

IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO NO MONITORAMENTO DA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR

DANIEL A. DE AGUIAR¹, BERNARDO F. T. RUDORFF², MARCOS ADAMI³,
YOSIO E. SHIMABUKURO⁴

RESUMO: A prática agrícola da queima da palha da cana-de-açúcar tem por finalidade facilitar a colheita manual. No Estado de São Paulo, essa prática está submetida a uma rigorosa legislação ambiental devido ao impacto negativo para o meio ambiente. Está previsto que a queima da cana deve ser gradativamente eliminada até 2017. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a área de cana colhida com e sem queima em todo o Estado de São Paulo. Para tal, foram utilizadas as imagens disponíveis do sensor TM a bordo do satélite Landsat-5. As imagens foram adquiridas de abril a dezembro de 2006, que corresponde ao período de colheita da cana. Essas imagens foram analisadas por meio de técnicas de processamento digital e interpretação visual. A área de cana colhida sem queima foi avaliada em 1.085.730 ha e corresponde a 34,7% do total da área mecanizável colhida. Isso atende à legislação ambiental que, para o ano de 2006, previa que 30% da área de cana fosse colhida sem queima. A sequência temporal de imagens adquiridas entre abril e dezembro permite identificar as áreas de cana colhidas sem queima e, portanto, distingui-las das áreas de cana colhidas com queima.

PALAVRAS-CHAVE: queima da cana, modelo linear de mistura espectral, cana crua.

REMOTE SENSING IMAGES FOR MONITORING THE SUGARCANE HARVEST

ABSTRACT: The agricultural practice of burning the sugarcane straw has the intention of facilitating the manual harvest. In São Paulo state this practice is subjected to a rigorous environmental legislation, due to the negative impact for the environment. It is anticipated that sugarcane burning should gradually be eliminated until 2017. The present work has the objective of evaluating the sugarcane area harvested with and without burning in the entire state of São Paulo. For that purpose, available images from TM sensor, on board of Landsat-5 satellite, were used. Images were acquired from April to December 2006, which corresponds to the sugarcane harvest period. These images were analyzed by using digital processing and visual interpretation techniques. The sugarcane area harvested without burning was estimated as 1,085,730 ha and corresponds to 34.7% of the total mechanized harvested area. This is according to the expectation of 30% established by the environmental legislation for the year of 2006. The temporal image sequence acquired between April and December allows us to identify the sugarcane areas harvested without burning and, therefore, distinguish them from the sugarcane areas harvested with burning.

KEYWORDS: sugarcane burning, linear spectral mixture model, raw sugarcane.

¹ Geógrafo, M.Sc. em Sensoriamento Remoto, Pesquisador-Bolsista, Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos - SP, Fone: (0XX12) 3945.6465, daniel@dsr.inpe.br

² Eng^o Agrícola, Doutor, Pesquisador Titular, DSR, INPE, São José dos Campos - SP.

³ Economista, Doutorando em Sensoriamento Remoto, DSR, INPE, São José dos Campos - SP.

⁴ Eng^o Florestal, Doutor, Pesquisador Titular, DSR, INPE, São José dos Campos - SP.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 29-1-2008

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 20-5-2009

INTRODUÇÃO

A expansão da área cultivada com a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, a fim de atender à demanda por etanol, garante a essa cultura posição de destaque no cenário agrícola nacional. Entretanto, problemas de ordem socioeconômica e ambiental têm atraído a atenção da sociedade para a cultura da cana-de-açúcar (LOPES & RIBEIRO, 2006; MORAES, 2007).

Dentre esses problemas, destaca-se a prática da queima para a colheita da cana e a consequente emissão de gases poluentes que diminuem a qualidade do ar e causam sérios prejuízos à saúde pública. Com o intuito de acelerar o processo de diminuição dessa queima, a Secretaria de Meio Ambiente (SMA) do Estado de São Paulo e a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) firmaram, em agosto de 2007, um protocolo de intenções em que a prática da queima da palha da cana deve ser gradativamente reduzida até sua completa eliminação em 2017 (2014 em áreas mecanizáveis). Dois marcos importantes desse protocolo são: i) até 2010, 70% da cana deve ser colhida sem a prática da queima, e ii) a partir da safra 2008/2009, as áreas de expansão somente poderão ser colhidas sem o uso do fogo.

Embora a legislação ambiental seja bastante rigorosa com relação à queima da cana, pois os produtores são obrigados a solicitar autorização para a SMA, informando o tamanho e a localização da área a ser queimada, não se dispõe de método prático e eficiente que permita monitorar o tipo de colheita - com e sem o uso do fogo - a fim de avaliar se a colheita está sendo realizada dentro do que a lei determina.

Três aspectos indicam que as imagens de sensoriamento remoto têm características favoráveis para monitorar o tipo de colheita da cana-de-açúcar (com e sem o uso do fogo). O satélite Landsat-5 tem a bordo o sensor TM (*Thematic Mapper*), que obtém imagens que recobrem sistematicamente o território brasileiro a cada 16 dias; em adição, imagens livres de cobertura de nuvens têm maior probabilidade de serem adquiridas no Estado de São Paulo entre os meses de abril e setembro, que correspondem ao período de maior intensidade de colheita da cana. Além disso, AGUIAR (2007) observou que as áreas colhidas com e sem queima apresentam significativa diferença na resposta espectral nessas imagens. Nesse sentido, este estudo tem como objetivo identificar e mapear as áreas de cana colhida com e sem o uso do fogo no Estado de São Paulo - ano-safra 2006/2007 - por meio de imagens de sensoriamento remoto, para estimar o percentual de área colhida sem queima.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O Estado de São Paulo localiza-se entre os paralelos 19°50' e 24°30' S e os meridianos 44°00' e 53°30' W, na região Sudeste do Brasil, e ocupa área de 248.209,4 km². A cana-de-açúcar está principalmente concentrada na região centro-norte e oeste do Estado. Nessa região, estão contidas três províncias geomorfológicas: planalto ocidental, *cuestas* basálticas e depressão periférica (zonas do Mogi-Guaçu e do médio Tietê; PONÇANO, 1981), com altitudes que variam de 200 a 600 m, de 600 a 800 m e chegam a 800 m, respectivamente (IGG, 1943).

