,5
	2	12	SP80-1816	4 Corte	A e B	11,5
	3	4	SP80-1816	5 Corte	B	8,5

Os pontos de amostragem foram distribuídos sobre uma área de 660 ha que, por sua vez, foi superior a área analisada no primeiro ano. Este aumento foi necessário, para caracterizar melhor, a amplitude nos valores de produtividade e resposta espectral, promovendo um melhor ajuste dos dados analisados às variações da cultura, encontradas no campo.

Os resultados obtidos no primeiro ano de estudo orientaram a escolha de novos períodos para o estudo da relação entre a biomassa e sua resposta espectral. Com isso, foram realizadas duas campanhas de coleta de dados de produtividade e resposta espectral. A 1ª campanha realizada em 27/04/2002 compreende o período em que a cultura se encontrava em seu máximo desenvolvimento vegetativo, cerca de 2 a 3 meses antes da colheita. A 2ª campanha foi realizada no final do ciclo da cultura, de 2 a 5 dias antes da colheita. Desta forma, foi possível acompanhar a evolução da biomassa no período que antecede a colheita. Para grandes variações de biomassa, da 2ª campanha para a 1ª campanha, poderia levar a supor que a data escolhida não era adequada, pois a cultura ainda modificou a biomassa. O contrário reforçaria a escolha da data.

A metodologia para distribuição dos pontos de amostragem no campo seguiu os mesmos critérios utilizados no primeiro ano, baseando-se na resposta espectral da banda 4, uma vez que, as variações encontradas nesta banda, referente ao infravermelho próximo do espectro eletromagnético, correspondem, para efeito de análise preliminar, à variação da biomassa do dossel em estudo. No entanto, as amostras

foram distribuídas aos pares de forma a representar os diferentes padrões de resposta espectral identificados na imagem de 10/03/2002. Cada par de amostras serviu para atender as duas campanhas supondo que elas representassem a mesma resposta. A primeira amostra foi colhida em 27/04/2002 e a segunda colhida em 16/07/2002. A diferença de biomassa entre as duas datas teve o objetivo de verificar o desenvolvimento da planta no intervalo de pouco crescimento, isto é, no período seco. Foi distribuído o total de 40 amostras e colhidas 20 amostras por campanha.

A dificuldade de coleta de amostra no interior dos talhões, constatada no primeiro ano, fez com que as amostras de produtividade fossem coletadas próximas ao carreador. No entanto, para compensar o efeito de bordadura sofrido pelas plantas que se encontravam próximas ao carreador, a área amostral não variou muito, mas as dimensões de 20 linhas, ou seja, 30m de largura por 50m de comprimento totalizando a área de 1500m², sofreram modificações, diminuição na largura e aumentando no comprimento. A cada campanha foi realizada a demarcação, corte manual, carregamento e pesagem de cada amostra.

Foram utilizados os mesmos procedimentos para a localização e cálculo da área de cada amostra utilizadas no primeiro ano de estudo.

Em relação à coleta das informações espectrais, devido à maior distância entre as amostras, foi possível aplicar uma janela de 3x3 pixels e selecionar o pixel central para representar a resposta espectral de uma determinada amostra.

Tabela 2 – Coeficientes de Correlação obtidos entre a produtividade e a resposta espectral.

*correlações significativas a 1%

	Coeficiente de correlação (r)*					
	Imagem de 23/03/2001			Imagem de 02/11/2001		
	NC	Ref. ap	Ref. sup.	NC	Ref. ap	Ref. sup.
RATIO	0.694	0.708	0.686	0.370	0.387	0.372
NDVI	0.691	0.707	0.686	0.375	0.391	0.379
TVI	0.690	0.707	0.686	0.376	0.392	0.381
SAVI	0.691	0.708	0.687	0.375	0.391	0.379
ARVI	0.590	0.590	0.630	0.418	0.417	0.374
GARI	0.626	0.609	0.619	0.381	0.378	0.353
GNDVI	0.705	0.685	0.623	0.244	0.285	0.302
GVI	0.720	0.729	0.726	0.325	0.304	0.294

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das 60 amostras distribuídas no campo, no primeiro ano de estudo, 9 foram perdidas durante o processo de colheita, outras 4 amostras, foram eliminadas por apresentarem variação superior a 10% na área, entre os dados obtidos pelas anotações de campo e os dados do levantamento realizado com GPS. E ainda, duas amostras foram eliminadas por

apresentarem variação superior a 10% na média da resposta espectral da janela de 2x2 pixels. Um total de 45 amostras foi utilizado na análise final dos dados de produtividade e resposta espectral do primeiro ano.

