

DETERMINAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO E ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE CULTURAS DE GRÃOS POR MEIO DE VIDEOGRAFIA AÉREA DIGITAL MULTIESPECTRAL

J. C. ARAÚJO¹; C. A. VETTORAZZI²; J. P. MOLIN³

RESUMO

A possibilidade do emprego de câmeras digitais multiespectrais torna possível a utilização de índices de vegetação, obtidos por meio de operações entre as bandas espectrais de uma mesma imagem. Estes índices podem ser empregados na estimativa da produtividade. O objetivo deste trabalho foi avaliar imagens obtidas por meio de videografia aérea digital multiespectral, quanto ao seu potencial na determinação de zonas de manejo e na estimativa da produtividade de culturas de grãos. As imagens foram adquiridas por meio de uma câmera de vídeo digital multiespectral (Duncantech MS3100). Em conjunto com as imagens produzidas foram utilizados mapas de produtividade referentes às duas áreas cultivadas, primeiramente com trigo, no inverno de 2001 e na seqüência com soja, no verão de 2002. As imagens foram corrigidas geometricamente e normalizadas no software Idrisi32, onde também foi realizada a regressão linear simples entre as imagens e os mapas de produtividade, pixel-a-pixel e com as imagens classificadas. Os resultados mostraram coeficientes de determinação variando de 0,50 a 0,82 e índice Kappa variando de 0,62 a 0,85 para uma das áreas analisadas. A videografia é um instrumento eficiente na determinação de zonas de manejo em áreas que apresentam uma grande variabilidade espacial.

PALAVRAS-CHAVE: agricultura de precisão, sensoriamento remoto, NDVI

MANAGEMENT ZONES DELINEATION AND GRAIN CROPS YIELD ESTIMATE THROUGH MULTISPECTRAL AERIAL DIGITAL VIDEOGRAPHY

SUMMARY

Multispectral aerial digital videographic images make it possible the use of vegetation indices, gotten by means of algebraic operations between spectral bands of one image. These indices can be used to estimate crop yields. The objective of this work was to evaluate multispectral aerial digital videographic images, regarding their potential in the delineation of management zones and in the grain crops yield estimate. The images were acquired with a multispectral digital video camera (Duncantech MS3100). 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 normalized with the Idrisi32 GIS software. Simple linear regression was also performed between images and yield maps, both pixel-to-pixel and with the classified images. The results showed determination coefficients ranging from 0,50 to 0,82 and Kappa Index of Agreement ranging from 0,62 to 0,85. Videography can be considered an efficient tool in the delineation of management zones in areas with large spatial variability.

KEYWORDS: precision farming, remote sensing, NDVI

INTRODUÇÃO

A perspectiva de estimativa da produtividade por meio de um diagnóstico pontual das condições da cultura durante o ciclo da mesma, com um equipamento que apresente uma visão global da área, com elevado rendimento, confiabilidade e acurácia das informações levantadas, é um tema que vem se desenvolvendo na atualidade, dentro da abordagem da Agricultura de Precisão.

A quantidade de informações e a qualidade das mesmas vêm se tornando cada vez mais o diferencial entre os produtores, pois para a tomada de decisões são necessárias informações advindas do conhecimento das áreas produtoras e dos fenômenos que estão ocorrendo durante o ciclo da cultura. Este gerenciamento, envolvendo o conhecimento “ponto-a-ponto” da área produtora, é tema abordado na Agricultura de Precisão.

Culturas como a soja e o trigo são *commodities* agrícolas e tendem a ser cultivadas em áreas cada vez maiores e por produtores cada vez mais tecnificados. A obtenção de informações de grandes áreas cultivadas está exigindo o emprego de tecnologia, deixando de lado a verificação apenas por meio de visitas ao campo, o que exigiria o emprego de muitas pessoas e demandaria muito tempo.

A disponibilidade de informações precisas e em tempo hábil, relativa às áreas ocupadas com culturas anuais, é de grande importância também para a elaboração de estratégias referentes ao armazenamento, comercialização e suporte às decisões governamentais. Segundo Betting (2004) no mês de fevereiro de 2004 o saldo comercial do agronegócio quase bateu em US\$ 2 bilhões. Foi de 36% o aumento entre o saldo de fevereiro de 2002 (US\$ 1,4 bilhão) e o de 2004 (US\$ 1,9 bilhão), informa o Ministério da Agricultura. Do total das exportações brasileiras, quase 40% tem origem no agronegócio.

Nesse contexto, o Sensoriamento Remoto aparece como um instrumento com elevado potencial para a coleta de informações sobre as áreas cultivadas, de forma abrangente, confiável e ágil. O emprego da videografia aérea multiespectral pode tornar mais eficiente a obtenção dessas informações, pois permite a coleta de imagens com agilidade. A videografia aérea, ou aerovideografia é uma técnica que consiste na obtenção de imagens por meio de câmeras de vídeo montadas no interior de aeronaves. A utilização da videografia vem crescendo rapidamente, nos últimos anos, principalmente nos Estados Unidos, devido, em especial, à evolução dos equipamentos utilizados (Vettorazzi et al., 2000).

O emprego da videografia aérea, no contexto da Agricultura de Precisão, tem-se mostrado eficiente principalmente pela disponibilidade em tempo quase real das imagens, diminuindo o custo operacional para a determinação da variabilidade espacial no campo e, também, possibilitando a tomada de decisões durante a própria safra.

A possibilidade do emprego de câmeras digitais multiespectrais torna possível a utilização de índices de vegetação, obtidos por meio de operações entre as bandas espectrais de uma mesma imagem. Estes índices podem ser empregados na verificação do estado da cultura em um determinado momento do ciclo, ou até mesmo para a estimativa da produtividade da mesma, um dos pontos mais pesquisados e buscados atualmente.

A Agricultura de Precisão, por meio dos mapas de produtividade das áreas, proporciona a verificação e a comprovação da qualidade dos métodos e técnicas utilizados na estimativa de produtividade.