Imagens de sensores remotos

Para cobrir toda a área de cana do Estado de São Paulo, são necessárias 13 cenas do sensor TM, a bordo do satélite Landsat-5. Para cada cena representada por uma órbita e um ponto, foi criado um banco de dados geográfico, no qual foram armazenadas as imagens nas bandas: 3 (630 a 690 nm); 4 (760 a 900 nm), e 5 (1.550 a 1.750 nm). Imagens livres ou parcialmente livres de nuvens foram selecionadas de abril (início da colheita) até início de dezembro de 2006, quando termina a colheita da cana (Tabela 1).

TABELA 1. Imagens do sensor TM do Landsat-5 utilizadas para mapeamento do modo de colheita; em destaque, imagens com cobertura parcial de nuvens. **Images from the TM/Landsat-5 sensor used to map the kind of harvest; date of images with partial cloud cover are marked in gray.**

| Órbita/Ponto | Data 1 | Data 2 | Data 3 | Data 4 | Data 5 | Data 6 | Data 7 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 219/75 | 23-abr. | 25-maio | 12-jul. | 14-set. | 19-dez. | - | - |
| 219/76 | 23-abr. | 9-maio | 12-jul. | 14-set. | 19-dez. | - | - |
| 220/74 | 14-abr. | 30-abr. | 1-jun. | 3-jul. | 4-ago. | 5-set. | 24-nov. |
| 220/75 | 14-abr. | 6-jun. | 19-jul. | 5-set. | 23-out. | 24-nov. | - |
| 220/76 | 14-abr. | 16-maio | 19-jul. | 5-set. | 23-out. | 24-nov. | - |
| 221/74 | 21-abr. | 24-jun. | 26-jul. | 27-ago. | 12-set. | 15-nov. | - |
| 221/75 | 21-abr. | 7-maio | 24-jun. | 11-ago. | 12-set. | 15-nov. | - |
| 221/76 | 21-abr. | 24-jun. | 12-set. | 15-nov. | 1-dez. | - | - |
| 222/74 | 12-abr. | 30-maio | 17-jul. | 19-set. | 24-dez. | - | - |
| 222/75 | 12-abr. | 30-maio | 17-jul. | 3-set. | 19-set. | 21-out. | 22-nov. |
| 222/76 | 12-abr. | 30-maio | 17-jul. | 3-set. | 21-out. | 22-nov. | - |
| 223/74 | 19-abr. | 6-jun. | 25-ago. | 26-set. | 28-out. | 13-nov. | - |
| 223/75 | 19-abr. | 6-jun. | 25-ago. | 26-set. | 13-nov. | - | - |

Mapa da cana-de-açúcar

O mapa das áreas de cana-de-açúcar para o ano-safra de 2006/2007 foi obtido do Projeto CANASAT (www.dsr.inpe.br/canasat), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em conjunto com a União da Agroindústria Canavieira (UNICA), com o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e com o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA). A metodologia para a geração desse mapa está descrita em RUDORFF et al. (2005) e foi baseada na classificação digital e na interpretação visual de imagens de sensores remotos. Esse mapa apresenta toda a área cultivada com cana e está dividido em diversas classes que, entre outras, permite isolar a cana disponível para a colheita na safra de 2006.

Dados SRTM

As informações de declividade, necessárias para o estabelecimento das áreas propícias à mecanização, foram obtidas a partir do modelo digital de elevação do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), conforme descrito por RABUS et al. (2003), disponibilizados pela NASA (<http://srtm.usgs.gov/data/obtaindata.html>) e processadas por VALERIANO et al. (2006).

Segundo VALERIANO et al. (2006), os dados SRTM exprimem a elevação da superfície com todos os objetos presentes no terreno, tais como: edificações, desmatamento, obras de corte/aterro, represas, bem como o nível da superfície de corpos d'água extensos. Tais características não são desejáveis em dados topográficos, que devem representar somente o terreno. Para atingir as características desejáveis, esses dados devem ser processados para a remoção das falhas, redução de artefatos e distribuição da aleatoriedade e é realizado por meio de *krigagem*. Além disso, após o processamento, os dados passam a ter resolução espacial de 30 x 30 m.

Mapeamento do modo de colheita da cana - com e sem uso do fogo

Todas as imagens foram referenciadas ao sistema de projeção Policônica com *datum* planimétrico SAD69. Para tanto, foi utilizada como suporte ao registro uma base de cenas do sensor ETM+ do Landsat-7 ortorretificadas, com erro médio de posicionamento horizontal de 50 m (TUCKER et al., 2004). Com vistas a restringir o monitoramento apenas às áreas de interesse, o mapa da cana foi definido para apenas dois temas: a) cana disponível para colheita em 2006, e b) outros.

Modelo linear de mistura espectral (MLME)

O MLME é uma técnica que tem por base a análise *sub-pixel* e parte do princípio que um *pixel* é uma combinação linear da refletância de diferentes alvos, contendo informação sobre a proporção e a resposta espectral de cada componente dentro do elemento de resolução espacial do sensor (SHIMABUKURO & SMITH, 1991). Em outras palavras, a resposta de cada *pixel* em um comprimento de onda qualquer pode ser considerada uma mistura das respostas de cada alvo, em que o *pixel* assume um valor na escala de cinza (CROSS et al., 1991; QUARMBY et al., 1992; LOBELL & ASNER, 2004). LOBELL & ASNER (2004) propõem a seguinte equação para o modelo:

$$\rho = \sum_{i=1}^m C_i \rho_i + \varepsilon \quad (1)$$

em que,

- ρ - refletância observada do *pixel* em uma banda qualquer;
- C_i - fração de cobertura do alvo no *pixel*;
- ρ_i - refletância do *endmember* ou do membro de referência, e
- ε - erro residual do modelo.

Existem vários métodos para a escolha dos *endmembers*, entre os quais se destacam dois: a) uso de assinaturas espectrais contidas em bibliotecas espectrais ou ainda de trabalhos anteriores, e b) escolha de *pixels* puros representativos do alvo correspondente ao *endmember*, apontado na própria imagem. Essa escolha é crítica para a estimativa correta das proporções dos alvos em cada *pixel* (PASTOR, 2002; QUINTANO et al., 2006).

