

Estimativa da produtividade e determinação de zonas de manejo, em culturas de grãos, por meio de videografia aérea multiespectral

João Célio de Araújo^{1*}, Carlos Alberto Vettorazzi² e José Paulo Molin²

¹Escola Agrotécnica Federal de Inconfidentes (Eafi), Praça Tiradentes, 416, 37576-000, Inconfidentes, Minas Gerais, Brasil;

²Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (Esalq), Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo Brasil. Autor para correspondência. email: joaoceleio@eafi.gov.br

RESUMO. O sensoriamento remoto tem sido investigado como uma possível alternativa na geração de mapas de variabilidade espacial em agricultura. O objetivo deste trabalho foi avaliar imagens obtidas por meio de videografia aérea digital multiespectral, quanto ao seu potencial na estimativa da produtividade de grãos e na determinação de zonas de manejo. Foram utilizados mapas de produtividade, referentes às duas áreas cultivadas, primeiramente com trigo, no inverno de 2001 e na sequência com soja, no verão de 2002. As imagens foram corrigidas geometricamente e normalizadas radiometricamente. Foi realizada uma regressão linear simples entre as imagens e os mapas de produtividade, pixel-a-pixel, com resultados diversos para as duas áreas de estudo. O mesmo ocorreu quando foi analisado o grau de concordância, pelo índice Kappa, entre produtividade e dados de imagem. A videografia aérea multiespectral apresenta um bom potencial na determinação de zonas de manejo em áreas que apresentam uma nítida variabilidade espacial.

Palavras-chave: agricultura de precisão, sensoriamento remoto, NDVI.

ABSTRACTS. Grain crops yield estimate and management zones delineation through multispectral aerial videography. Remote sensing has been investigated the generation of spatial variability maps in agriculture as a possible alternative. The objective of this work was to evaluate multispectral aerial digital videographic images, regarding their potential in the grain crops yield estimate and in the delineation of management zones. Yield maps were also used. They refer to the two study areas, cultivated with wheat, in the winter of 2001, and with soybean, in the summer of 2002. The images were geometrically rectified and radiometrically normalized. Simple linear regression was also performed between images and yield maps, pixel-to-pixel, with very different results for the two areas. The same happened when the degree of agreement between crops yield and image data was analyzed through the Kappa Index. Aerial multispectral videography has a good potential in the delineation of management zones in areas with large spatial variability.

Key words: precision farming, remote sensing, NDVI.

Introdução

Com o advento da Agricultura de Precisão, o mapeamento da variabilidade espacial de certos fatores, notadamente o vigor da cultura ou a sua produtividade, em nível de talhão, para fim de gerenciamento localizado, tornou-se uma necessidade. O Sensoriamento Remoto tem sido apontado como possível técnica alternativa à atual metodologia para elaboração de mapas de produtividade, por meio de colhedoras instrumentadas. A produtividade da cultura pode ser estimada a partir de sua relação com o vigor da cultura, que por sua vez, pode ser determinado via sensoriamento remoto, pela sua relação com

determinados índices de vegetação gerados a partir de imagens multiespectrais.

A videografia aérea, ou aerovideografia, é uma técnica que consiste na obtenção de imagens por meio de câmeras de vídeo montadas em plataformas aéreas. A utilização da videografia vem crescendo rapidamente nos últimos anos, devido em especial, à evolução dos equipamentos utilizados, encontrando uma ampla gama de aplicações nas áreas agrícola, florestal e ambiental (Vettorazzi *et al.*, 2000). A evolução tecnológica recente tem revolucionado a aerovideografia. As câmeras digitais, por exemplo, têm apresentado bastante aceitação, pela sua resolução espacial superior aos sistemas analógicos e

pela compatibilidade direta com computadores pessoais (Jung-Sup e Wright, 1999). Mas, sem dúvida, o ponto-chave para o crescimento das aplicações da videografia foi o surgimento das câmeras multiespectrais, com atuação nas faixas do visível e do infravermelho, do espectro eletromagnético de energia. Trabalhos têm demonstrado que o emprego de imagens aéreas abrangendo apenas a faixa do visível não são eficientes na identificação da variabilidade espacial em culturas de grãos. Araújo (2000), por exemplo, realizou um estudo utilizando imagens aéreas obtidas por meio de câmera convencional com filme 35 mm (apenas espectro visível). O autor não encontrou coeficientes de determinação significativos para as análises de regressão realizadas entre as imagens e mapas de produtividade de grãos.

Os primeiros testes com sistemas de vídeo para imageamento aéreo visando ao monitoramento de culturas agrícolas iniciaram-se, segundo Everitt e Escobar (1996), no início da década de 1980, pelo USDA-ARS-RSRU (U.S. Department of Agriculture-Agricultural Research Service_Remote Sensing Research Unit), em Weslaco, Texas.

A videografia pode ser empregada, na agricultura, com vários objetivos, como: mapear a ocorrência de plantas daninhas, pragas e doenças; monitorar o estado nutricional das culturas entre outros. (Everitt e Nixon, 1985). As imagens de vídeo podem ainda gerar dados digitais e índices de vegetação para estimar variáveis das culturas, como altura de plantas, área foliar e produtividade (Richardson *et al.*, 1990; Salvador *et al.*, 2004; Sharp *et al.*, 2004).

Culturas como a soja e o trigo são importantes *commodities* agrícolas e vêm sendo cultivadas por produtores cada vez mais tecnificados. A obtenção de dados dessas áreas, para apoiar tomadas de decisão, está exigindo um dinamismo que, ao menos no que concerne ao vigor da cultura, apenas o sensoriamento remoto pode conferir.

O objetivo deste trabalho foi avaliar imagens obtidas por meio de videografia aérea digital multiespectral, quanto ao seu potencial na estimativa da produtividade de culturas de grãos e na geração de zonas de manejo.

Material e métodos

O trabalho foi realizado em Castro, Estado do Paraná, na região dos Campos Gerais, em áreas de cooperados da Fundação ABC. A região é conhecida por empregar alto nível tecnológico nas atividades agrícolas, apresentando uma produtividade de grãos superior à média nacional. É considerada também como pioneira na utilização do plantio direto em

substituição ao convencional.

