

**Identificação automática de áreas queimadas no Pantanal a partir de uma
classificação por um suporte bayesiano e informações de contexto espacial usando
imagens multitemporais de sensoriamento remoto**

Daniel Capella Zanotta ¹

Hiran Zani ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1.758 Jd. Granja - CEP: 12227-010
São José dos Campos, SP, Brasil
{zanotta, hzani} @dsr.inpe.br

Resumo. Neste trabalho, uma metodologia para detecção automática de queimadas é sugerida. Através de técnicas de detecção de mudanças por subtração de imagens tomadas em duas datas distintas, uma classificação obedecendo ao critério Bayesiano é realizada utilizando parâmetros estatísticos (média e matriz de covariância) extraídos automaticamente do próprio conjunto de dados resultante através do algoritmo *Expectation Maximization*. Em um trabalho anteriormente realizado no Pantanal, uma metodologia semelhante foi adotada para detectar queimadas, porém, não considerava a possível ocorrência de alagamentos, confundindo os mesmos com queimadas no mapa final. No presente trabalho, as regiões alagadas são automaticamente identificadas e excluídas do mapa final resultando em uma melhora na qualidade da detecção. A exemplo da abordagem anteriormente realizada, neste trabalho a última etapa do processo envolve a aplicação de operadores morfológicos de erosão/dilatação de imagens com o objetivo de inserir informações de contexto espacial no mapa final, refinando-o. Experimentos foram conduzidos para uma cena Landsat, sensor TM com regiões atingidas por queimadas e alagamentos. Os resultados mostram que a acurácia é aumentada com a consideração das áreas alagadas e a subsequente aplicação do contexto espacial, chegando a valores próximos de 97% de acerto quando comparados com um mapa de referência.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, detecção de áreas queimadas, contexto espacial, Pantanal.

Abstract. In this paper, a methodology for automatic detection of burned areas is suggested. Following techniques of change detection by subtraction of images taken on two different dates, the classification criterion is performed using Bayesian statistical parameter (mean and covariance matrix) extracted automatically from the own set of data using the Expectation Maximization algorithm. In a previous work done in the Pantanal, a similar methodology was used to detect burned areas, however, did not consider the possible occurrence of flooding, confusing them with fires in the final map. In this study, the flooded regions are automatically identified and excluded from the final map, resulting in an improvement in the detection process. Like the previous approach, in this work the final process involves the application of morphological operators of erosion and dilation of images in order to insert information from the spatial context, refining the final map. Experiments were conducted to a TM-Landsat scene with areas affected by fires and flooding. The results show that the accuracy is increased with the consideration of flooding mask and the subsequent application of spatial context, reaching values close to 97% of accuracy when compared with a reference map.

Key-words: remote sensing, burned areas detection, spatial context, Pantanal.

1. Introdução

Informações sobre incêndios ocorrentes no território brasileiro são indispensáveis para prevenir e estimar os impactos causados por esses eventos no ecossistema. Através do trabalho realizado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), mapas periódicos (a cada 3 horas) são disponibilizados na internet informando a localização dos focos para o Brasil e outros países adjacentes da América do Sul. A confecção dos mapas é feita a partir da composição de dados provenientes de vários satélites/sensores (NOAA/AVHRR, TERRA/MODIS, GOES). De acordo com a metodologia adotada pelo sistema de monitoramento, os pontos onde os focos são localizados compreendem uma área de 5,3 km² (28 km de resolução espacial), mas apenas uma área compreendida por algumas dezenas de metros quadrados queimados são necessários para sinalizar um foco (CPTEC 2010). Dessa forma, o incêndio produzido por algumas dezenas de metros quadrados poderá causar o mesmo efeito que uma área de aproximadamente 5,3 km². Isso impede que haja uma delimitação e cálculo preciso da área que está sendo queimada. Dentre os vários produtos gerados pela metodologia, destacam-se, além da indicação dos focos, risco de incêndio (mínimo, baixo, médio, alto, crítico e indeterminado) (**Figura 1a**), mapas de quantidade de fumaça (ug/m³) (**Figura 1b**), entre outros disponíveis em diversos formatos. A ocorrência de focos de queimadas, principalmente nos meses caracterizados por baixas quantidades de chuva (Julho a Setembro), aumenta consideravelmente, tornando difícil a tarefa de acompanhamento, delimitação precisa e controle das queimadas.