Nessa etapa, foram excluídas todas as imagens com presença de nuvens e, em seguida, foi aplicado, a cada uma das imagens livres de nuvens, um modelo linear de mistura espectral. A exclusão das imagens com nuvens justifica-se pela confusão entre a resposta espectral das áreas de cana colhida sem o uso do fogo e a resposta espectral das nuvens, já que ambas têm alta refletância nas imagens das três bandas utilizadas do sensor TM.

Neste trabalho, optou-se pela seleção dos *endmembers* diretamente nas imagens TM do Landsat-5, em composição colorida 3B4R5G (bandas 3; 4 e 5 nas cores azul-B, vermelha-R e verde-G, respectivamente) e com o conhecimento prévio das respostas espectrais dos alvos de interesse, sejam eles: cana colhida crua, cana colhida com o uso do fogo e cana não colhida. Foram analisadas as respostas espectrais dos alvos selecionados em cada uma das bandas, a fim de garantir que as respostas dos alvos fossem díspares e representassem o comportamento dos alvos, para obter melhor resultado com a aplicação do MLME.

Os valores dos *pixels* de cada uma das imagens-fração são diretamente proporcionais à quantidade do *endmember* contido nos mesmos. Valores de *pixels* nas imagens-fração acima de 255 indicam *endmembers* mais puros do que os escolhidos para a aplicação do modelo. Sendo assim, as imagens resultantes foram analisadas, em associação com a imagem-erro, e serviram de guia para a escolha de novos *endmembers* com o objetivo de melhorar a aplicação do MLME. Esse processo repetiu-se até que fosse alcançado o menor número de valores de *pixels* acima de 255 nas imagens-fração, o que indica boa escolha dos *endmembers*.

Imagens de máximos e mínimos valores

Após a obtenção das imagens-fração referentes a todas as datas livres de nuvens para cada órbita/ponto, foi calculada uma imagem de máximo valor para o *endmember* cana colhida crua e outra imagem de máximo valor para o *endmember* cana colhida com o uso do fogo, renomeadas para cana crua e cana queima. Foi calculada, também, uma imagem de mínimo valor do *endmember* cana não colhida. As imagens de máximo permitem identificar o modo de colheita, enquanto com a imagem de mínimo, podem-se identificar as áreas de cana bisada (*endmember* cana não colhida).

Dado que os valores dos *pixels* de cada uma das imagens-fração são relacionados à proporção do *endmember* contido nos mesmos, o cálculo dos *pixels* com os valores de máximo dos *endmembers* cana crua e cana queima indica a quantidade máxima desses *endmembers* no tempo e possibilita o mapeamento dessas classes. Por outro lado, um *pixel* com valor elevado de cana bisada na imagem de mínimo indica que aquela área de cana não foi colhida em nenhuma imagem.

As imagens de máximo de cana crua, máximo de cana queima e mínimo de cana bisada foram fatiadas por um limiar estabelecido por meio de análise visual, uma vez que a escolha dos *endmembers* variou para cada data e para cada órbita/ponto. Nessa etapa, o valor de cada *pixel* é comparado com o valor do limiar estabelecido, e quando esse valor é maior que o limiar, então o *pixel* é classificado de acordo com o tema de interesse.

O passo seguinte foi reunir cada um dos temas fatiados em um único mapa, contendo as três classes. Para realizar o mosaico dos temas, foi estabelecida regra de decisão que leva em conta o comportamento espectral desses alvos. Os *pixels* que não atenderam a nenhum critério estabelecido foram classificados como dúvida. Esse procedimento evita a sobreposição das classes e está apresentado na Figura 1.

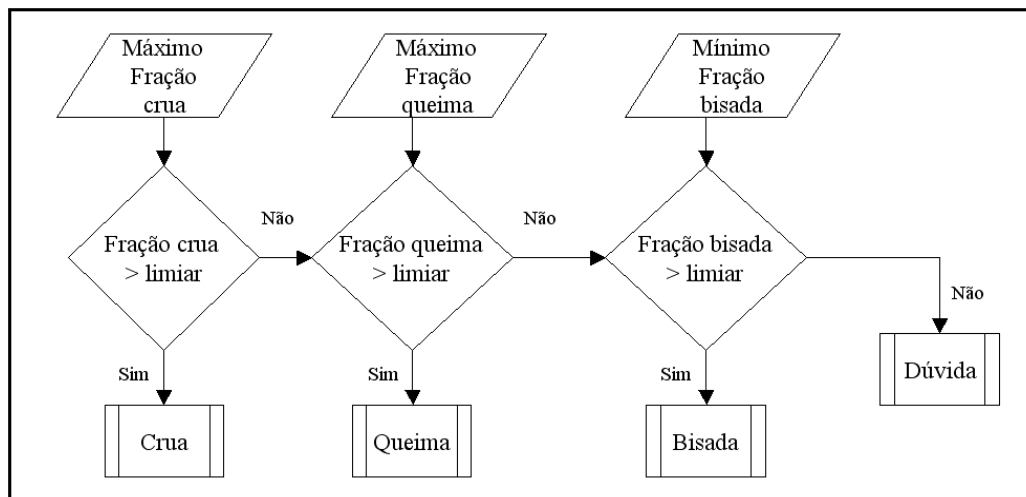


FIGURA 1. Esquema de regra de decisão para a formação do mosaico dos temas. **Outline of the decision rule to form the mosaic of the themes.**

Sobre esse mapa, foi aplicado algoritmo para remoção de *pixels* isolados. Esse algoritmo foi desenvolvido por BERKA et al. (2005) e leva em consideração a vizinhança de cada *pixel* para a remoção de áreas menores que 20 ha e de *pixels* isolados.

A seguir, foi feita a interpretação visual das imagens na tela do computador a fim de minimizar os erros de omissão e de inclusão gerados durante o processo de fatiamento e do mosaico das classes. Para isso, sobrepõe-se o mapa classificado automaticamente às imagens digitais disponíveis, incluindo as imagens com presença de nuvens para definir se o polígono classificado é de fato pertencente ao tema atribuído e para corrigir possíveis erros de borda.