A temperatura média anual é de 17°C e a precipitação anual fica em torno de 1300 mm. A sucessão de culturas é realizada principalmente entre as culturas da soja, milho e feijão no verão e trigo e aveia preta no inverno. Este trabalho foi desenvolvido em duas áreas de estudo, onde são aplicadas técnicas de agricultura de precisão: área 1 (32 ha), de coordenadas 24°50'53"S e 50°20'36"W e área 2 (16 ha), de coordenadas 24°53'05"S e 50°16'36"W. De maio a setembro de 2001 a área 1 foi cultivada com trigo da variedade CD-105 e a área 2 com a variedade CV OR-1, ambas com 0,17 m entre linhas. No verão seguinte (novembro de 2001 a fevereiro de 2002) as duas áreas foram cultivadas com soja da variedade FT-Abyara, cultivada com 0,40 m entre linhas. A altitude da área 1 varia de 778 m a 806 m e a altitude da área 2 de 869 m a 910 m (Figura 1). As altitudes foram obtidas por meio do GPS (Global Positioning System) com correção diferencial, instalado na colhedora.

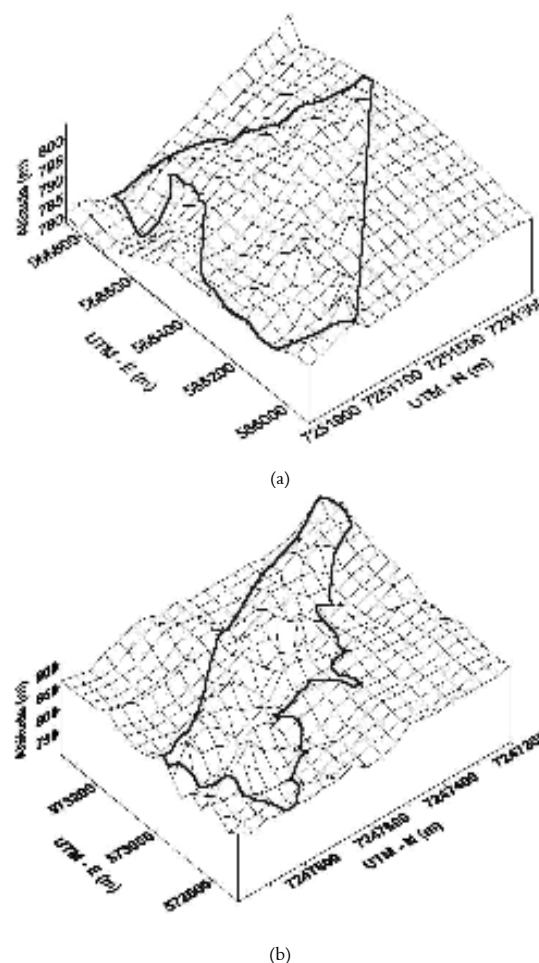


Figura 1. Modelo numérico digital: área 1 (a) e área 2 (b)

Foram obtidas imagens das duas áreas, nas duas épocas, com uma câmera de vídeo digital multiespectral (Duncantech MS3100), com alta resolução espacial (um metro) em três faixas co-registradas que utilizam um prisma com três sensores de imagem CCDs (“charge-coupled device”), que cobrem as regiões espectrais do azul (450 - 520 nm), verde (520 - 600 nm), vermelho (630 - 690 nm) e infravermelho próximo (760 - 1100 nm). A câmera captura até 7,5 quadros por segundo e proporciona a exibição da composição colorida ou bandas individualizadas. O ajuste do ganho e o controle de tempo de exposição são independentes para cada canal.

Processamento dos mapas de produtividade

Os mapas de produtividade referentes às safras do trigo de 2001 (áreas 1 e 2) e o referente à safra da soja de 2002 (área 1), foram cedidos pela Fundação ABC, para a realização deste trabalho. Os mapas brutos foram processados no software SSToolbox 3.1, com interpolação pelo Método do Vizinheiro Mais Próximo (Nearest Neighbor). Esse método determina o valor de um ponto levando em consideração os valores mais próximos dele e é empregado nos casos onde os dados cobrem quase por completo a área, sendo efetivo para preencher os espaços vazios nos dados.

Posteriormente a produtividade foi classificada em cinco classes, utilizando-se a opção “*Natural Breaks*”. Essa opção tem o propósito de possibilitar uma observação prévia do comportamento da distribuição da variabilidade espacial. Essa é uma classificação padrão do software ArcView 3.2, identificando os pontos limite de cada classe utilizando um modelo estatístico que baseia-se na minimização da soma da variância dentro de cada classe.

Visando-se à análise da potencialidade das imagens na geração de zonas de manejo, os mapas de produtividade, bem como as imagens, foram reclassificados em duas classes, uma de baixa e outra de alta produtividade, por facilitar a visualização das mesmas no campo e o maior entendimento das áreas analisadas. Nessa etapa, a classificação baseou-se na determinação do valor médio observado no histograma de cada mapa, como sendo o limiar entre as duas classes.

Obtenção e tratamento das imagens

As imagens foram obtidas entre 2000 m e 3000 m de altura, proporcionando imagens com resolução espacial de um metro. As imagens do trigo foram obtidas em agosto de 2001 e as da soja em fevereiro de 2002. A época escolhida para os sobrevôos foi a

do máximo desenvolvimento vegetativo das culturas, período precedente ao florescimento, sendo no caso da soja o estágio R1 e do trigo o estágio 10.5 (Embrapa, 2003).

Essas épocas foram consideradas de maior relevância para a estimativa da produtividade e também para a determinação do NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada). Yang *et al.* (2000) afirmam que dados obtidos por imagens aéreas digitais usualmente são utilizados para a identificação do desenvolvimento espacial e temporal das plantas analisadas na agricultura de precisão, e as imagens adquiridas no período próximo ao máximo desenvolvimento vegetativo das culturas de grãos mostram padrões mais estáveis e mais representativos, sendo a melhor época para a estimativa da produtividade.

O avião utilizado foi um Cessna 180, monomotor, com um orifício no assoalho, característica fundamental para a realização do trabalho, pois a câmera foi ajustada a esse orifício, por meio de um suporte, mantendo-a na posição vertical em relação ao solo durante a tomada das imagens. A câmera foi ligada a um computador com monitor, para o acompanhamento em tempo real das imagens capturadas.