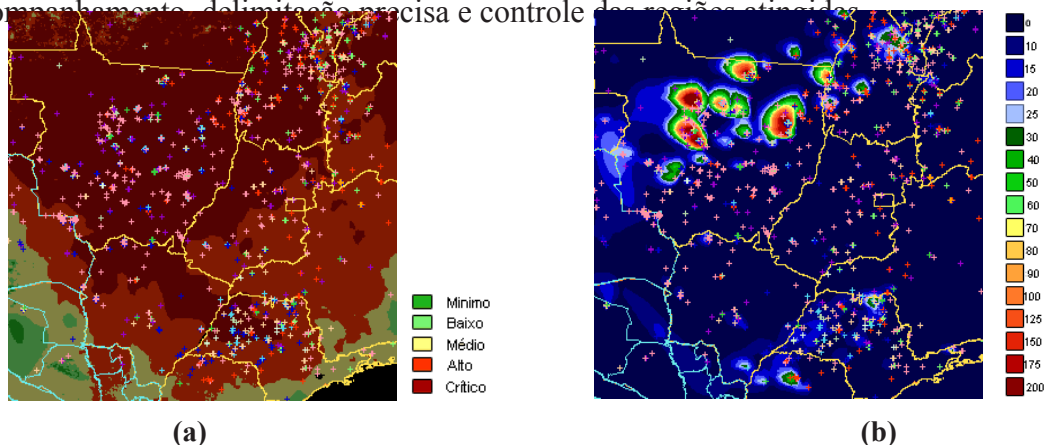


Figura 1. Informações disponibilizadas pelo programa de monitoramento de queimadas do CPTEC/INPE (10/07/2010): (a) mapa para riscos de queimada para a região centro-

oeste do Brasil e (b) quantidade de fumaça na atmosfera (unidade ug/m^3) para a mesma região. Fonte: CPTEC/INPE.

Métodos de detecção automática de mudanças a partir do sensoriamento remoto têm sido largamente estudados por diversos pesquisadores nas últimas décadas com o intuito de auxiliar na produção sistemática de mapas de mudanças (Fung 1990; Singh 1989; Bruzzone e Serpico 1997). Em Zanotta (2009), um método baseado no algoritmo *Expectation Maximization* (EM), da forma proposta em Duda *et al.* (2001), foi empregado para identificar regiões atingidas por queimadas. No trabalho, a banda quatro de imagens do satélite CBERS-2B sensor CCD tomadas antes e depois da ocorrência de uma queimada foram subtraídas gerando uma imagem de diferenças entre as duas datas. Além de erros no registro e mudanças aleatórias, a grande quantidade de variações em curtos espaços de tempo, que ocorrem no Pantanal, causadas por alagamentos, avanço da vegetação, secas, quantidade de sedimento nos lagos, entre outros, geram um ruído espacial na imagem diferença, prejudicando a definição e delimitação das queimadas. Com o objetivo de contornar esse problema, um filtro morfológico de erosão seguida de dilatação foi aplicado melhorando consideravelmente a imagem classificada (Zanotta 2009). Apesar de ter gerado resultados satisfatórios, a metodologia apresentou algumas desvantagens: nas imagens da região estudada (imediações de Corumbá/MS), as áreas que sofreram alagamentos foram confundidas com queimadas, e o processo iterativo para a aplicação de informações de contexto espacial pelos operadores morfológicos na imagem pós-classificada necessitava da definição de um critério de parada.

No presente trabalho, sugere-se um aperfeiçoamento do método utilizado em Zanotta (2009). De acordo com a nova abordagem, a estimativa dos parâmetros estatísticos (média e matriz de covariância) e das probabilidades *a priori* baseado no algoritmo *Expectation Maximization* (EM) (Duda *et al.*, 2001) proposto em Bruzzone e Prieto (2000) para separar as classes mudança e não-mudança será utilizado para gerar os parâmetros de entrada em uma classificação Bayesiana. Nessa abordagem, o mapa de mudanças resultante apresenta, além das mudanças de todo tipo efetivamente ocorridas na região, mudanças causadas por erros no registro e pequenas mudanças sem interesse prático. A grande quantidade de variações em

curtos espaços de tempo, que ocorrem no Pantanal, causadas por alagamentos, avanço da vegetação, secas, quantidade de sedimento nos lagos, entre outros, geram um ruído espacial na imagem diferença, prejudicando a definição e delimitação das queimadas. No Pantanal, dentre as citadas, as regiões alagadas são as mais frequentemente confundidas com queimadas por possuírem uma resposta espectral e tamanhos compatíveis (Huete *et al.*, 1985; Mitri e Gitas 2004). No presente trabalho, pretende-se aplicar um método para identificar e excluir as áreas alagadas do mapa de queimadas. Por último, a exclusão de mudanças sem interesse prático remanescentes do processo automático, geralmente apresentadas através de ruído espacial no mapa resultante, será considerada através da aplicação de informações de contexto espacial através de operadores morfológicos básicos de erosão/dilatação de imagens binárias, a exemplo do trabalho anteriormente realizado.