Para a identificação do modo de colheita e correção dos erros de mapeamento, foram estabelecidos os seguintes critérios:

- A interpretação das imagens foi feita utilizando a composição colorida 3B4R5G;
- As imagens com nuvens não foram aproveitadas na geração das imagens-fração, mas foram utilizadas para fornecer informação em áreas parcialmente nubladas;
- As imagens foram avaliadas em ordem cronológica, e a partir do momento em que o modo de colheita foi identificado, ele não foi mais alterado, e

- As áreas mapeadas como dúvida, de acordo com a regra de decisão supracitada, deveriam ser dirimidas na interpretação visual por meio da edição matricial.

Após a interpretação visual, feita por diversos intérpretes, todos os mapas resultantes foram revisados por um único intérprete (revisor) para garantir a homogeneidade das interpretações e, em seguida, foi gerado um mosaico para a confecção do mapa final.

O mosaico dos mapas do modo de colheita de cada órbita/ponto foi feito para obter um único mapa de todo o Estado de São Paulo. A intersecção entre esse mapa e o mapa político-administrativo permitiu gerar informações sobre a área em hectares dos modos de colheita para cada município (AGUIAR et al., 2007).

Identificação das áreas com potencial para mecanização da colheita

Neste trabalho, foram utilizados os dados SRTM, resultantes da aplicação da metodologia desenvolvida por VALERIANO et al. (2006). A partir da grade de altimetria (MDE final), com resolução horizontal de 30 x 30 m, obteve-se a declividade.

A legislação vigente prevê, levando em consideração determinações de engenharia, que áreas com declividade maior que 12% são impróprias para colheita mecânica. Esse limiar foi utilizado para fatiar a grade de declividade em duas classes: áreas mecanizáveis e áreas não mecanizáveis. Em seguida, foi realizada a intersecção desse plano de informação com o mapa das áreas colhidas nos diferentes modos de colheita, resultando em seis diferentes classes, quais sejam: cana crua <12%; cana crua >12%; cana queima <12%; cana queima >12%; cana bisada <12%, e cana bisada >12%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mapeamento e estimativa da área de cana nos diferentes modos de colheita

O uso do MLME proporcionou o realce dos alvos de interesse nas imagens, conforme exemplificado na Figura 2. Essa figura também apresenta as significativas diferenças entre as curvas de refletância dos alvos, o que é pré-requisito do modelo (SHIMABUKURO & SMITH, 1991). Na Figura 2d, canto superior direito, é possível identificar áreas intercaladas de cana em pé e cana cortada crua, indicando que a colheita está sendo realizada de forma mecânica. Na banda 3 (vermelho), a refletância da cana em pé é baixa em decorrência da absorção da radiação incidente pelos pigmentos das folhas. Já na banda 4 (infravermelho próximo), a refletância é alta e aumenta gradativamente com o aumento da quantidade de folhas em função das múltiplas reflexões da radiação incidente nos espaços intracelulares do mesófilo foliar. Na banda 5 (infravermelho médio), a refletância diminui em função da absorção pela água nas folhas (Figuras 2a, 2c e 2) (RUDORFF & BATISTA, 1985).

Na Figura 2f, apresentam-se grandes extensões de áreas onde a cana foi colhida após a queima, com baixa refletância em todas as bandas analisadas, devido tanto à presença de material carbonizado quanto à ausência da palha e da estrutura foliar decorrente da queima (Figura 2e) (LARA et al., 2005). Em contrapartida, as áreas onde a cana foi colhida crua têm alta refletância devido à presença de restos culturais compostos principalmente por folhas secas (palha). Como consequência da redução do teor de água do interior das células das folhas mortas, pode-se notar o aumento da refletância observada na banda 5 (Figuras 2a, 2c e 2e).

Com o passar do tempo, o modo de colheita vai sendo descaracterizado nas imagens. As condições do tempo e o manejo da área colhida são os principais fatores que afetam na identificação do modo de colheita nas imagens. Quanto menor o tempo decorrido entre a colheita e a aquisição da imagem, maior será a certeza sobre a correta identificação do modo de colheita.