Devido à altura de voo escolhida (entre 2000 e 3000 metros), houve casos em que toda a área a ser imageada não ficou inserida em um único quadro, sendo necessária a realização do mosaico, que é a fusão entre imagens. Para uma mosaicagem perfeita são necessárias a correção geométrica e a normalização radiométrica das imagens, promovendo a união entre elas sem que haja a percepção da mesma. A normalização radiométrica foi realizada visando a eliminar as distorções procedentes das condições de iluminação na tomada das imagens, os vãos foram realizados próximo ao meio-dia. O deslocamento de posição da câmera na tomada das imagens altera os níveis de cinza de um mesmo alvo, de uma imagem para a seguinte. A finalidade da normalização foi alterar os valores de nível de cinza das imagens, tomando-se uma como referência, para simular condições semelhantes de luminosidade.

A normalização radiométrica foi realizada manualmente, por meio da verificação dos valores de nível de cinza em três janelas de 25 pixels (5 x 5), com coordenadas conhecidas e idênticas, na área comum das imagens a serem mosaicadas. Com os valores dos pixels conhecidos, foi determinada a variação numérica entre os mesmos para cada ponto. A média de variação de três janelas de 25 pixels cada foi utilizada como parâmetro de variação entre as

duas imagens e este valor foi adicionado ou subtraído de uma das imagens por meio de alterações nos valores dos pixels realizadas no Idrisi32. A Figura 2 apresenta um exemplo de uma janela retirada das imagens a serem mosaicadas.

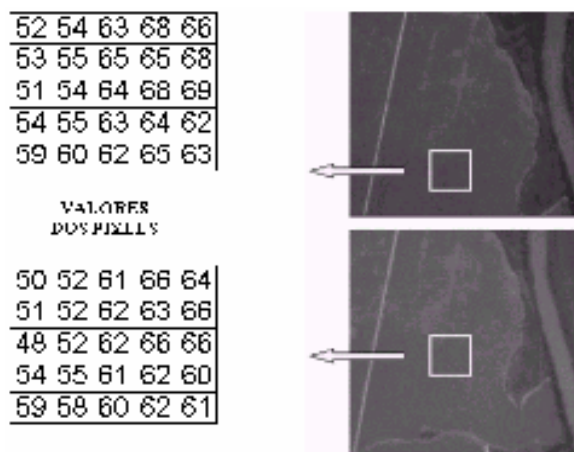


Figura 2. Processo de normalização radiométrica: extração dos valores dos pixels em uma janela de 5 x 5.

A correção geométrica das imagens foi realizada por meio das coordenadas de alvos (placas de 1 m²) dispostos em pontos estratégicos da área e georreferenciados por GPS (Global Positioning System), com correção diferencial em tempo real DGPS (Diferential GPS). A correção geométrica, ou georreferenciamento, tem como objetivo reorganizar os pixels da imagem em relação a um determinado sistema de projeção cartográfica (Novo, 1995).

Farret e Giotto (1997) afirmam que a melhor geometria para os pontos de controle (alvos) no processo de correção geométrica de imagens aéreas é aquela baseada na distribuição dos mesmos nos cantos da imagem, contrariando hipóteses de que pontos de apoio próximos ao centro da imagem levariam a melhores resultados.

O georreferenciamento foi realizado com os mosaicos prontos. As imagens que formam a área foram montadas no software "Aldus PhotoStyler". Esse mosaico foi exportado para o software Idrisi32 e então georreferenciado. Nesse processo o usuário identifica as coordenadas X e Y de pares de pontos que representam o mesmo lugar, no antigo e no novo sistema de coordenadas. As coordenadas do novo sistema foram obtidas por meio de DGPS, como descrito anteriormente. Utilizando-se a opção "Edit" criou-se um arquivo de correspondência contendo os pares de coordenadas: primeiramente as coordenadas X e Y de imagem e na sequência as coordenadas reais obtidas no campo. É então resolvida uma equação que descreve a relação entre os dois sistemas de coordenadas. Com essa operação

o arquivo é convertido para o novo sistema de referência por meio de uma transformação do tipo "rubber sheet", para adequá-la a um sistema particular de referência.

A interpolação utilizada neste estudo para o georreferenciamento foi a alocação por meio do vizinho mais próximo, descrito anteriormente. Segundo Novo (1995), em casos nos quais a imagem de entrada contém valores quantitativos, esse é o método mais apropriado, devido à não alteração dos valores originais dos níveis de cinza.

O modelo matemático utilizado foi o modelo polinomial que, de acordo com Rosa (1990), possui como principal fundamento os pontos de controle, definidos como uma característica detectável na imagem, com localização geográfica precisamente conhecida e preferivelmente invariável com o tempo. Ainda segundo o autor, o desempenho destes pontos no georreferenciamento depende do seu número, distribuição e acurácia de localização.

Com esse modelo matemático foi gerado o erro médio quadrático, denominado RMS – *Root Mean Square*, que quantifica a variabilidade das medidas em relação aos seus verdadeiros valores. A diferença entre esses valores é elevada ao quadrado e somada; o resultado da soma é dividido pelo número de pontos para se obter, então, um desvio quadrado (Eastman, 1997). Cada ponto é mostrado individualmente e numerado de acordo com a ordem em que aparece no arquivo de correspondência. Esses resíduos expressam quanto cada ponto de controle desvia-se da equação de melhor ajuste.

O RMS total descreve o erro de posicionamento característico de todos os pontos de controle em relação à equação. Ele descreve a probabilidade com o qual uma posição mapeada poderá variar da sua localização verdadeira. O erro RMS é diretamente comparável ao conceito de desvio padrão. De acordo com a literatura, o RMS para imagens deve ser menor que a metade da resolução espacial da imagem a ser corrigida, ou seja, neste trabalho o RMS deveria ser menor que 0,5 m. Em contrapartida, mesmo com imagens com resolução espacial de um metro, foram empregados pixels com dimensões de (5 m x 5 m) para imagens e mapas de produtividade, portanto tornando os valores médios de RMS obtidos no trabalho (1,2 metros), aceitáveis.

O produto obtido a partir da cobertura videográfica são composições coloridas falsa cor (RGB) e, utilizando o software *Aldus PhotoStyler*, essas imagens foram separadas em três bandas (verde, vermelho e infravermelho próximo) e convertidas para 8 bits (256 níveis de cinza).