A Tabela 2 apresenta os valores do Coeficiente de Correlação (r) encontrados para as correlações entre os dados de produtividade e sua

resposta espectral nas duas imagens adquiridas no primeiro ano de estudo. A resposta espectral foi representada pelos valores de NC (nível de cinza), reflectância aparente (ref. ap.) e reflectância de superfície (ref. sup.).

Os dados da Tabela 2 mostram, de modo geral, um maior Coeficiente de Correlação entre produtividade e resposta espectral para as condições da imagem de 23/03/2001. Os valores de coeficiente de correlação não apresentaram diferenças significativas em relação à resposta espectral dada em NC, ref. ap e ref. sup., mostrando com isso que a correção dos efeitos atmosféricos sobre a reflectância da cultura não influenciou a correlação entre a produtividade e sua resposta espectral.

Ao analisar os valores de r obtidos das amostras (valores radiométricos) da imagem de 23/03/2001 observa-se uma não diferenciação abrupta dos valores de correlação da produtividade com a resposta espectral, entre os índices de vegetação, exceto pelo GVI, o qual incorpora mais informações pois considera todas as bandas, menos as termais. Os índices de vegetação RATIO, NDVI, TVI, SAVI e GNDVI apresentaram valores semelhantes e superiores aos índices ARVI e GARI. O fato dos índices ARVI e GARI não apresentarem valores de correlação maior

Tabela 3: Valores de r para as variáveis GVI e GNDVI, com a produtividade.

	15x15 m	40x40 m
GNDVIap	0,511	0,700
GVIap	0,647	0,684
GNDVIsup	0,292	0,689
GVIsup.	0,657	0,680
GVIinc	0,646	0,683
GNDVInc	0,542	0,720

121

pode ter sido porque levam em consideração, nas suas formulações, a componente atmosfera e, com a correção atmosférica, realizada no processo de tratamento de imagens, o fator antes considerado, pode ter sido anulado. Como os outros índices não incorporam este fator, supõe-se que, as correlações entre as variáveis e a produtividade não foi influenciada pela atmosfera, assim apresentaram-se maiores para os índices ARVI e GARI.

Os valores da Tabela 2, mostraram que, os índices referentes a imagem de 23/03/2001 se relacionaram bem com a produtividade do final do ciclo, terminado em novembro de 2001. Destaca-se portanto, que são 8 meses antes. A Tabela 3 mostra valores de correlação entre algumas variáveis estudadas neste trabalho com a produtividade, sob o ponto de vista de tamanho da amostra. O que acontece com elas também aconteceu com as outras variáveis. Ficou claro o aumento de r das amostras 15 x15 m para amostras de 40 x 40 metros. A melhora aconteceu porque as amostras de 15 X 15 m apresentaram-se muito imperfeitas, em termos de forma, causando dispersão nos valores de área. Além disto, como a cultura da cana-de-açúcar é uma cultura extremamente variável em termos de biomassa, pequenas áreas tendem a não mostrar a realidade da distribuição.

A Tabela 4 apresenta os valores do Coeficiente de Correlação (r), encontrados entre os dados, levando em conta todas as amostras de produtividade e a resposta espectral, no segundo ano do estudo. A resposta espectral obtida através de índices de vegetação foi representada em valores de nível de NC, ref. ap e ref. sup.

Tabela 4 – Coeficientes de Correlação entre a produtividade e resposta espectral.

Resposta espectral	Coeficiente de Correlação (r)*					
	Imagem de 27/04/2002			Imagem de 16/07/2002		
	NC	Ref. ap	Ref. sup.	NC	Ref. ap	Ref. sup.
RATIO	0.527	0.507	0.415	0.096	0.075	0.259
NDVI	0.513	0.489	0.403	0.091	0.066	0.256
TVI	0.511	0.487	0.403	0.089	0.064	0.256
SAVI	0.514	0.491	0.406	0.092	0.068	0.252
ARVI	0.383	0.352	0.405	0.137	0.174	0.256
GARI	0.412	0.378	0.420	0.135	0.197	0.320
GNDVI	0.601	0.570	0.419	0.138	0.056	0.359
GVI	0.672	0.691	0.691	0.278	0.300	0.311

Obs.: Os valores em negrito destacam as melhores correlações encontradas.