A videografia aérea, aliada às técnicas de mapeamento empregadas na Agricultura de Precisão, inclusive mapas de produtividade das culturas, pode gerar um conjunto de informações que, potencialmente, responderão questões relativas à eficiência da técnica da videografia aérea na previsão de produtividade.

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

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em Castro, PR, na região denominada Campos Gerais, em áreas de cooperados da Fundação ABC, que é uma empresa mantida por agricultores da região por meio das cooperativas Arapotí, Batavo e Castrolanda. A empresa presta assistência técnica e tem como objetivo o desenvolvimento de pesquisas voltadas à agricultura.

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 rotação de culturas é realizada principalmente entre as culturas da soja, milho e feijão no verão e trigo e aveia preta no inverno. Os dados foram coletados no mês de agosto de 2001 (cultura de inverno, trigo) e no mês de março de 2002 (cultura de verão, soja). O trabalho concentrou-se em duas áreas (**TABELA 1**), onde são aplicadas técnicas de agricultura de precisão. A altitude da área 1 varia de 778 metros a 806 metros e a altitude da área 2 de 869m a 910m (**FIGURA 1**).

TABELA 1. Áreas de estudo e localização.

Produtor	Denominação	Latitude	Longitude
H. Borg	Área 1	24°50'53" S	50°20'36" W
J. Dijkstra	Área 2	24°53'05" S	50°16'36" W

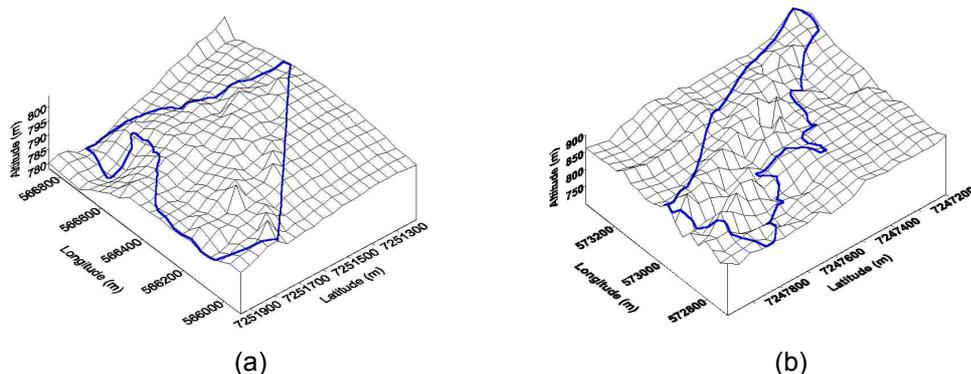


FIGURA 1. Visão tridimensional das áreas de estudo: área 1 (a) e área 2 (b).

A câmera (Duncantech MS3100) apresenta uma resolução espacial variável, de acordo com a altura de voo, capturando imagens de alta resolução espacial (1392 x 1040 pixels) 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 (450-520nm), vermelho (630-690nm) 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 controles de tempo de exposição são independentes para cada canal.

Processamento dos mapas de produtividade

Os mapas de produtividade referentes às safras de trigo do ano de 2001 (áreas 1 e 2) e os mapas de produtividade referentes às safras de soja de 2002 (áreas 1 e 2), foram cedidos pela Fundação ABC. Os mapas foram gerados em formato digital compatível com a extensão “shape”.

Esses mapas são considerados brutos, pois não são mapas com valores interpolados, mas sim representando os valores pontuais colhidos. Os mapas brutos foram processados no software SSToolbox 3.1. Neste software, os valores foram interpolados por meio da opção “create surface using interpolation”. O método utilizado para o processo de interpolação foi o do vizinho mais próximo (*Nearest Neighbor*). De acordo com Golden Software (1995), este método estima a função de distribuição cumulativa com base nas distâncias entre eventos em uma região de análise. O método do vizinho mais próximo determina o valor de um ponto levando em consideração os valores mais próximos do ponto considerado. Este método é empregado nos casos onde os dados cobrem quase por completo a área, só com alguns valores perdidos, sendo efetivo para preencher os espaços vazios nos dados

Os mapas de produtividade apresentam um grande número de pontos com os valores de produtividade, enquadrando-se no perfil de uso do parâmetro de interpolação escolhido, citado anteriormente. No processo de interpolação existe a opção de definição da área representativa de cada pixel no mapa de produtividade. O valor da área dos pixels utilizados foi de 25 m², correspondendo ao valor dos pixels empregados nas imagens correspondentes à mesma área.

No transcorrer dos trabalhos a produtividade foi classificada em 2 classes, utilizando-se a opção “Natural Breaks”. Esta opção tem o propósito de possibilitar uma observação prévia do comportamento da distribuição da variabilidade espacial. Esta é uma classificação padrão do software ArcView 3.2, identificando os pontos limite de cada classe utilizando um modelo estatístico que se baseia na minimização da soma da variância dentro de cada classe.

O mapa de produtividade foi exportado, no formato “shape”, para o software Idrisi32, por meio da opção “export” do software SSToolbox 3.1. No Idrisi32 os mapas foram importados por meio da opção de “import”. Os mapas de produtividade, tratados no software Idrisi32 foram novamente classificados por meio da opção “Reclass”.

Nesta etapa, a classificação baseou-se na determinação do valor médio observado no histograma de cada mapa, como sendo o limiar entre as duas classes. É importante reconhecer que os agrupamentos que a classificação não supervisionada produz não são classes de informação, mas categorias espectrais com padrões de reflectância similares (Eastman, 1997).

As possibilidades quanto ao número de classes são grandes. Optou-se por duas classes, uma de baixa e outra de alta produtividade, facilitando a visualização das mesmas no campo e o entendimento das áreas analisadas.