A partir das bandas individuais georreferenciadas foram geradas imagens representativas dos índices de vegetação da diferença normalizada (NDVI) (Eastman, 1997).

Por último, foi aplicada uma “máscara” às imagens, isolando-se a área de estudo do restante da imagem. O processo foi realizado no software Idrisi32, para onde foram exportados os mapas de produtividade. Esses mapas foram reclassificados, por meio da função “reclass”, em que os valores correspondentes à área de estudo assumiram o valor “1” e a área externa assumiu o valor “0”, formando assim a “máscara” utilizada no trabalho.

Multiplicando-se as “máscaras” (opção “overlay”) pelas imagens correspondentes, obtiveram-se novas imagens, contendo apenas as áreas de interesse.

As classificações das imagens em cinco e depois em duas classes foram realizadas pelo mesmo procedimento empregado nos mapas de produtividade, descrito anteriormente.

Determinação dos índices de vegetação

Existem vários índices de vegetação, mas o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o índice Razão Simples (RS), são amplamente utilizados em trabalhos relacionados à agricultura de precisão. Segundo Jackson e Huete (1991), do ponto de vista matemático, esses dois índices são equivalentes e contêm as mesmas informações. Neste trabalho foi utilizado exclusivamente o NDVI (Equação 1):

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad (1)$$

Em que:

IVP = reflectância medida na faixa espectral do infravermelho próximo;

V = reflectância medida na faixa espectral do vermelho.

A opção NDVI, no Idrisi32, exige então a entrada da imagem nas bandas do vermelho, do infravermelho próximo e o nome do arquivo de saída, ou do resultado da operação. A imagem NDVI apresenta uma legenda com valores dentro da faixa de (-1 a 1). Os valores negativos foram descartados, pois não correspondiam a vegetação, considerando-se, assim, apenas a faixa compreendida entre (0 a 1), em que valores próximos a 1 correspondem a um alto vigor vegetativo.

Análise dos resultados

Foi feita a análise de regressão simples entre mapas e imagens, no software Idrisi32, que apresenta um conjunto de opções estatísticas, dentre elas a

determinação do coeficiente de correlação (r) e do coeficiente de determinação (r²) para as análises realizadas, além do ajuste do modelo de regressão e a análise de variância utilizada para o teste do ajuste da equação.

Um método eficiente de comparação entre mapas no formato raster é fazer uma sobreposição e uma avaliação pixel-a-pixel, de modo a identificar as áreas de concordância entre os mapas, dois a dois. Para expressar o grau de concordância entre os mapas classificados em um único valor usou-se o índice Kappa (Landis e Koch 1997).

O índice Kappa assume um valor máximo igual a 1 (um), no qual os valores mais elevados representam maior correspondência entre as classes dos dois mapas considerados.

A Tabela 1 apresenta o grau de concordância entre imagens, em função do valor do índice Kappa.

Tabela 1. Classificação qualitativa do índice Kappa

Índice Kappa	Grau de concordância
< 0,00	Péssimo
0,00 – 0,20	Ruim
0,21 – 0,40	Razoável
0,41 – 0,60	Bom
0,61 – 0,80	Muito Bom
0,81 – 1,00	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977)

Resultados e discussão

Imagens aéreas para as culturas da soja e do trigo

As Figuras 3 e 4 apresentam as imagens aéreas, nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, obtidas, respectivamente, das culturas da soja e do trigo, para a área 1.

No caso da área 2, foram realizados vôos nos dois períodos referentes às culturas da soja e do trigo. Por motivos técnicos, as imagens referentes à cultura da soja não apresentaram a qualidade necessária ao trabalho e foram descartadas.

A Figura 5 apresenta as imagens aéreas da cultura do trigo, para a área 2, nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo.

Análise preliminar visual da relação entre mapas de produtividade e imagens NDVI

A Figura 6 ilustra o mapa de produtividade para a cultura da soja, referente à área 1, indicando uma variação nos valores de produtividade entre 1,38 t/ha e 6,54 t/ha, distribuídos em cinco classes.

Visualmente definiram-se áreas correspondentes, comparando-se a produtividade e a imagem NDVI. Alguns pontos com menor valor de NDVI relacionaram-se com alguns pontos de menor produtividade para a cultura da soja.



Figura 3. Imagens referentes à área 1: cultura da soja nas bandas do vermelho (a) e do infravermelho próximo (b).



Figura 4. Imagens referentes à área 1: cultura do trigo nas bandas do vermelho (a) e do infravermelho próximo (b).

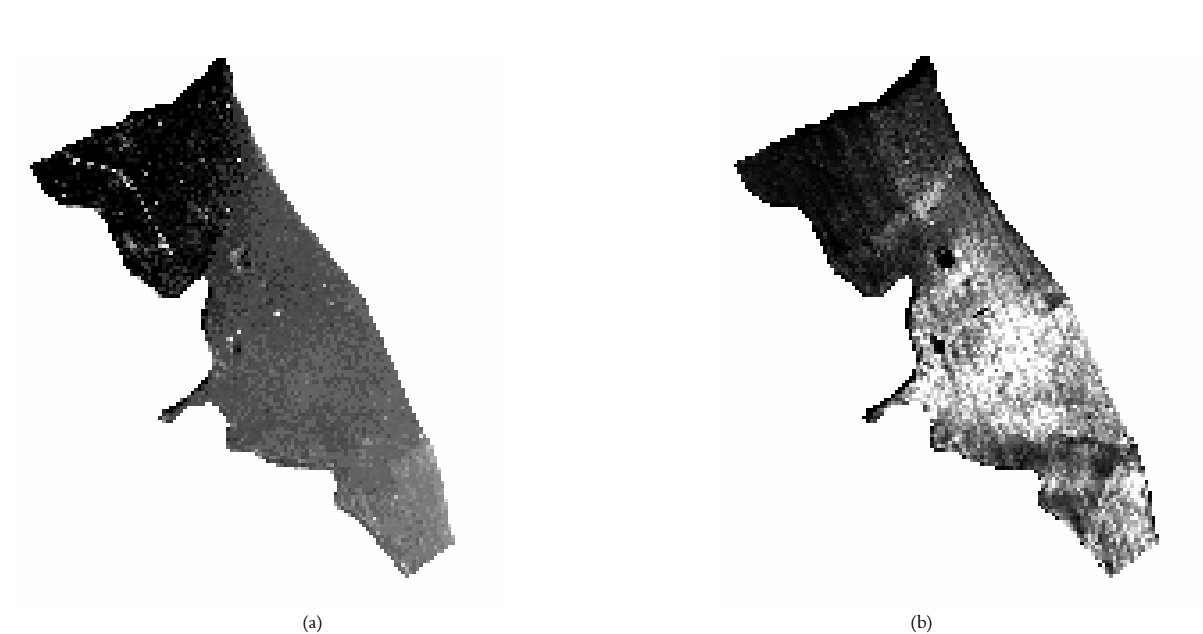


Figura 5. Imagens referentes à área 2: cultura do trigo, nas bandas do vermelho (a) e do infravermelho próximo (b).