* correlações com nível de significância de 1%.

Analisando-se os valores de r obtidos a partir das amostras da primeira campanha, 27/04/2002, observou-se maior correlação da produtividade com a resposta espectral dos índices de vegetação GVI e GNDVI. Comparando-se os valores do Coeficiente de Correlação entre as duas imagens adquiridas, pode-se observar que, em 27/04/2002 os dados de produtividade apresentaram melhor correlação com a resposta espectral. Esta maior correlação pode ser explicada pelo estágio avançado de desenvolvimento vegetativo, período em que a cultura se apresentava com alta atividade fotossintética. Enquanto que, em 16/07/2002, a cultura se encontrava no final do ciclo, no estágio de maturação e senescência, com menor atividade fotossintética e, principalmente, devido ao acamamento e influência da palha, que promove variações na resposta espectral as quais não correspondem às variações de produtividade.

PELLEGRINO (2001) constatou este comportamento ao analisar o coeficiente de variação de dados de reflectância de campo para a cultura da cana-de-açúcar, concluindo que a fase de senescência das folhas, quando ocorre o enchimento dos colmos, a quantidade de folhas verdes diminui e a palhada ou folhas secas tornam-se visíveis e passam a influenciar o valor de reflectância de superfície.

Analisando as melhores correlações encontradas na Tabela 4 constatou-se que, os valores de r não diferem em relação aos dados de NC, ref. ap e ref. sup. No entanto, alguns índices como o RATIO, NDVI, TVI, SAVI e GNDVI, apesar de apresentar baixos valores, sofreram uma diminuição na correlação quando os valores foram calculados a partir dos dados de ref. sup. Isto aconteceu porque sem a influência da atmosfera mais valores diferentes apareceram implicando na diminuição da correlação. Estes resultados são corroborados com aqueles encontrados por ZULLO Jr. (1994) e BENVENUTI, (2005).

Tabela 5– Dados de produtividade e sua resposta espectral referente às duas campanhas de 2002

1ª Campanha (27/04/2002)					2ª Campanha (16/07/2002)					Diferença 2ª - 1ª Campanha*		
grupo	amostra	prod.	GNDVI	GVI	grupo	amostra	prod.	GNDVI	GVI	prod.	GNDVI	GVI
		(ton/ha)		(ref. sup. %)			(ton/ha)		(ref. sup. %)	(ton/ha)		(ref. sup. %)
1	1	69,12	0,69	26,42	1	21	71,81	0,74	24,53	2,69	0,05	-1,89
1	2	55,66	0,63	24,2	1	22	61,17	0,76	24,72	5,51	0,12	0,52
1	3	91,17	0,71	32,02	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	----	----	----
1	4	62,57	0,66	25,86	1	23	79,61	0,79	26	17,04	0,13	0,13
1	5	63,59	0,63	26,1	1	24	79,99	0,72	27,31	16,4	0,1	1,21
(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	2	25	59,33	0,72	24,74	----	----	----
2	6	64,97	0,66	26,54	2	26	61,54	0,76	21,85	-3,43	0,1	-4,69
2	7	88,36	0,71	34,09	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	----	----	----
(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	2	27	55,62	0,71	23,9	----	----	----
2	8	92,39	0,73	34,28	2	28	78,07	0,83	26,62	-14,32	0,1	-7,66
2	9	71,29	0,72	29,3	2	29	109,7	0,71	23,39	38,41	-0,01	-5,91
2	10	84,24	0,75	33,41	2	30	118,48	0,75	29,1	34,24	0,01	-4,31
2	14	83,68	0,74	37,59	2	34	100,2	0,67	30,44	16,52	-0,07	-7,14
2	15	94,59	0,76	36,7	2	35	82,03	0,72	33,7	-12,56	-0,04	-3,01
2	16	82,54	0,74	37,11	2	36	80,59	0,74	31,22	-1,95	0	-5,89
2	17	77,89	0,76	35,87	2	37	72,32	0,76	30,7	-5,57	0	-5,16
2	19	72,49	0,72	28,67	2	39	81,11	0,7	22,55	8,62	-0,02	-6,13
2	20	75,55	0,73	31,56	2	40	70,67	0,71	27,18	-4,88	-0,03	-4,38
3	11	65,84	0,73	31,96	3	31	67,12	0,77	26,66	1,28	0,04	-5,3
3	12	62,72	0,72	31,69	3	32	64,06	0,74	24,51	1,34	0,02	-7,18
3	13	55,61	0,73	29,08	3	33	57,86	0,8	28,78	2,25	0,07	-0,3
3	18	40,13	0,74	29,85	3	38	39,36	0,8	25,08	-0,77	0,06	-4,77
média =		72,72	0,71	31,11	média =		74,53	0,75	26,65	5,6	0,04	-3,99
desv.pad.=		14,31	0,038	4,08	desv.pad.=		18,74	0,039	3,16	14,29	0,06	2,8