Obtenção e tratamento das imagens

Para que a câmera permanecesse na posição vertical em relação ao solo, foi necessária a construção de um suporte de metal, onde a mesma foi parafusada. O suporte foi posicionado no assoalho do avião (**FIGURA 2**).

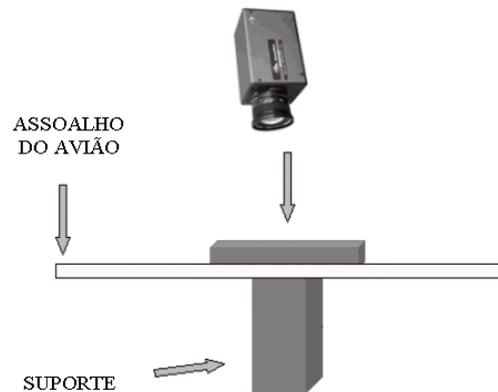


FIGURA 2. Esquema do posicionamento da câmera no assoalho do avião.

As imagens foram obtidas entre 2000m e 3000m de altura, proporcionando uma resolução espacial aproximada de 1m. A câmera proporciona captura de imagens simultaneamente nas bandas do visível e parte do infravermelho próximo, compreendendo a faixa espectral de 400nm a 1100nm.

As culturas analisadas no trabalho foram a soja e o trigo. 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. 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. Além disso, é a melhor época para a estimativa da produtividade.

O avião utilizado foi um Cessna 180, mono-motor, 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 80 Gigabytes de capacidade de armazenamento, para proporcionar uma maior autonomia (**FIGURA 3**), devido ao fato de que cada imagem apresenta 4,3 Megabytes e 1392 pixels (horizontal) x 1040 pixels (vertical). Para o acompanhamento em tempo real das imagens capturadas foi utilizado um monitor ligado ao computador, bem como para acionar o software de comando da câmera.



(a)



(b)

FIGURA 3. Vista lateral (a) e do interior do avião (b), dos equipamentos utilizados para a obtenção das imagens.

Devido à altura de vôo escolhida, houve casos em que toda a área a ser imageada não ficou inserida em um único quadro, sendo necessária a realização da mosaicação, que é a fusão entre imagens. Para uma mosaicação perfeita são necessárias a correção geométrica e a normalização radiométrica, promovendo a união entre as imagens sem que haja a percepção desta união.

O produto obtido a partir da cobertura videográfica é uma composição colorida falsa cor (RGB) e, utilizando o software Aldus PhotoStyler, estas imagens foram separadas em três bandas (verde, vermelho e infravermelho próximo) e convertidas para imagens com 256 níveis de cinza (8 bits).

O pré-processamento das imagens é necessário para a transformação dos dados digitais brutos em dados corrigidos, para serem processados posteriormente e, assim, obterem-se as informações necessárias contidas nas imagens.

Para Quintanilha (1990), a imagem digital é uma função bidimensional da intensidade de luz refletida ou emitida por uma cena, representada por $f(x,y)$, onde o f correspondente a cada (x,y) refere-se à intensidade da radiação nesse ponto. Essa intensidade é numericamente representada na imagem por um valor inteiro, não-negativo e finito (nível de cinza).

A normalização radiométrica tem por finalidade a eliminação das distorções em relação ao fato de que as imagens foram obtidas sob condições diferentes de luminosidade, devido ao deslocamento da posição de tomada das imagens, alterando os níveis de cinza de um mesmo alvo de uma imagem para a seguinte. A finalidade da normalização foi agrupar as imagens adjacentes sob condições semelhantes de luminosidade.

A normalização radiométrica neste trabalho foi realizada manualmente, por meio da verificação dos valores de nível de cinza em 3 janelas de 25 pixels (5×5), com coordenadas conhecidas e idênticas, na área comum das imagens a serem mosaicadas, conforme ilustra a **FIGURA 4**.

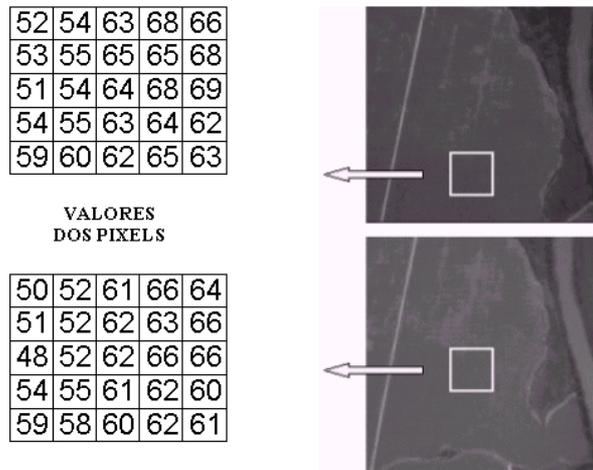


Figura 4. Processo de normalização radiométrica: extração dos valores dos pixels em uma janela de 5 x 5.

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 com a opção “Scalar”. A **FIGURA 5** demonstra o resultado da normalização radiométrica realizada na área 2, com a imagem da cultura do trigo, no infravermelho.

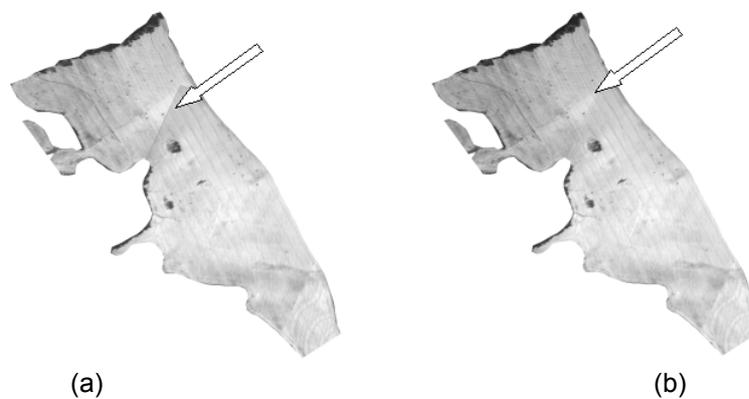


FIGURA 5. Mosaico sem a normalização radiométrica (a); e com a normalização radiométrica (b), evidenciando-se o efeito obtido.