2. Material e Métodos

Duas imagens do satélite *Landsat 5* sensor *TM* (órbita/ponto 227/072), da porção norte do Pantanal, registradas em 31/08/2001 e 05/10/2002, foram utilizadas para testar o método. A **Figura 2** mostra a localização da área de estudo e um recorte antes e após o evento de queimada. As imagens possuem 7 bandas: banda 1, que cobre a faixa espectral do

azul (0.45 a 0.52 μm); banda 2 na faixa do verde (0.50 a 0.60 μm); banda 3 na faixa do vermelho (0.63 a 0.69 μm); banda 4 na faixa do infravermelho próximo (0.76 a 0.90 μm); banda 5 no infravermelho médio (1.55 a 1.75 μm); banda 6 no infravermelho termal (10.4 a 12.5 μm); e banda 7 no infravermelho médio (2.08 a 2.35 μm). Como as mudanças de interesse são causadas por queimadas, a banda 4 foi selecionada como por salientar bem as áreas ocupadas por vegetação antes e depois da ocorrência dos focos de queimada. As cenas foram fornecidas pelo *U.S. Geological Survey* e possuem o nível de correção L1T, que incorpora correções radiométricas e georreferenciamento com exatidão de 0,8 pixel (USGS 2010). Os pré-processamentos realizados consistiram na calibração radiométrica, com valores de ganho e *offset* atualizados de acordo com Chander *et al.* (2009) e conversão dos números digitais para reflectância aparente de superfície. Posteriormente, foi aplicado o método de correção atmosférica de subtração do pixel escuro, descrito por Chavez (1988). Este procedimento é amplamente utilizado na literatura de sensoriamento remoto (Song *et al.*, 2001) e sua aplicação é essencial para a etapa de subtração de imagens.

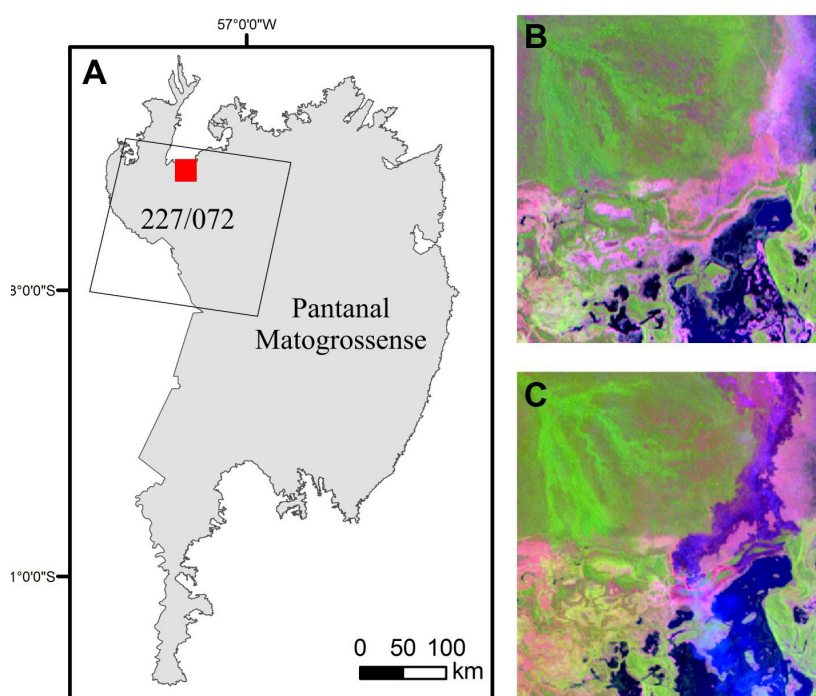


Figura 2. Localização da área de estudo. (A) Cobertura da cena 227/072 e recorte que representa a área de estudo em vermelho. (B) Detalhe da imagem adquirida antes da queimada, composição 5(R)4(G)3(B) de 31/08/2001. (C) Detalhe da imagem adquirida após a queimada, composição 5(R)4(G)3(B) de 05/10/2002.