Delta – Diferença entre os valores da 2ª para a 1ª campanha

(1) – pontos onde a cana foi queimada, portanto não houve valores para a 2ª campanha

(2) – são pontos que foram alocados pela perda de algum outro, portanto também possuem valor em uma das campanhas

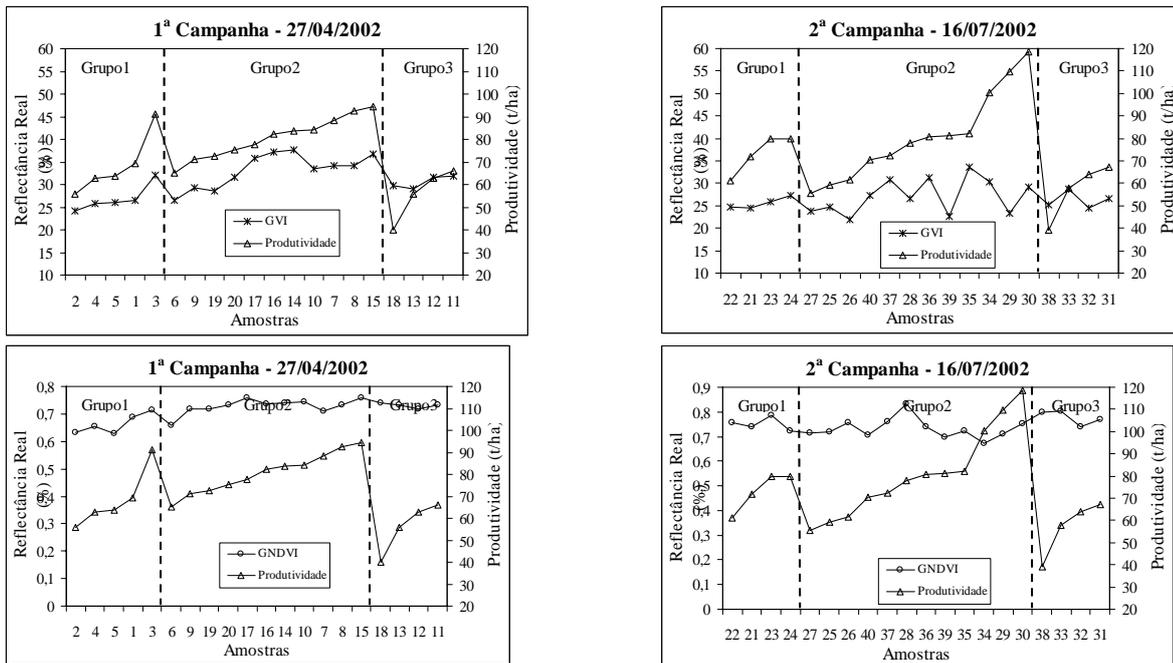


Fig 5. Comportamento dos dados de produtividade dos índices GVI e GNDVI nas diversas amostras pertencentes a duas campanhas realizadas

A Tabela 5 e Figura 5 mostram os valores de produtividade das amostras, coletadas nas campanhas de 27/04/02 e 16/07/02, assim como sua resposta espectral nos índices GVI e GNDVI. Das respostas espectrais analisadas, estes dois índices, foram, os, que melhor se correlacionaram com a produtividade, assim procedeu-se a escolha na representação da resposta espectral das amostras.