A correção geométrica das imagens foi realizada por meio das coordenadas de alvos (placas de 1m²) dispostos em pontos estratégicos da área e georreferenciados por GPS, com correção diferencial em tempo real e acurácia de 2m a 5m.

Farret & Gioto (1997) afirmam que a melhor geometria para os pontos de apoio 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.

Segundo Novo (1995), a correção geométrica, ou georreferenciamento, tem como objetivo reorganizar os pixels da imagem em relação a um determinado sistema de projeção cartográfica.

O georreferenciamento foi realizado com os mosaicos prontos. As imagens que formam a área foram montadas no software “Aldus PhotoStyler”. Este mosaico foi exportado para o software Idrisi32 e

então georreferenciado. Neste processo o usuário identifica as coordenadas X, 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 seqüência as coordenadas reais obtidas no campo. O Idrisi32 resolve uma equação que descreve a relação entre os dois sistemas de coordenadas.

A opção “resample” é selecionada e o software processa equações que descrevem as relações entre os dois sistemas de coordenadas. Com essa operação o arquivo é convertido para o novo sistema de referência por meio do que é denominada 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 onde a imagem de entrada contém valores quantitativos, esta é a técnica que deverá ser utilizada, devido a não alteração dos valores originais 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 este 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 estes 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 aparecem no arquivo de correspondência. Esses resíduos expressam quanto cada ponto de controle se desvia da equação de melhor ajuste. A equação de melhor ajuste descreve a relação entre o sistema de referência arbitrário da imagem e o novo sistema de referência ao qual ela está sendo reamostrada, e essa relação é calculada a partir dos pontos de controle (Eastman, 1997).

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 deve ser menor que 0,5 m. 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 a área de estudo do resto da imagem. As “máscaras” das duas áreas de estudo foram desenvolvidas pelo mesmo procedimento. O processo foi realizado no software Idrisi32, onde foram importados os mapas de produtividade. Esses mapas foram classificados por meio da função “reclass” onde os valores correspondentes à área de interesse assumiram o valor “1”. A área externa assumiu o valor “0”, formando assim a “máscara” utilizada no trabalho.

Quando executada a opção “overlay” que é utilizada para efetuar operações matemáticas entre imagens, utiliza-se a “máscara” multiplicada por uma determinada imagem, esta última apresenta os pontos externos multiplicados por zero. Formando conseqüentemente uma nova imagem formada apenas pela área de interesse. As classificações das imagens foram realizadas pelo mesmo processo empregado nos mapas de produtividade, descritos anteriormente.

Determinação dos índices de vegetação

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

O índice de vegetação (NDVI) é determinado por processos matemáticos realizados entre bandas das imagens multiespectrais. O software IDRISI32 apresenta uma opção denominada “analysis”. Depois de selecionada é necessário abrir a opção “image processing”, logo após a opção “transformation” e por fim “vegindex”. A mesma ativa uma janela que permite a seleção de diversos índices de vegetação, sendo o NDVI a segunda opção.

A opção NDVI exige a entrada da imagem nas bandas do vermelho, do infravermelho e o nome do arquivo de saída, ou do resultado da operação. A imagem do NDVI apresenta uma legenda dos valores encontrados na operação, sendo que os números gerados variam de (-1 a 1). Os valores negativos de NDVI foram descartados, considerando-se a faixa compreendida entre (0 a 1), onde os valores próximos a um correspondem a um alto vigor vegetativo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Imagens aéreas para as culturas da soja e do trigo

As **FIGURAS 6 e 7** representam respectivamente as imagens aéreas obtidas da cultura da soja e do trigo para a área 1. Foram obtidas imagens nos espectros do infravermelho próximo e do vermelho.

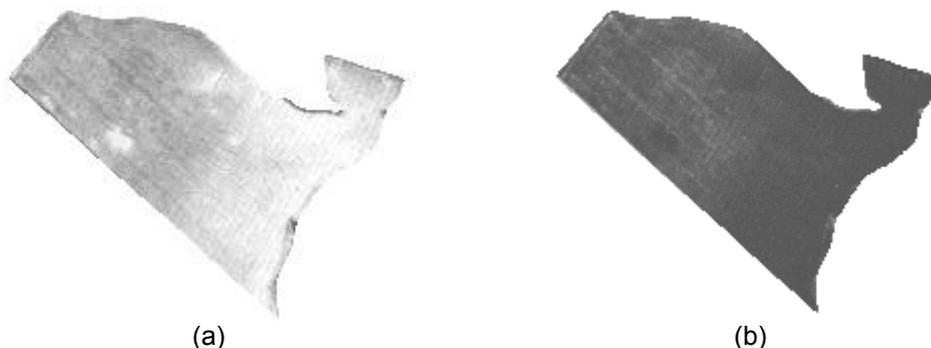


FIGURA 6. Imagens referentes à área 1. Cultura da soja nos espectros do infravermelho próximo (a) e do vermelho (b).

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 foram descartadas. Ambas apresentaram valores de pixel igual a 11 e 255 respectivamente, para toda a área de interesse abrangida pela imagem, tornando impossível à análise deste produto e até mesmo a correção radiométrica das mesmas.