Após os pré-processamentos, as imagens foram comparadas por subtração pixel a pixel na banda 4. Este processo resulta em uma imagem de diferenças, em níveis de cinza, salientando as mudanças ocorridas entre as duas datas consideradas. O algoritmo EM, conforme proposto em Duda *et al.* (2001), foi empregado para definir automaticamente os limiares estatísticos de separabilidade entre as classes mudança e não-mudança. As estimativas de saída do algoritmo EM foram utilizadas como dados de entrada em um classificador Bayesiano (**Equação 1**), onde $G_i(X)$ é a função de decisão para cada classe de alteração, p é a dimensionalidade dos dados, no caso $p=2$, Σ_i é a matriz de covariância, μ_i a média e $P(\omega_i)$ a probabilidade *a priori* de cada classe.

$$G_i(X) = (2\pi)^{-p/2} |\Sigma_i|^{-1/2} \exp[1/2 (X - \mu_i) \Sigma_i^{-1} (X - \mu_i)] P(\omega_i) \quad (1)$$

Na consideração de duas classes ω_1 e ω_2 (mudança e não-mudança, respectivamente) a regra Bayesiana de decisão é dada por:

se $G_1(X) > G_2(X)$ então: $X \in \omega_1$
caso contrário: $X \in \omega_2$

Para a imagem analisada, o método de detecção de mudanças retorna uma imagem binária com valores digitais de 0 (preto) representando as queimadas, e 255 (branco) representando as regiões não queimadas. Esse resultado pode ser refinado com a inserção de informações de contexto espacial. Aqui, as informações de contexto serão aplicadas através de operadores morfológicos de erosão/dilatação de imagens binárias. O funcionamento desses operadores aplicados a esse tipo de imagens do Pantanal está descrito no trabalho anteriormente realizado Zanotta (2009). No trabalho citado, o método se mostrou eficaz para eliminar o ruído espacial existente na imagem de diferenças causado por erros no registro e pequenas alterações sem interesse prático, porém, as regiões apresentando alagamentos foram consideradas como queimadas, já que apareciam na imagem de diferenças gerada pela classificação Bayesiana. Devido ao tamanho dessas regiões, o método de atribuição de informações de contexto espacial adotado não foi capaz de eliminar essas áreas erroneamente classificadas como queimadas.

Para resolver o problema de confusão pelo algoritmo entre áreas de queimadas e alagamentos, neste trabalho, foi aplicado o método de fatiamento da banda 5 (Frouin *et al.*, 1996), visando identificar e excluir polígonos que representam corpos d'água antes de aplicar as informações de contexto espacial pelos operadores morfológicos. Os baixos valores de reflectância para corpos d'água registrados no infravermelho contrastam com outros alvos de maior reflectância (Alfoldi 1982). Frazier e Page (2000) demonstraram que através do simples fatiamento da banda 5 é possível delimitar corpos d'água com exatidão global de até 96.9%. Foi aplicado o limiar de 0 a 0.5% de reflectância na banda 5, identificado por meio de estatística descritiva das regiões de interesse, coletadas sob alagamentos e rios. Assim, todos os valores de reflectância contidos no intervalo previamente estabelecido foram agrupados em uma classe de corpos d'água. Com a disponibilidade da máscara contendo os polígonos que representam os corpos d'água para cada imagem, foi feita uma subtração das duas resultando em um mapa de alagamentos ocorridos entre as duas datas. Esse resultado foi utilizado para excluir tais regiões do mapa de queimadas.

O resultado da classificação Bayesiana seguida da exclusão das áreas alagadas foi submetido ao processo de inserção de informações de contexto espacial pelos operadores morfológicos de erosão/dilatação. O número de iterações sucessivas para a ação dos operadores de erosão/dilatação deve ser fixado pelo usuário anteriormente ao processo. Um valor ótimo pode variar de acordo com o tamanho das regiões queimadas encontradas na cena. De acordo com alguns experimentos realizados nessa região e os resultados encontrados em Zanotta (2009), parece razoável fixar o número de iterações entre 10 e 20. Os valores compreendidos por esse intervalo, mesmo que não sejam considerados ideais, apresentam resultados bastante razoáveis.

3. Resultados e Discussão

Com auxílio do mapa de referência, as imagens produzidas pela classificação bayesiana (**Figura 3a**), pela posterior exclusão das áreas alagadas (**Figura 3c**) e subsequente inserção das informações do contexto espacial (**Figura 3b**) foram analisadas e os graus de acurácia foram calculados. Como esperado, a classificação Bayesiana apresentou um mapa de mudanças que revela as áreas atingidas por queimadas na parte superior direita, algumas regiões alagadas e o ruído espacial associado ao processo. A **Figura 3c** é simplesmente o resultado da exclusão das áreas alagadas encontradas pelo método exposto acima. O aumento do percentual de acerto resultante desse procedimento (89,4 para 92,7%) é evidenciado pela **Figura 4** e pela **Tabela 1**.