A primeira coluna da tabela refere-se aos grupos formados pelas amostras que apresentam características semelhantes de acordo com a Tabela 1.

As amostras pertencentes a 1ª e 2ª campanhas, que se encontram na mesma linha da Tabela 5, buscam representar o comportamento da produtividade e da resposta espectral no intervalo entre estas datas, ou seja, de 2 a 3 meses antes da colheita e 5 dias antes da colheita.

A ocorrência de algumas amostras que não se relacionaram entre as campanhas, como foi o caso da amostra 3 na 1ª campanha, se deve a perda ocasionada por incêndio criminoso em alguns pontos dos talhões analisados, fazendo com que sua colheita fosse antecipada. No lugar destas foram coletadas outras para suprir a lacuna.

Pode-se constatar que a variação apresentada pela produtividade da 2ª campanha para a 1ª campanha apresentou variações ora negativas ora positivas. Segundo a proposição da metodologia, a idéia de verificar se a biomassa sofreria grandes mudanças entre a data de coleta das amostras da 1ª campanha (27/04/2002), três meses antes da colheita até a data de 16/07/2002 (2ª campanha- 5 dias antes da colheita) e em havendo mudanças substanciais de valores , a data

da primeira campanha seria adequada ou não. Assim como os dados mostraram grandes variações não foi possível chegar a uma conclusão. A Figura 5 ilustra bem o fato. Na segunda campanha a variabilidade é bem maior apesar de acompanhar as variações da produtividade. Este resultado já era esperado pela condição em que a cultura se apresentava, isto é, antes da colheita e senescência.

Através dos valores apresentados na Tabela 5 e na Figura 5 buscou-se estudar as mudanças ocorridas no comportamento da produtividade e sua resposta espectral no período de máximo desenvolvimento vegetativo (1ª campanha) até a maturação e colheita (2ª campanha). Estes resultados mostram que, não foi possível representar o mesmo padrão de resposta espectral e, teoricamente, o mesmo padrão de produtividade nos pares de amostras colhidos nas duas campanhas. Diante destes resultados levantaram-se algumas hipóteses que podem ajudar na sua explicação.

A grande variabilidade natural presente na cultura da cana-de-açúcar foi a primeira hipótese levantada. PIEROSI & NEVES (2000), estudando a variabilidade da produtividade da cana-de-açúcar, em duas áreas, uma de 1,4 e outra de 1,8 ha, na Usina São Martinho, com as variedades RB 83-5089 e RB 80-6043, no 3º e 4º cortes respectivamente, observaram variações na produtividade de 20 a 140 ton/ha. Embora os autores ressaltem que os valores muito baixos e muito altos na produtividade foram devido a impactos do elevador da colhedora na caçamba instrumentada, os dados para a cana-de-açúcar, na área estudada, apresentaram alta variabilidade espacial na produtividade.

A análise anterior pode ser corroborada pelos dados das Tabelas 2 e 4. As correlações entre produtividade e resposta espectral foram maiores para a primeira safra (2000-2001). O fato ocorrido leva a crer que com a mudança do formato de área na segunda safra (2001-2002) introduziu maior variação na biomassa determinando que as correlações fossem menores.

Uma outra justificativa para os resultados de produtividade, se baseia na influência da bordadura, uma vez que as amostras foram colhidas próximo aos carregadores. Este procedimento, por ser uma necessidade operacional, determinou a não possibilidade de eliminar as primeiras plantas localizadas próximas ao carregador.

Em relação ao comportamento espectral, os dados mostraram, de uma maneira geral, uma diminuição nos valores de resposta nos índices GNDVI e GVI. Estes resultados, mais uma vez, reforçam a discussão a respeito do comportamento da resposta espectral no estágio de crescimento vegetativo, onde é maior a quantidade de área foliar, a atividade fotossintética e o acúmulo de água no mesófilo da folha enquanto que, no estágio de maturação se apresenta com maior senescência das folhas, menor atividade fotossintética e menor acúmulo de água no mesófilo da folha.