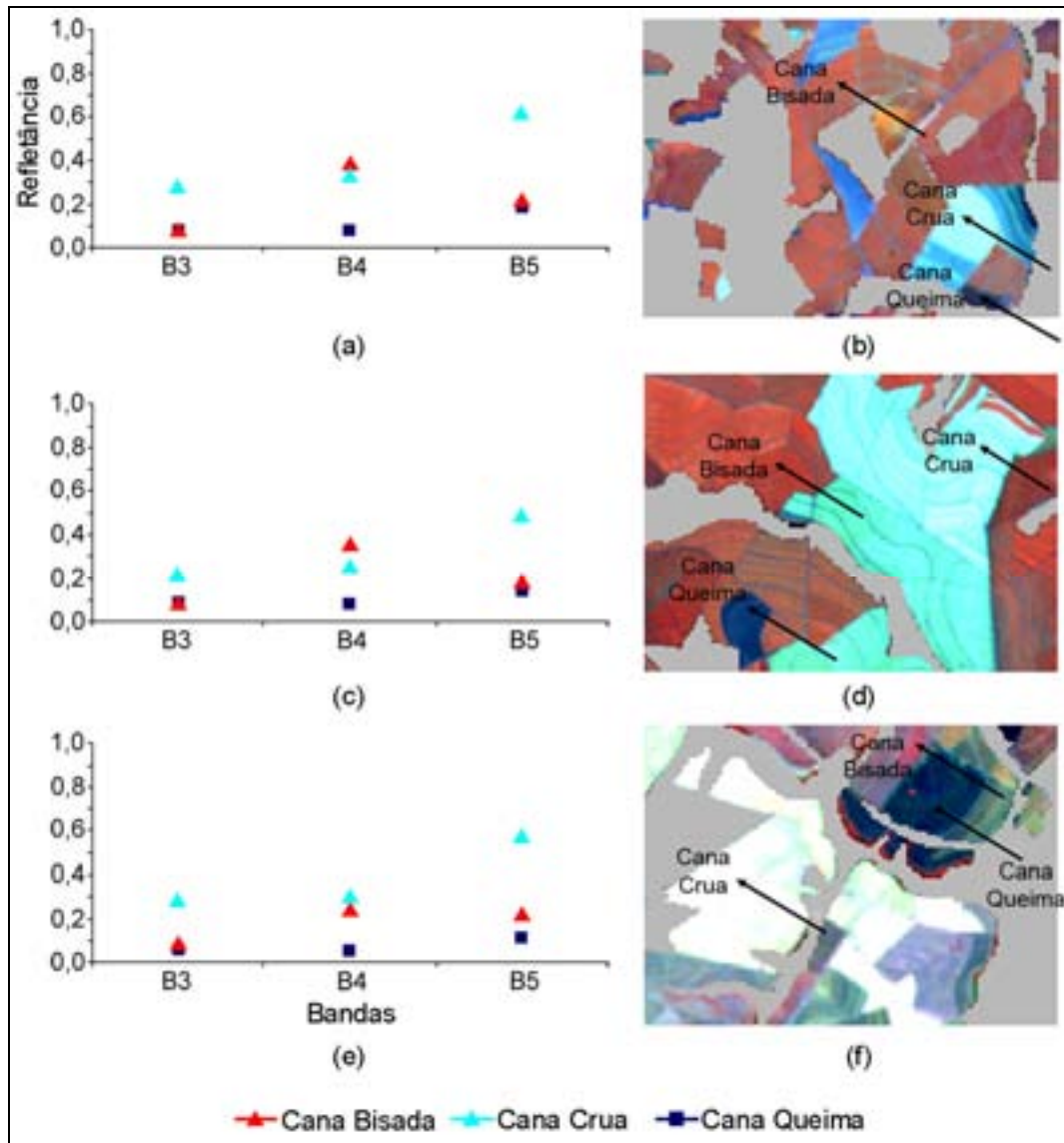


FIGURA 2. Resposta espectral dos alvos de interesse (a, c, e) e recortes de imagens TM do Landsat-5 em composição 3B4R5G das seguintes órbitas/pontos - datas: (b) 219/75 - 23-4-2006; (d) 220/74 - 1^o-6-2006; (f) 221/75 - 12-9-2006. **response of targets of interest (a, c, e) and an indent of the TM/Landsat-5 images in color composition 4R5G3B of the following rows/paths - dates: (b) 219/75 - 2006/4/23; (d) 220/74 - 2006/6/1; (f) 221/75 - 2006/9/12.**

As imagens de máximo e mínimo geradas a partir das imagens-fração dos *endmembers* para todas as datas disponíveis em cada órbita/ponto foram fatiadas. Na Figura 3, apresentam-se as imagens de máximo da cana crua e da cana queima, além da imagem de mínimo da cana em pé da órbita/ponto 221/75. As áreas em branco na Figura 3g foram inicialmente classificadas como dúvida e posteriormente corrigidas na interpretação visual com auxílio de todas as imagens disponíveis (Tabela 1).