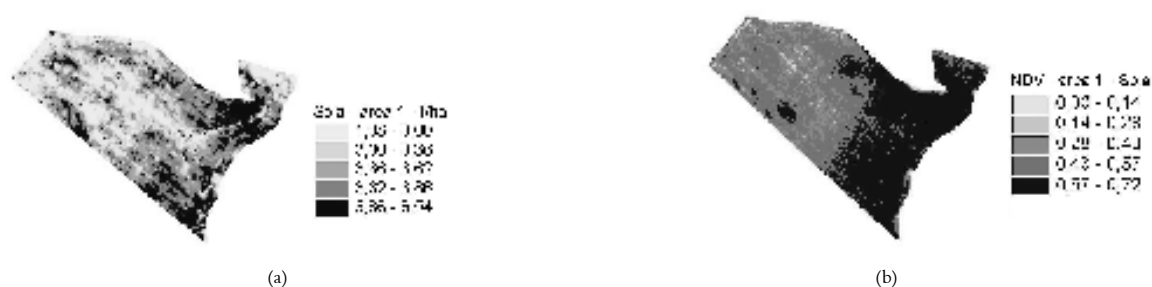


Figura 6. Produtividade da cultura da soja na área 1 (a) e imagem NDVI da mesma área (b), divididas em cinco classes.

Essa constatação também foi verificada, com um grau mais acentuado, quando da realização de uma análise visual entre a produtividade da cultura do trigo, para a área 1 e os valores de NDVI (Figura 7), obtidos para a mesma cultura e área.

O mapa de produtividade para a cultura do trigo (Figura 7), referente à área 1, apresenta uma variação de valores de produtividade entre 0,72 t/ha a 4,75 t/ha, distribuídos em cinco classes. Na imagem NDVI, a variação do índice ficou entre 0,0 e 0,6, com os valores também classificados em cinco classes, para facilitar a comparação com a produtividade. Percebe-se que existe uma correspondência visual nítida entre as áreas correspondentes às maiores produtividades (2,58 t/ha a 4,74 t/ha) e as classes com os maiores valores de NDVI. Da mesma forma, os pontos de menor produtividade correspondem visualmente aos pontos nos quais os valores de NDVI foram menores.

O estudo realizado na área 2 envolveu a cultura do trigo. O mapa de produtividade dessa área também foi dividido em cinco classes, com uma variação nos valores entre 0,51 t/ha e 4,70 t/ha e entre 0,00 e 0,78 para os valores de NDVI (Figura 8).

Diferentemente dos outros dois casos, quando se procedeu à análise visual para essa área, não foi observada a coincidência entre pontos de maior produtividade com pontos de maior valor para o índice de vegetação e vice-versa.

Regressão entre variáveis

As análises de regressão linear entre as variáveis foram realizadas considerando os valores pixel-a-pixel e empregando os valores de produtividade, níveis de cinza no vermelho, níveis de cinza no infravermelho próximo e valores correspondentes ao NDVI. A produtividade foi definida, em todas as situações, como variável dependente e as demais como variáveis independentes.

A Tabela 2 apresenta os resultados das análises de regressão linear simples, com os valores dos

coeficientes de determinação (r^2), por cultura e por área de cultivo.

Tabela 2. Resultado das análises de regressão linear simples, com os valores dos coeficientes de determinação (r^2)

	Produtividades		
	Soja Área 1	Trigo Área 1	Trigo Área 2
Vermelho	0,420	0,578	0,095
Infravermelho próximo	0,500	0,594	0,103
NDVI	0,539	0,819	0,158

Em todas as análises realizadas os valores de r^2 foram maiores para a área 1. Na área 2, não foi possível a obtenção de imagens apropriadas ao estudo, para a cultura da soja, como já comentado, devido a problemas com a câmera.

Foram encontrados valores significativos de r^2 para as regressões realizadas entre o NDVI e as produtividades da soja e do trigo para a área 1. Yang *et al.* (2000) trabalharam com imagens aéreas, obtidas em cinco períodos durante o ciclo da cultura e mapas de produtividade de grãos. Com as imagens foram obtidos índices de vegetação (NDVI) que, correlacionados com a produtividade, geraram coeficientes de determinação de 0,63 na média dos cinco períodos. Da mesma forma, Steven e Millar (1997) encontraram valores de r^2 variando de 0,552 a 0,774 quando correlacionaram imagens do satélite SPOT com mapas de produtividade de grãos.

A regressão com o NDVI apresentou os maiores valores de r^2 para todas as análises realizadas, quando comparada com as bandas isoladas do vermelho e do infravermelho próximo. Excetuando-se as imagens NDVI, os maiores coeficientes de determinação foram encontrados para as imagens individuais da banda do infravermelho próximo e, por fim, do vermelho.

Analisando a área 1, observou-se que a cultura do trigo apresentou maior resposta (valores de r^2), em relação à cultura da soja. Observou-se no mapa de produtividade do trigo (Figura 7), uma definição mais clara das classes de produtividade, quando



Figura 7. Produtividade da cultura do trigo na área 1 (a) e imagem NDVI da mesma área (b), divididas em cinco classes.



Figura 8. Produtividade da cultura do trigo (a) e imagem NDVI (b), na área 2 divididas em cinco classes.

comparado com o mapa de produtividade da cultura da soja (Figura 6), na qual as classes apresentaram-se mais dispersas.

A área 2 apresentou coeficiente de determinação muito baixo, para as duas bandas individualizadas (vermelho e infravermelho próximo). O NDVI apresentou a mesma tendência de estabelecer maior valor do coeficiente de determinação da regressão realizada com a produtividade, mas o valor encontrado foi considerado muito baixo em relação aos valores encontrados para a área 1.