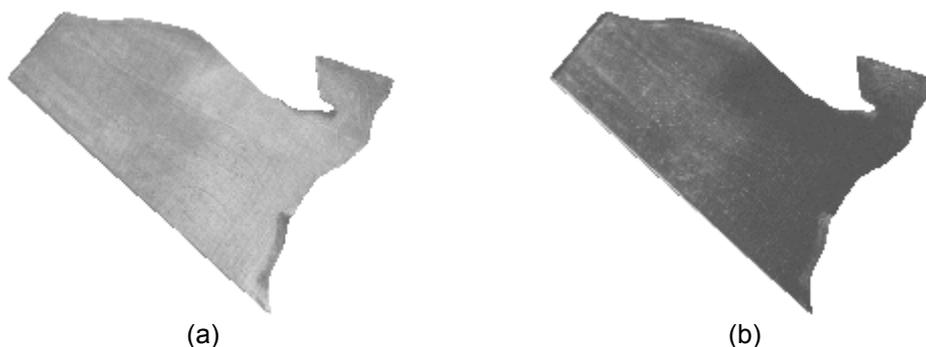
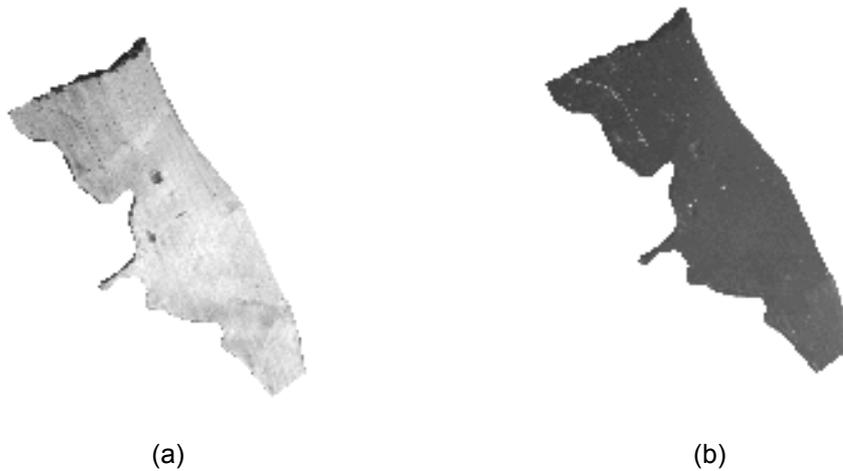


FIGURA 7. Imagens referentes à área 1. Cultura do trigo nos espectros do infravermelho próximo (a) e do vermelho (b).

A **FIGURA 8** apresenta a imagem aérea obtida da cultura do trigo, para a área 2, nos espectros do infravermelho próximo e do vermelho.



(a) (b)
FIGURA 8. Imagem da área 2 referente à cultura do trigo nos espectros do infravermelho (a) e do vermelho (b).

Análise entre mapas de produtividade e imagens NDVI

A FIGURA 9 ilustra o mapa de produtividade para a cultura da soja, referente à área 1. O mesmo apresenta uma variação de produtividade entre 1,38 t/ha e 6,54 t/ha, distribuídas em cinco classes.

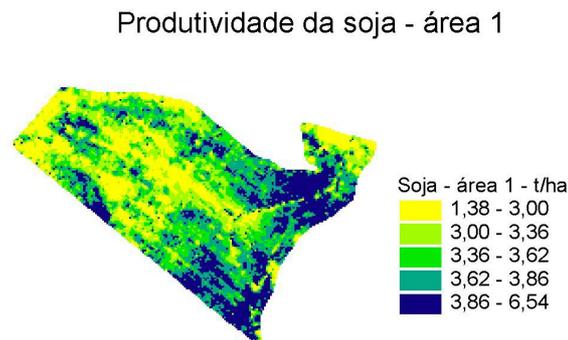


FIGURA 9. Produtividade da cultura da soja, na área 1, dividida em 5 classes.

Visualmente definiram-se áreas correspondentes comparando-se a produtividade e a imagem de NDVI (FIGURA 10). Alguns pontos com menor valor de NDVI relacionaram-se com alguns pontos de menor produtividade para a cultura da soja.

NDVI - área 1 - soja

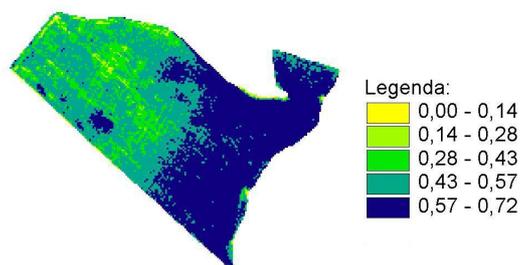


FIGURA 10. Imagem NDVI para a área 1, cultura da soja, classificada em 5 classes.

Esta constatação também foi verificada, com um grau mais acentuado, quando da realização de uma análise visual entre a produtividade da cultura do trigo, área 1 (**FIGURA 11**), e o NDVI (**FIGURA 12**), obtido para a mesma cultura e área.

Produtividade do trigo - área 1

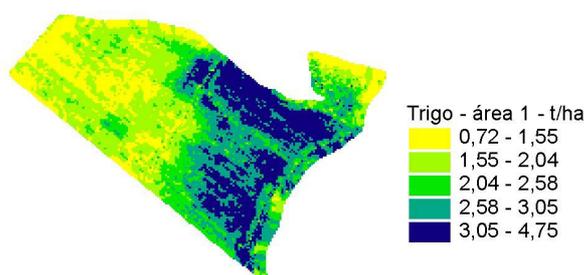


FIGURA 11. Produtividade da cultura do trigo, na área 1, dividida em 5 classes.

O mapa de produtividade para a cultura do trigo (**Figura 11**), referente à área 1, apresenta uma variação de produtividade entre 0,72 t/ha a 4,75 t/ha, distribuída em cinco classes. Já a imagem NDVI (**FIGURA 12**) apresenta-se classificada em cinco classes, estabelecendo uma variação do índice NDVI de 0,0 a 0,6.