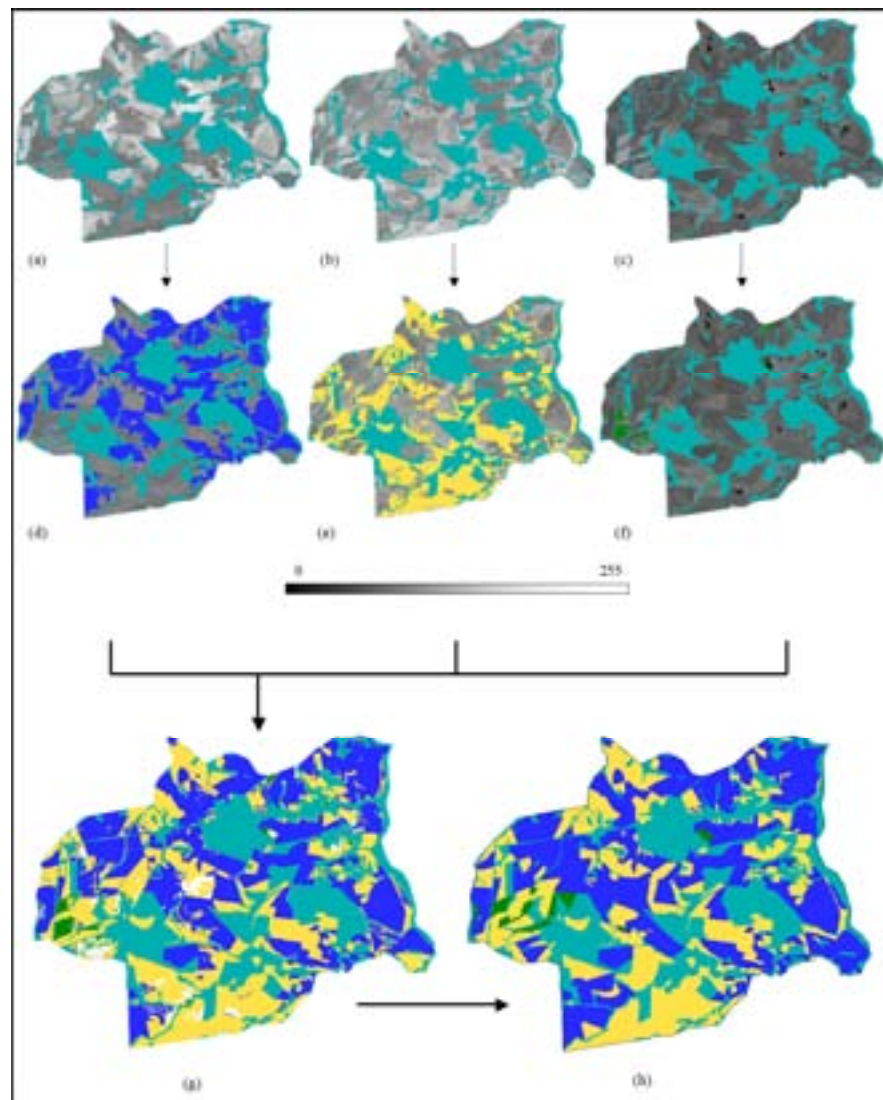


FIGURA 3. Processo de mapeamento do modo de colheita - município de Guariba - SP, com sobreposição do tema não cana em cor verde-clara: (a) imagem de máxima proporção de cana crua; (b) imagem de máxima proporção de cana queima; (c) imagem de mínima proporção de cana bisada; (d) fatiamento com limiar de 150 para cana crua (azul); (e) fatiamento com limiar de 145 para cana queima (amarela); (f) fatiamento com limiar de 130 para cana bisada (verde-escura); (g) mosaico das classes; (h) mosaico final, pós-limpeza de *pixels* e edição matricial. **Mapping process of the kind of harvest in the city of Guariba - SP, Brazil, with the overlay of the non-cane theme in cyan: (a) maximum proportion image of raw harvested cane; (b) maximum proportion image of burned cane; (c) minimum proportion image of unharvested cane; (d) slicing with threshold of 150 for raw harvested cane (blue); (e) slicing with threshold of 145 for burned cane (yellow); (f) slicing with threshold of 130 for unharvested cane (green); (g) mosaic of classes; (h) final mosaic, after pixel cleaning and matricial edition.**

A comparação entre as Figuras 3g e 3h aponta que *pixels* isolados, pequenas áreas (menores que 20 ha) e erros de mapeamento foram corrigidos com o algoritmo limpa *pixel* durante a fase de interpretação visual, dando maior fidelidade ao mapa.

Entre os dez municípios com maior área de cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, destacam-se os municípios de Piracicaba, Paraguaçu Paulista, Jaboticabal, Guaíra e Araraquara,

com não mais que 60% de cana colhida com o uso de fogo em 2006. Barretos e Jaú (quinto e sexto maiores produtores, respectivamente) queimaram cerca de 80 e 92% de suas áreas colhidas, respectivamente. Batatais, Lençóis Paulista e Morro Agudo queimaram para a colheita entre 60 e 80% de suas áreas de cana.

Entre os municípios que colheram toda sua área de cana sem o uso do fogo, destacam-se Agudo e Paulistânia, com aproximadamente 1.000 e 480 ha, respectivamente. Em sentido contrário, os municípios de Euclides Paulista (~1.000 ha de cana), Mirante do Paranapanema (~830 ha de cana) e Piquerobi (~ 850 ha de cana) colheram toda sua área de cana com o uso de fogo em 2006.

Áreas de cana sob diferentes modos de colheita e classes de declividade

O mapa de declividade foi separado em duas classes (menor e maior que 12%) a fim de identificar quais as áreas cultivadas com cana que podem atender à legislação sobre a obrigatoriedade da colheita mecânica. Para cada classe, foi estimada a área colhida de cana sob os diferentes modos de corte, em escala municipal, a partir da intersecção entre os mapas: do modo de colheita, da declividade e político-administrativo.

Na Figura 4, apresentam-se os mapas de altimetria e de declividade e o mapa da intersecção entre a declividade e o modo de colheita para o município de Guariba - SP. As declividades que ultrapassam os 12% encontram-se na porção oriental do município. Todavia, apenas 408 ha de cana são cultivados em declividade superior a 12% nesse município. Essas áreas estão, majoritariamente, próximas aos cursos d'água, e cerca de 60% e 40% dessa cana é colhida com e sem o uso do fogo, respectivamente.

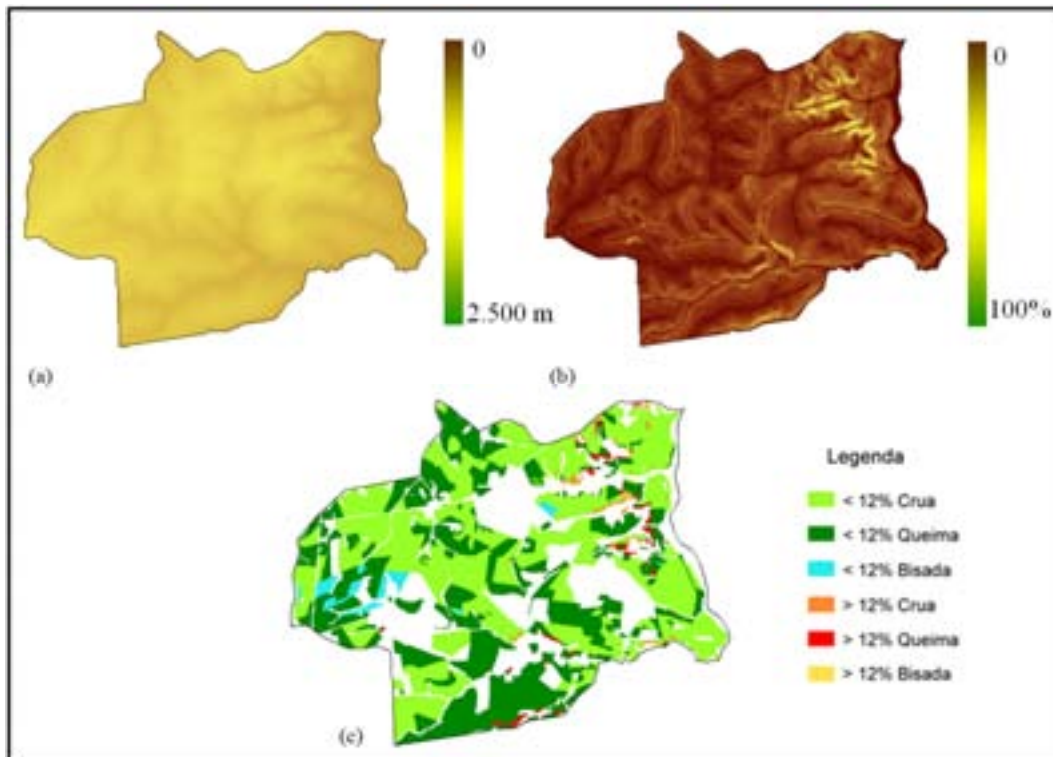


FIGURA 4. Mapas de altimetria (a); de declividade (b) e dos modos de colheita da cana por classe de declividade para o município de Guariba - SP (c). (a) **Altimetry map;** (b) **slope map,** and (c) **harvest kind map by slope class for the city of Guariba - SP, Brazil.**

Os resultados deste trabalho foram comparados com as informações da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA), em escala regional (Tabela 2). Para tanto, foram adotados os limites das regiões administrativas do Estado e a mesma legenda da SMA, com vistas a tornar possível a comparação.