As análises de regressão realizadas entre os mapas de produtividade e as bandas espectrais geraram valores discrepantes entre as duas áreas analisadas no trabalho. A área 1 apresentou coeficiente de determinação, entre produtividade e NDVI, de 0,819 e 0,539 para as culturas do trigo e soja respectivamente. A área 2 apresentou coeficiente de determinação, entre produtividade e NDVI, de 0,158 para a cultura do trigo. A grande discrepância nos valores de regressão encontrados entre as duas áreas analisadas no trabalho gerou questionamentos sobre a causa deste fato.

A análise estatística descritiva realizada para todos os elementos envolvidos no processo de regressão para as duas áreas é apresentada na Tabela 3.

Os coeficientes de variação (CV) para NDVI, das culturas do trigo e da soja na área 1, foram superiores ao valor do coeficiente de variação do

NDVI referente à cultura do trigo na área 2. Verifica-se a tendência de maior coeficiente de determinação na regressão com as produtividades das culturas para as variáveis NDVI que apresentaram o maior CV. Isso permite inferir que a imagem aérea obtida por meio de videografia aérea multiespectral correlaciona-se significativamente com a produtividade quando existe uma variabilidade evidente no vigor da cultura.

A análise realizada para a área 2 demonstrou um valor de curtose elevado para a variável NDVI da cultura do trigo, em relação à mesma variável da área 1, para as culturas da soja e do trigo. Pode-se inferir, dessa constatação, que houve a ocorrência significativa de valores discrepantes na imagem NDVI referente à área 2.

Constata-se também que, em todas as imagens obtidas do espectro do vermelho, ocorreram valores de curtose superiores aos das imagens do espectro do infravermelho próximo. Esse fato permite atribuir a geração de dados discrepantes a um problema de calibração da câmera nessa faixa espectral. Associando-se a questão da baixa variabilidade das imagens obtidas na área 2 com o problema de calibração da câmera na faixa espectral do vermelho, podem ser explicados os baixos coeficientes de determinação entre a produtividade e as imagens obtidas nessa área.

Tabela 3. Resumo estatístico das variáveis de imagem e produtividade para as áreas 1 e 2.

Variáveis	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Variância	Desvio Padrão	Curtose	CV
VE_1_T	64,70	60,00	40,00	181,00	288,66	16,99	7,32	26,26
IV_1_T	131,42	131,00	69,00	179,00	255,82	15,99	-0,29	12,17
NDVI_1_T	0,34	0,36	-0,29	0,60	0,02	0,15	0,63	43,59
PROD_1_T	2,30	2,26	0,77	4,75	0,51	0,71	-1,27	30,95
IV_1_S	204,37	202,00	99,00	255,00	913,83	30,23	-1,07	14,79
VE_1_S	60,54	58,00	40,00	192,00	137,13	11,71	14,80	19,34
NDVI_1_S	0,54	0,56	-0,17	0,72	0,01	0,11	2,71	21,31
PROD_1_S	3,46	3,52	1,39	6,54	0,26	0,51	0,37	14,71
PROD_2_T	2,39	2,37	0,52	4,60	0,31	0,55	0,25	23,14
NDVI_2_T	0,60	0,63	-0,91	0,78	0,01	0,10	22,87	16,33
VE_2_T	48,30	49,00	10,00	208,00	189,71	13,77	9,53	28,52
IV_2_T	197,67	205,00	23,00	255,00	1249,68	35,35	5,17	17,88

VE_1_T: Imagem no espectro do vermelho – área 1 – trigo; IV_1_T: Imagem no espectro do infravermelho próximo – área 1 – trigo; NDVI_1_T: Imagem NDVI – área 1 – trigo; PROD_1_T: Produtividade do trigo – área 1; IV_1_S: Imagem no espectro do infravermelho próximo – área 1 – soja; VE_1_S: Imagem no espectro do vermelho – área 1 – soja; NDVI_1_S: Imagem NDVI – área 1 – soja; PROD_1_S: Produtividade da soja – área 1; PROD_2_T: Produtividade do trigo – área 2; NDVI_2_T: Imagem NDVI – área 2 – trigo; VE_2_T: Imagem no espectro do vermelho – área 2 – trigo; IV_2_T: Imagem no espectro do infravermelho próximo – área 2 – trigo.

Análise das variáveis classificadas em duas categorias

Após a análise pixel-a-pixel, as variáveis foram classificadas em duas categorias de produtividade (Figuras 9, 10 e 11), com vistas à avaliação do potencial para a geração de zonas de manejo, sendo realizada uma análise do grau de concordância entre elas. A classe 1 representa os valores abaixo da média e a classe 2 valores acima da média, para todas as variáveis analisadas, conforme procedimento descrito anteriormente.

A análise pixel-a-pixel é interessante para tratamentos localizados com equipamentos que aplicam produtos em taxas variadas. As imagens e mapas de produtividade apresentam áreas com grande número de classes e são dispostas em várias localizações. Quando se pensa na destinação de áreas

para determinada atividade torna-se inviável segmentar a área em muitas classes, prejudicando a logística da atividade agrícola.

Verificou-se, visualmente, uma forte correlação entre a classe de menor produtividade (classe 1), com a classe de menor valor de NDVI (classe 1), para as variáveis da área 1, cultura da soja (Figura 9).

A área 1, cultura do trigo (Figura 10), apresentou similarmente à cultura da soja (Figura 9), uma forte correlação entre as classes 1 e 2, para as variáveis produtividade e imagens NDVI, vermelho e infravermelho próximo.

A classificação realizada na área 2 (Figura 11), como no caso da correlação visual das imagens originais (sem classificação), não apresentou tendência para nenhuma combinação realizada entre as variáveis.