NDVI - área 1 - trigo

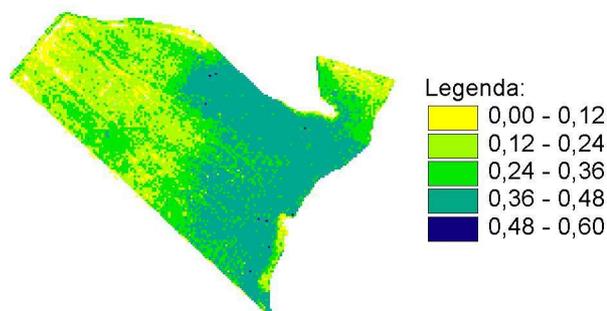


FIGURA 12. Imagem NDVI para a área 1, cultura do trigo, classificada em 5 classes.

Percebe-se que nesta análise existe uma correspondência visual clara entre a área correspondente às maiores produtividades (3,05 t/ha a 4,74 t/ha) e a classe que representa o maior valor de NDVI (0,48 a 0,60). Da mesma forma os pontos de menor produtividade correspondem visualmente aos pontos onde os valores de NDVI foram menores.

O estudo realizado na área 2, envolveu a cultura do trigo. O mapa de produtividade da mesma (FIGURA 13), foi dividido em cinco classes que representam a variação de produtividade entre 0,51 t/ha a 4,70 t/ha.

Produtividade do trigo - área 2

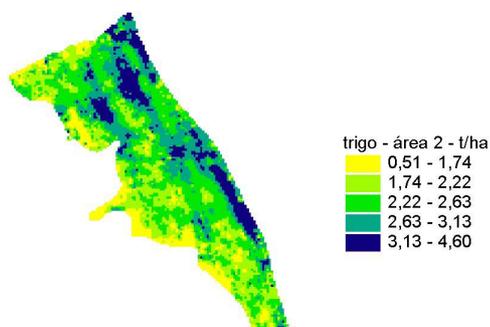


FIGURA 13. Produtividade da cultura do trigo, na área 2, dividida em 5 classes.

Como no caso da produtividade do trigo (FIGURA 13), o NDVI para a mesma cultura (FIGURA 14), também foi classificado em cinco classes que apresentaram variação do índice de 0,00 a 0,78.

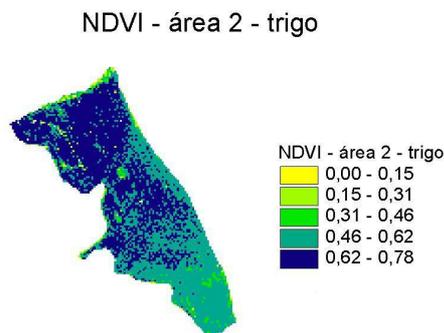


FIGURA 14. Imagem NDVI obtida para a área 2, trigo.

Diferentemente dos outros dois casos, quando se procedeu a análise visual para esta área, não foi observada a coincidência entre pontos de maior produtividade com pontos de maior 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, empregando os valores de produtividade, níveis de cinza no infravermelho próximo, níveis de cinza no vermelho e valores correspondentes ao NDVI. A produtividade foi definida, em todas as situações, como variável dependente e as demais como variáveis independentes.

Araújo (2000) realizou um estudo utilizando imagens aéreas obtidas por meio de câmera convencional com filme 35 mm. O espectro de atuação da câmera abrangia a região do visível, sendo as imagens obtidas a partir da janela da aeronave. O autor não encontrou coeficientes de determinação significativos para as análises de regressão realizadas entre as imagens e mapas de produtividade de grãos.

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. Resultados da análise de regressão linear simples com os valores dos coeficientes de determinação (r^2).

	Produtividades		
	Soja Área 1	Trigo Área 1	Trigo Área 2
Infravermelho próximo	0,500	0,594	0,103
Vermelho	0,420	0,578	0,095
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, cultura da soja, não foi possível a obtenção de imagens apropriadas ao estudo, 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 milho 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 & 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.

O NDVI apresentou os maiores valores de r^2 para todas as análises realizadas, quando comparadas com as bandas isoladas do infravermelho próximo e do vermelho. Excetuando-se as imagens NDVI, os maiores coeficientes de determinação foram encontrados para as imagens isoladas do espectro 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 11**), uma definição mais clara das classes de produtividade, quando comparado com o mapa de produtividade da cultura da soja (**FIGURA 9**), onde 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 na área 1.

As análises de regressão realizadas entre os mapas de produtividade e as bandas espectrais geraram números opostos 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 entre os valores de regressão encontrados entre as duas áreas analisadas no trabalho gerou questionamentos a respeito do porque 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**.

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

Os coeficientes de variação (CV) para as variáveis NDVI das culturas do trigo e da soja 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. Esta característica permite analisar que a imagem aérea obtida por meio de videografia aérea digital multiespectral se correlaciona significativamente quando existe uma variabilidade evidente entre os pixels da imagem.

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

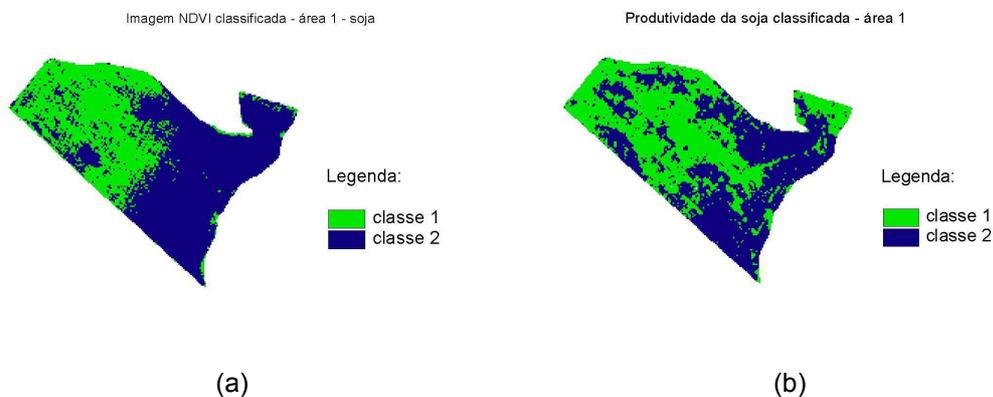
Constata-se também que em todas as imagens obtidas do espectro do vermelho, houve valores de curtose superiores aos das imagens do espectro do infravermelho próximo. Este fato permite atribuir um problema de calibração da câmera nesta faixa espectral, que gerou dados discrepantes. Associando-se a questão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

Variáveis classificadas

As variáveis analisadas pixel-a-pixel foram classificadas conforme procedimento descrito anteriormente. A análise pixel-a-pixel é interessante para tratamentos localizados, zonas de manejo, com equipamentos que aplicam produtos em taxas variadas.