TABELA 2. Área de cana colhida estimada pela SMA e por este trabalho por Região Administrativa (RA) e total. Em destaque, as Regiões Administrativas que não atingiram, de acordo com a metodologia proposta, a meta prevista pela legislação de colheita sem o uso do fogo para 2006. **Estimated area of harvested cane by the Environmental Department (SMA) and by this work (INPE) for each Administrative Regions (RA) and total. Administrative Regions that are highlighted did not reach, according to the proposed methodology, the goal, expected by the Green Protocol of harvested area without the use of fire for 2006.**

| Região Administrativa | Área Mecanizável ¹ | | Área Não Mecanizável ² | | Área Mecanizável SF ³ | | Área Total | | % Área Mecanizável SF | |
|-----------------------|-------------------------------|-----------|-----------------------------------|---------|----------------------------------|-----------|------------|-----------|-----------------------|------|
| | SMA | INPE | SMA | INPE | SMA | INPE | SMA | INPE | SMA | INPE |
| Araçatuba | 168.998 | 259.908 | 52.283 | 754 | 45.554 | 86.885 | 224.637 | 260.662 | 27,0 | 33,4 |
| Barretos | 240.693 | 267.440 | 19.675 | 1.412 | 62.338 | 62.032 | 262.927 | 268.852 | 25,9 | 23,2 |
| Bauru | 187.886 | 303.370 | 106.817 | 11.684 | 47.309 | 95.740 | 302.687 | 315.054 | 25,2 | 31,6 |
| Campinas | 160.719 | 365.773 | 206.603 | 29.551 | 47.002 | 149.164 | 399.193 | 395.324 | 29,2 | 40,8 |
| Central | 223.689 | 306.856 | 79.979 | 14.416 | 75.420 | 115.186 | 316.855 | 321.271 | 33,7 | 37,5 |
| Franca | 306.983 | 363.234 | 49.238 | 14.870 | 99.935 | 111.839 | 363.530 | 378.104 | 32,6 | 30,8 |
| Marília | 205.205 | 245.085 | 38.988 | 3.431 | 57.585 | 69.308 | 253.137 | 248.516 | 28,1 | 28,3 |
| Pres. Prudente | 114.779 | 161.770 | 41.212 | 1.451 | 32.113 | 34.548 | 160.373 | 163.221 | 28,0 | 21,4 |
| Ribeirão Preto | 307.810 | 373.274 | 55.692 | 16.841 | 113.018 | 148.172 | 378.948 | 390.115 | 36,7 | 39,7 |
| São J.R. Preto | 309.422 | 344.747 | 45.431 | 1.702 | 79.753 | 153.524 | 368.172 | 346.450 | 25,8 | 44,5 |
| Sorocaba | 61.060 | 141.595 | 72.943 | 10.921 | 14.377 | 59.332 | 137.673 | 152.516 | 23,5 | 41,9 |
| Total | 2.287.243 | 3.133.051 | 768.862 | 107.033 | 674.404 | 1.085.730 | 3.168.133 | 3.240.083 | 29,5 | 34,7 |

*Fonte: dados SMA: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. ¹ Área mecanizável: declividade < 12%; ² Área não mecanizável: declividade > 12%; ³ SF: sem fogo.

Cabe ressaltar que, para a SMA, estão inclusas na coluna *Área Não Mecanizável* as áreas de cana de fornecedores (≤ 150 ha) que estão livres da obrigação de colher parte da cana sem queima (Tabela 2). No presente trabalho, não foi possível identificar ou separar as áreas de cana de fornecedores, pois não se dispunha dessa informação.

A coluna *Área Mecanizável SF* refere-se à área de cana colhida crua com declividade menor que 12% e, de acordo com a Tabela 2, a área apontada neste estudo é aproximadamente 61% maior do que a área estimada pela SMA. Tal fato deve-se, em parte, à diferença na metodologia adotada. A SMA baseia-se em requerimentos para autorização de queima das áreas de cana. Os produtores são obrigados, de acordo com a legislação estadual, a informar a localização e a extensão da área queimada, enquanto a metodologia adotada neste estudo avalia nas imagens de sensores orbitais a real diferença entre as áreas de cana em pé, cana colhida crua e cana queimada.

Uma das causas da diferença entre as estimativas na coluna *Área Total* se deve ao fato de este estudo considerar todas as áreas de cultivo de cana, incluindo a cana para a produção de bebidas, ao contrário da SMA que considera apenas a cana para produção de açúcar e álcool; todavia, estima-se que tal diferença não é maior que 1%.

De acordo com a metodologia apresentada, as regiões de Barretos, Marília e Presidente Prudente não atingiram a meta de colher pelo menos 30% da área de cana sem o uso do fogo e colheram apenas 23,2%, 28,3% e 21,4% da área de cana crua, respectivamente. Em sentido contrário, a SMA apontou que somente as regiões Central, de Franca e de Ribeirão Preto cumpriram tal meta (Tabela 2). Em todo o Estado de São Paulo, a área percentual estimada para cana colhida sem o uso do fogo foi de 34,7% contra 29,5% apontados pela SMA (Tabela 2).

Como resultado consequente, pôde-se estimar a área de cana bisada, cerca de 3,1% (~100.000 ha). Vale ressaltar que esse percentual corresponde às áreas identificadas como *não colhidas* em todas as etapas do mapeamento e revisadas nas imagens adquiridas entre janeiro e março de 2007 a fim de confirmar que essas áreas realmente não foram colhidas em 2006.