Para algumas amostras a diferença da resposta espectral referente ao índice GVI apresentou valores positivos, contrários à discussão anterior em relação ao padrão de valores negativos encontrados na maioria das amostras. Este comportamento pode se justificar, mais uma vez, pela não correspondência espacial entre os pares de amostras obtidos nas duas imagens devido a variabilidade da cultura da cana-de-açúcar.

Na primeira campanha, onde os gráficos da Figura 5 mostram menor variabilidade, fica mais claro a concordância entre os índices e a produtividade. Pode-se notar também, na primeira campanha que o índice GVI apresentou uma variação crescente acompanhando a produtividade. Por outro lado o GNDVI apresentou valores mais constantes dando a impressão que saturou.

4. CONCLUSÕES

A partir destes resultados alcançados foram apontadas algumas considerações a respeito da metodologia empregada.

1) A data escolhida para a imagem a ser utilizada para locação das amostras se mostrou bem adequada refletida pelo coeficiente de correlação entre variáveis radiométricas da imagem e produtividade do final do ciclo.

2) De qualquer forma que se realizou a amostragem os dados mostraram, sempre, uma variabilidade muito grande, tanto espacialmente quanto temporalmente, mesmo realizando, antes, uma divisão por diferentes faixas de biomassa. A amostragem da segunda

campanha demonstrou ser melhor para representar a variabilidade de biomassa da cana, dado que apresentou mais diferenças de valores.

3) O índice GVI foi mais sensível que o GNDVI apresentou indícios de saturação.

4) As produtividades das amostras de 40 x 40 m foram aquelas que melhor se correlacionaram com os valores radiométricos do sensor, os quais são oriundos de pixels de 30 x 30 metros.

AGRADECIMENTOS

A Fapesp (Projeto n. 99/09091-1) e a Usina São João representada pelos Agônômos João Martins e João Saccomano, pela disponibilização da área de estudo e suporte na coleta de dados e ao Centro de Tecnologia Copersucar pelo também suporte de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENVENUTI, F.A. **Relação de índices de Vegetação com a Produtividade da Cana-de-Açúcar e Atributos Edáficos**. 2005. 98p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

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.

CRIST, E.P.; CICONE, R.C. Application of the Tasseled Cap Concept to Simulated Thematic Mapper Data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 50, p. 343-352, 1984.

EPIPHÂNIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento remoto de três parâmetros biofísicos de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, p.1615-1624, 1991.

GENOVESE, G.; VIGNOLLES, C.; NÈGRE, T.; PASSERA, G. A methodology for a combined use of normalised difference vegetation index and CORINE land cover data for crop yield monitoring and forecasting. A case study on Spain. **Agronomie**, 21, p. 91-111. 2001

JI, L.; PETERS, A.J. Performance evaluation of spectral vegetation indices using a statistical sensitivity function. **Remote Sensing of Environment**, 106:59-65. 2007

HUANG, C.; WYLIE, B.; HOMER, C.; ZYLSTRA, G. Derivation of Tasseled Cap Transformation Based on Landsat 7 at-satellite Reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, 23: 1741 – 1748. 2002.

MACHADO, H.M. **Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat7 –ETM+**. 2003. 71p. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia

Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

McPETERS, R. **Total Ozone Mapping Spectrometer**. <http://jwocky.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone_overhead.html>, 20/02/2002.

PIEROSI, M.A., NEVES, J.L.M. Mapeamento de produtividade da cana-de-açúcar. In: BALASTREIRE, L.A. **O estado da arte da agricultura de precisão no Brasil**. Piracicaba, 2000. 224 p.

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

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.

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, B. F. T. **Dados LANDSAT na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. 114p.

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1985.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data. **International Journal of Remote Sensing**, v.12, p.2477-2484, 1991.

RUDORFF, B. F. T. ; BERKA, L. M. S. ; MOREIRA, M. A. ; Duarte, V. ; Xavier, A. C. ; Rosa, V. G. C. ; SHIMABUKURO, Y. E. . Imagens de satélite no mapeamento e estimativa de área de cana-de-açúcar em São Paulo: ano safra 2003/04. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v. 52, n. 1, p. 21-39, 2005.

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.

XAVIER, A. C. ; RUDORFF, B. F. T. ; SHIMABUKURO, Y. E. ; BERKA, L. M. S. Moreira, M. A. . Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 3-4, p. 755-768, 2006.

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