As imagens e mapas de produtividade apresentam áreas com grande número de classes e as mesmas dispostas em várias localizações da mesma. 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.

Nesta ótica, segmentou-se a área em duas classes e foram realizadas as análises de regressão, onde nas **FIGURAS 15, 16 e 17** são apresentadas as variáveis classificadas em duas classes de produtividade, para a área 1, cultura da soja, área 1 cultura do trigo e área 2 cultura do trigo respectivamente. A classe 1 representa os valores abaixo da média e a classe 2 valores acima da média, para todas as variáveis analisadas.



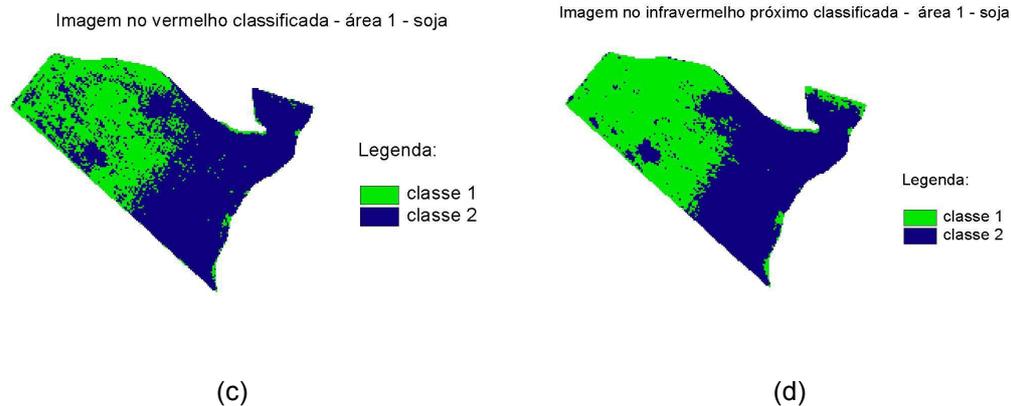


FIGURA 15. NDVI (a), produtividade da soja (b) e imagens no vermelho (c) e infravermelho (d) classificadas.

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 15**).

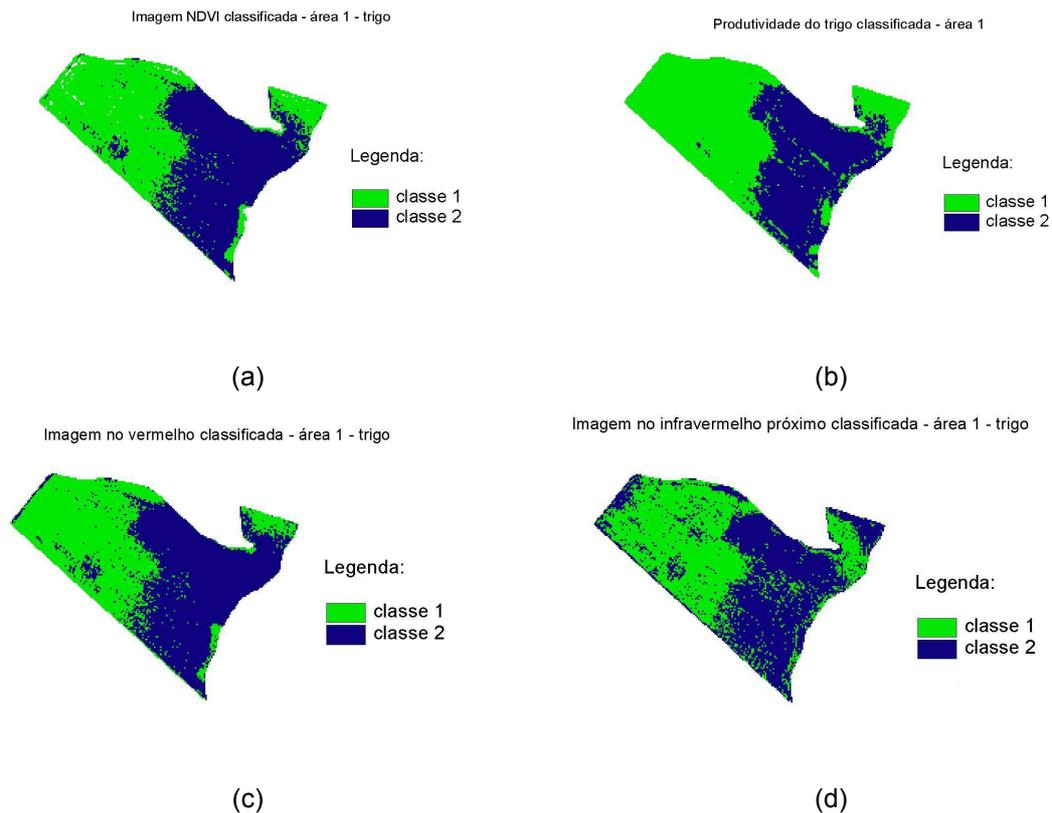


FIGURA 16. NDVI (a), produtividade do trigo (b) e imagens no vermelho (c) e infravermelho (d) classificadas.

A área 1, cultura do trigo (**FIGURA 16**), apresentou similarmente à cultura da soja (**FIGURA 15**), 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 17**), como no caso da correlação visual das imagens originais (sem classificação), não apresentou tendência para nenhuma combinação realizada entre as variáveis.