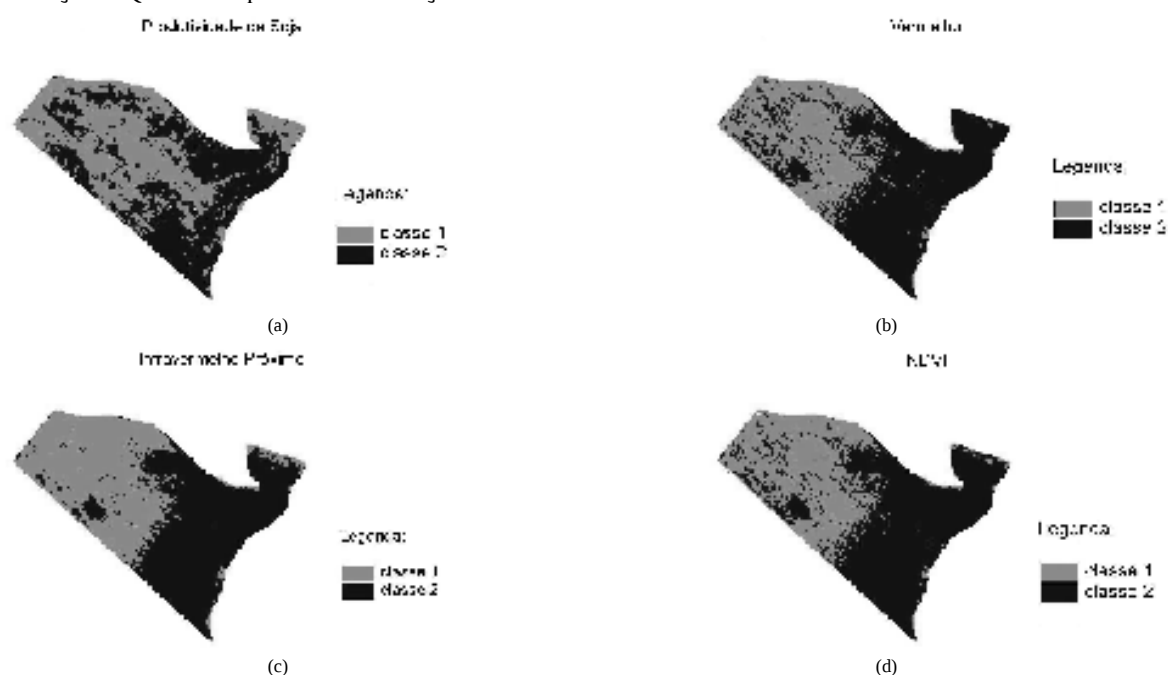


Figura 9. Produtividade da soja (a); imagens das bandas do vermelho (b) e infravermelho próximo (c); imagem NDVI (d), na área 1, classificadas em duas categorias.

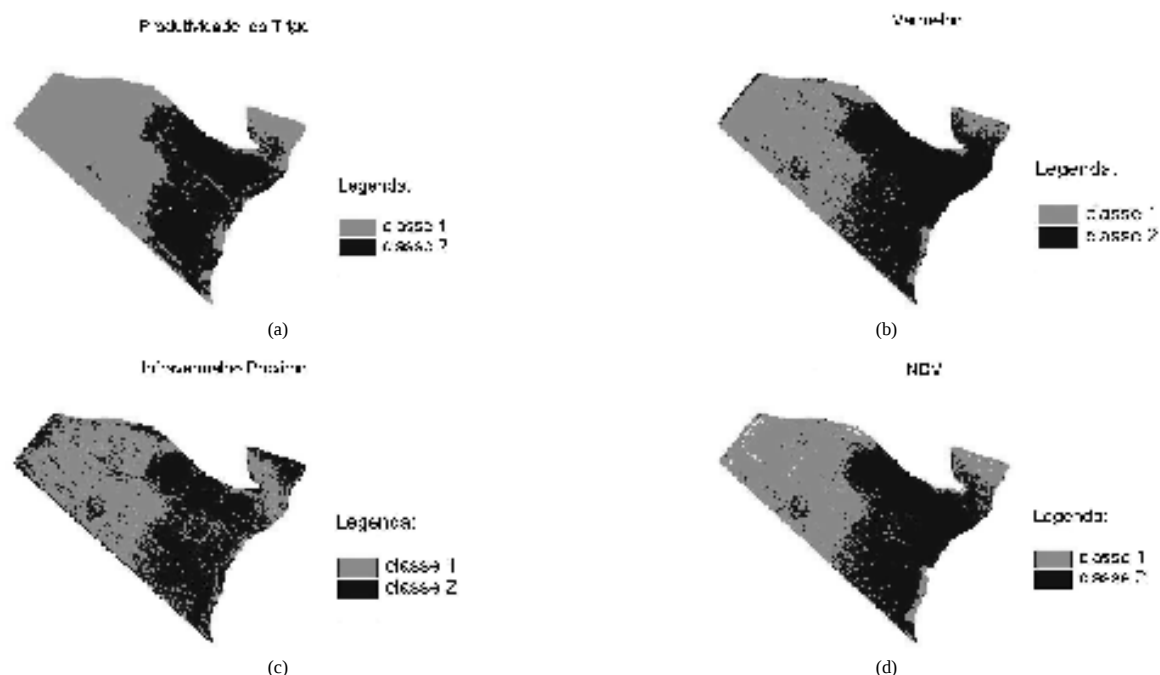


Figura 10. Produtividade do trigo (a); imagens das bandas do vermelho (b) e do infravermelho próximo (c); e imagem NDVI (d), na área 1, classificadas em duas categorias.