O percentual de colheita de cana crua por município pode ser observado na Figura 5. Nota-se a formação de regiões de mesmo comportamento quanto ao modo de colheita da cana, o que se deve, em parte, à área de atuação das usinas e à política de cada grupo produtor. Ressalta-se que a região Nordeste do Estado, maior produtora estadual, tem seus municípios majoritariamente compreendidos na classe de 15 a 30% de cana colhida crua. Essa figura aponta as regiões em que é necessário maior comprometimento para reduzir o uso do fogo na colheita da cana.

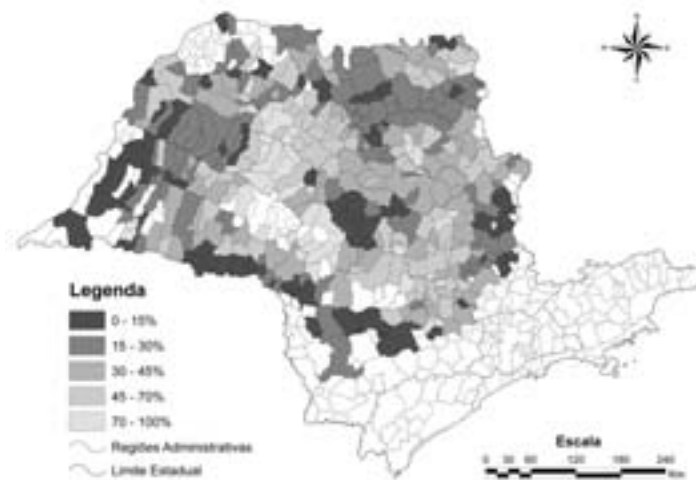


FIGURA 5. Percentagem de cana colhida crua por município no Estado de São Paulo. **Percentage of raw harvested cane by each city in the state of São Paulo, Brazil.**

CONCLUSÕES

Foi possível identificar e mapear o modo de colheita da cana-de-açúcar nas imagens TM multitemporais do satélite Landsat-5.

33,5% da área total foi colhida sem o uso do fogo (cana crua) e 66,5% foi colhida com o uso do fogo; quanto à área mecanizável, 34,7% foi colhida sem o uso do fogo e 75,3% com o uso do fogo.

A metodologia proposta permite monitorar o modo de colheita, desde que se tenham diversas imagens livres de nuvens durante o período de colheita.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Márcio Valeriano, pela cessão dos dados de altimetria, e à equipe de mapeamento do LAF.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, D.A. *Monitoramento da área colhida de cana-de-açúcar por meio de imagens do sensor MODIS*. 2007. 99 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007a.

AGUIAR, D.A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T.; SÁNCHEZ, G.A.; BARROS, M.A.; SUGAWARA, L.M.; SHIMABUKURO, Y.E.; MOREIRA, M.A. *Mapeamento da cana colhida no Estado de São Paulo - ano safra 2006/2007*. São José dos Campos: INPE, 2007. 51 p.

BERKA, L.M.S.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, R.M. Reclassificação controlada de pixels isolados em mapas de cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2005. p.33-40.

- CROSS, A.M.; SETTLE, J.J.; DRAKE, N.A.; PAIVINEN, R.T.M. Subpixel measurement of tropical forest cover using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, London, v.12, n.5, p.1.119-1.129, 1991.
- IGG. INSTITUTO GEOGRÁFICO GEOLÓGICO. Carta hipsométrica do Estado de São Paulo. 1943. São Paulo (SP): Escala 1: 1.000.000.
- LARA, L.L.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L.A.; CAMARGO, P.B.; VICTORIA, R.L.; FERRAZ, E.S.B. Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil. *Atmospheric Environment*, Amsterdam, v.39, n.26, p.4.627-4.637, 2005.
- LOBELL, D.B.; ASNER, G.P. Cropland distributions from temporal unmixing of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, Amsterdam, v.93, n.3, p.412-422, 2004.
- LOPES, F.S.; RIBEIRO, H. Mapeamento de internações hospitalares por problemas respiratórios e possíveis associações à exposição humana aos produtos da queima da palha de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, São Paulo, v.9, n.2, p.215-225, 2006.
- MORAES, M.A.F.D. Indicadores do mercado de trabalho do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar do Brasil no período de 1992-2005. *Estudos Econômicos*, São Paulo, v.37, n.4, p.875-902, 2007.
- PASTOR, C.Q. *Aplicación del modelo de mezclas espectrales en la teledetección forestal*. 2002. 222 f. Tese (Doutorado em Física Aplicada) - Universidad de Valhadolide, 2002.
- PONÇANO, W.L. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. Instituto Tecnológico de São Paulo (IPT). 1981 São Paulo (SP): Escala 1:1.000.000.
- QUARMBY, N.A.; TOWNSHEND, J.R.G.; SETTLE, J.J.; WHITE, K.H.; MILNES, M.; HINDLE, T.L.; SILLEOS, N. Linear Mixing modelling applied to AVHRR data for crop area estimation. *International Journal of Remote Sensing*, London, v.13, n.3, p.415-425, 1992.
- QUINTANO, C.; SHIMABUKURO, Y.E.; FERNANDEZ, A.; DELGADO, J.A. A spectral unmixing approach for mapping burned areas in Mediterranean countries. *International Journal of Remote Sensing*, London, v.26, n.7, p.1.493-1.498, 2006.
- RABUS, B.M.; EINEDER, A.R.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission- a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Maryland, v.57, p.241-262, 2003.
- RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. *Resposta espectral da cana-de-açúcar através de dados multitemporais do MSS do Landsat-4*. São José dos Campos: INPE, 1985. 12 p.
- 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 de 2003/2004. *Agricultura em São Paulo*, São Paulo, v.52, n.1, p.21-39, 2005.
- SHIMABUKURO, Y.E.; SMITH, J.A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, New York, v.29, n.1, p.16-20, 1991.
- TUCKER, C.J.; GRANT, D.M.; DYKSTRA, J.D. NASA's global orthorectified Landsat data set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Maryland, v.70, n.3, p.313-322, 2004.
- VALERIANO, M.M.; KUPLICH, T.M.; STORINO, M.; AMARAL, B.D.; MENDES JÚNIOR, J.N.; LIMA, D.J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazônia with shuttle radar topographic mission-90 m data. *Computers & Geosciences*, Amsterdam, v.32, p.1.169-1.181, 2006.