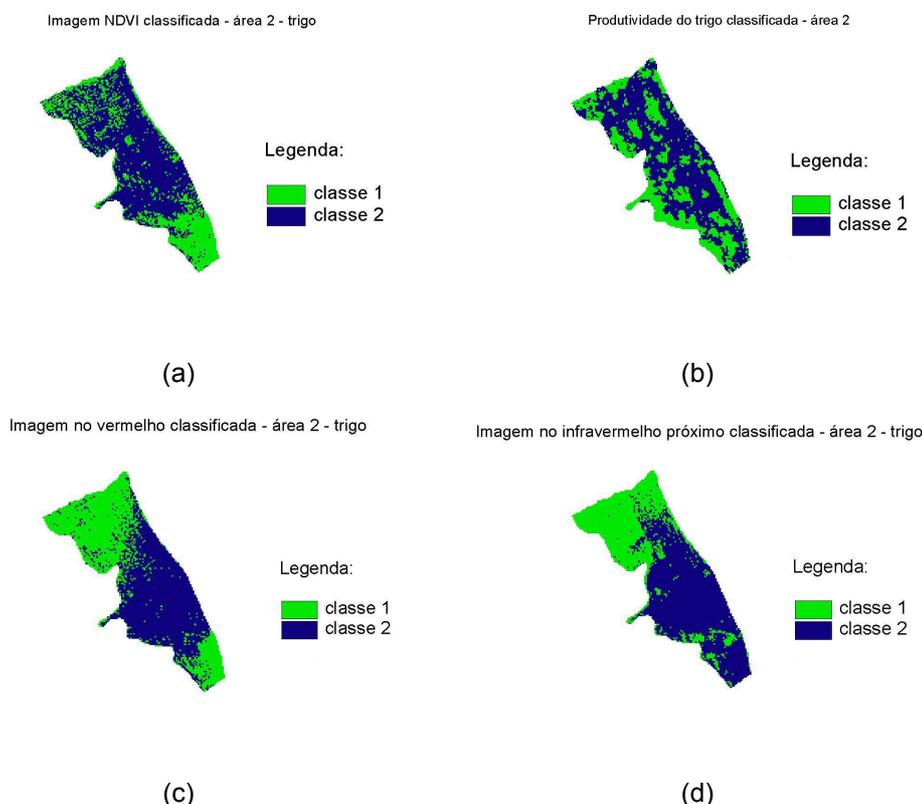


FIGURA 17. NDVI (a), produtividade do trigo (b) e imagens no vermelho (c) e infravermelho (d) classificadas.

Regressão entre variáveis classificadas

Se recorrermos somente à observação para analisar e comparar os mapas de produtividade e os mapas de nível de cinza, reparamos em algumas semelhanças, mas 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, descrito anteriormente. As variáveis que envolveram a produtividade com as imagens aéreas resultaram em valores de índice Kappa dispostos na **TABELA 4**.

Tabela 4. Índice Kappa em (%) entre as variáveis de imagem e produtividade classificadas.

	Produtividades		
	Soja Área 1	Trigo Área 1	Trigo Área 2
Infravermelho	63,5	71,8	44,7
Vermelho	62,2	84,5	43,2
NDVI	64,6	85,4	49,3

O NDVI novamente mostrou-se mais eficiente em relação às imagens nos espectros do vermelho e do infravermelho próximo no processo de correlação com as produtividades das culturas analisadas.

CONCLUSÕES

Nas condições em que o trabalho foi realizado concluiu-se 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 digital multiespectral podem gerar relações significativas com as produtividades de grãos;
- As imagens obtidas por meio de videografia aérea digital multiespectral proporcionam informações importantes ao delineamento de zonas de manejo.

AGRADECIMENTOS

À Fundação ABC, pelo apoio em todas as etapas deste trabalho.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAUJO, J. C. Correlação entre mapas de produtividade de grãos e fotografias aéreas convencionais 35 mm, (**Dissertação de Mestrado**), Piracicaba:Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP, 2000, 58 p.
- BETTING, J. Planos de impacto. **Correio da Paraíba**. João Pessoa, PB, publicado em 09/03/2004. Seção economia, Sistema de jornal on line. <http://www.correiodaparaiba.com.br>.
- EASTMAN, J.R. **IDRISI for windows users's guide version 2.0. Tutorial exercise**. Worcester-MA, Graduate School of Geography, Clark University. 192 p. 1997.
- EMBRAPA - **EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA**, <http://www.cnpt.embrapa.br/>, (23/06/2003).
- 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. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 27, n.4, p. 577 - 581, 1997.
- GOLDEN SOFTWARE. **Surfer for Windows, version 6.01**: software de geração de mapas de contorno e superfícies contínuas (software). Colorado, 1995.
- JACKSON,R.D.; HUETE, A.R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v.11, p.185 - 200, 1991.
- NOVO, E. M. L. de m. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo. Edgard Blücher Ltda. 1995. 308 p.
- QUINTANILHA, J. A. Processamento de imagens digitais. Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento. São Paulo, EPUSP. **Anais**, p. 37 – 52. 1990.
- ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. Uberlândia. Editora da Universidade Federal de Uberlândia – EDUFU. 1990. 135 p.

- STEVEN, M. D.; MILLAR, C. Satellite monitoring for precision farm decision support. **Bios**, v. 1, p.697 – 703, 1997.
- VETTORAZZI, C.A.; COUTO, H.T. Z.; FERRAZ, S. F. DE B.; POMPERMAYER, P. 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.; EVERITT, J. H.; BRADFORD, J. M.; ESCOBAR, D. E.. Airbone multiespectral digital imagery for detecting plant growth and yield variability for a grain sorghum field. **Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry**, Lake Buena Vista, Flórida, 10 – 12 January 2000. p. 477 – 485.