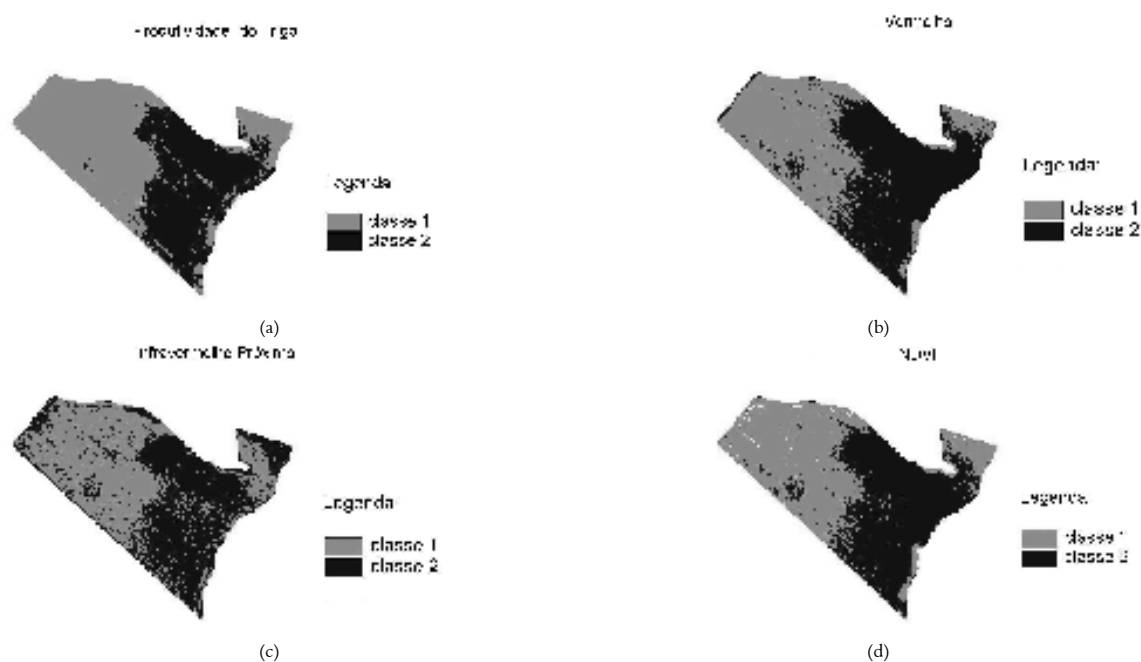


Figura 11. Produtividade do trigo (a); imagens das bandas do vermelho (b) e do infravermelho próximo (c); e imagem NDVI (d), na área 2, classificadas em duas categorias.

Grau de concordância entre as variáveis classificadas em duas categorias

Se recorrermos somente à observação para analisar e comparar os mapas de produtividade e as imagens (em níveis de cinza), não é possível distinguir com objetividade o grau de similaridade

entre as classes; logo, a informação obtida é muito geral e subjetiva, pois é baseada no contraste visual. Para verificar o grau de correspondência entre as imagens classificadas foi utilizado o índice Kappa. As comparações envolvendo a produtividade e as imagens aéreas resultaram nos valores de índice Kappa dispostos na Tabela 4.

Tabela 4. Índice Kappa entre as variáveis de imagem e produtividade classificadas

	Produtividades		
	Soja Área 1	Trigo Área 1	Trigo Área 2
Vermelho	0,622 (muito bom)	0,845 (excelente)	0,432 (bom)
Infravermelho próximo	0,635 (muito bom)	0,718 (muito bom)	0,447 (bom)
NDVI	0,646 (muito bom)	0,854 (excelente)	0,493 (bom)

O NDVI novamente exibiu a tendência de ser mais eficiente em relação às imagens nos espectros do vermelho e do infravermelho próximo no processo de correlação com as produtividades das culturas analisadas. Esses resultados são promissores no que se refere ao emprego de imagens aéreas multiespectrais na geração de zonas de manejo em culturas de grãos.

Conclusão

Para as condições em que o trabalho foi realizado pode-se concluir que:

A imagem NDVI apresenta maior coeficiente de determinação na regressão com a estimativa de produtividade de culturas de grãos, comparada com as bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo;

As imagens obtidas por meio de videografia aérea multiespectral podem gerar relações significativas com as produtividades de grãos;

As imagens obtidas por meio de videografia aérea multiespectral proporcionam informações importantes ao delineamento de zonas de manejo, em áreas que apresentam uma nítida variabilidade espacial.

Referências

- ARAUJO, J.C. *Correlação entre mapas de produtividade de grãos e fotografias aéreas convencionais 35 mm*. 2000. Dissertação (Mestrado)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- EASTMAN, J.R. *IDRISI for windows users's guide version 2.0*. Tutorial exercise. Worcester: GSG Press, 1997.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, Disponível em <<http://www.cnpt.embrapa.br/>> Acesso em: 23 de junho de 2003.
- EVERITT, J.H.; P.R. NIXON. Video imagery: a new remote sensing tool for range management. *J. Range Manage.*, Denver, v. 38, p. 421-424, 1985.
- EVERITT, J.H.; ESCOBAR, D.E. Using video imaging

technology for remote sensing of natural resources. In: SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, 1996, Puerto Vallarta, *Memórias...*, Puerto Vallarta: SELPER, 1196, p. 753-773, 1996.

FARRET, J.C.; GIOTTO, E. Aplicabilidade do georreferenciamento de aerofotos de pequeno formato na formação de bancos de dados espaciais – uma alternativa para o cadastro técnico rural municipal. *Cienc. Rural*, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 577-581, 1997.

JACKSON, R.D.; HUETE, A.R. Interpreting vegetation indices. *Prev. Vet. Med.*, Amsterdam, v. 11, p. 185-200, 1991.

JUNG-SUP, U.; WRIGHT, R. The analog-to-digital transition and implications for operational use of airborne videography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Falls Church, v. 65, n. 3, p. 269-275, 1999.

LANDIS J.; KOCH G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, Washington, DC, v. 33, n.159-74, 1977.

NOVO, E.M.L. de M. *Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações*. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1995.

RICHARDSON, A.J. *et al.* Estimating grain sorghum yield from video and reflectance based PVI measurements at peak canopy development. *J. Imag. Technol.*, v. 16, n. 3, p. 104-109, 1990.

ROSA, R. *Introdução ao Sensoriamento Remoto*. Uberlândia: EDUFU, 1990.

SALVADOR, A. *et al.* Uso de imagens multiespectrais para a identificação de zonas de manejo para a aplicação em taxas variáveis na produção de algodão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2004, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: Esalq/USP, 2004. p. 7

SHARP, T. *et al.* Relações entre NDVI e mensurações físicas das plantas em campos de algodão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2004, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: Esalq/USP, 2004. p. 8.

STEVEN, M. D.; MILLAR, C. Satellite monitoring for precision farm decision support. *Bios*, v. 1, p. 697-703, n. 3, 1997.

VETTORAZZI, C.A. *et al.* Videografia aérea como fonte de dados para a tomada de decisões em agricultura. In: BALASTREIRE, L.A. (Ed.). *O Estado da arte da agricultura de precisão no Brasil*. Piracicaba: 2000, p. 197-200.

YANG, C. *et al.* Airbone multiespectral digital imagery for detecting plant growth and yield variability for a grain sorghum field. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOESPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2., 2000, Flórida. *Proceedings...* Lake Buena Vista: 2000. p. 477-485.

Received on July 05, 2004.

Accepted on August 24, 2005.