Apesar disso, o principal objetivo dessa consideração no processo foi reduzir consideravelmente o tamanho das áreas alagadas no mapa final. Assim, a subsequente aplicação das informações de contexto espacial torna-se capaz de eliminar completamente as pequenas regiões remanescentes (**Figura 3d e 3e**), alcançando valores próximos a 97% de acerto para o

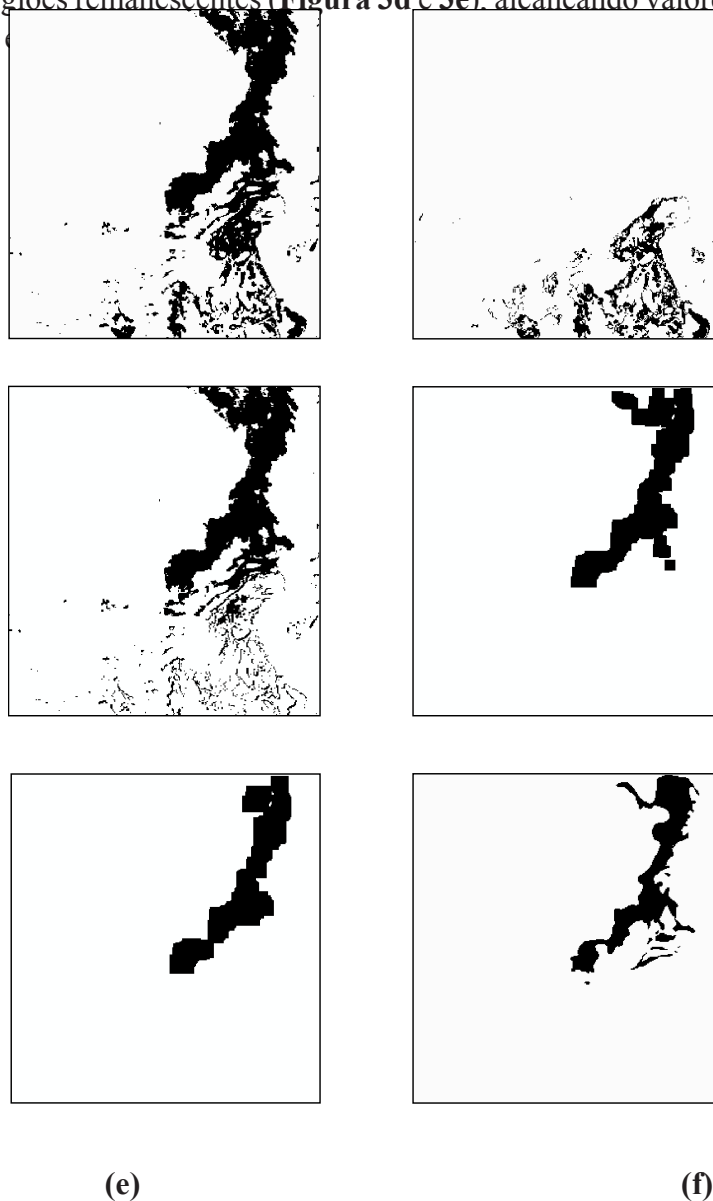


Figura 3. Resultados encontrados com a metodologia aplicada: (a) imagem classificada

automaticamente a partir do algoritmo EM e classificação bayesiana; **(b)** polígonos que representam os corpos d'água e áreas alagadas nas duas datas consideradas; **(c)** imagem **(a)** com exclusão das áreas consideradas alagadas; **(d)** imagem **(a)** com aplicação de contexto espacial (10 iterações); **(e)** imagem **(a)** com aplicação de contexto espacial (15 iterações); **(f)** mapa de referência.

A **Figura 4** mostra uma curva para o percentual de acerto em função do número de iterações do operador erosão-dilatação. Em verde é mostrado o comportamento da aplicação do operador diretamente na imagem resultante da classificação bayesiana, enquanto na curva azul a aplicação do operador se deu na imagem após a exclusão das áreas consideradas como alagamento. Com base nessa curva, podemos determinar que o processo atinge uma razoável estabilidade a partir da décima iteração. No gráfico é possível verificar também que a curva experimenta um período de razoável estabilidade até a vigéssima iteração. Isso permite inferir que um bom resultado com esse método po

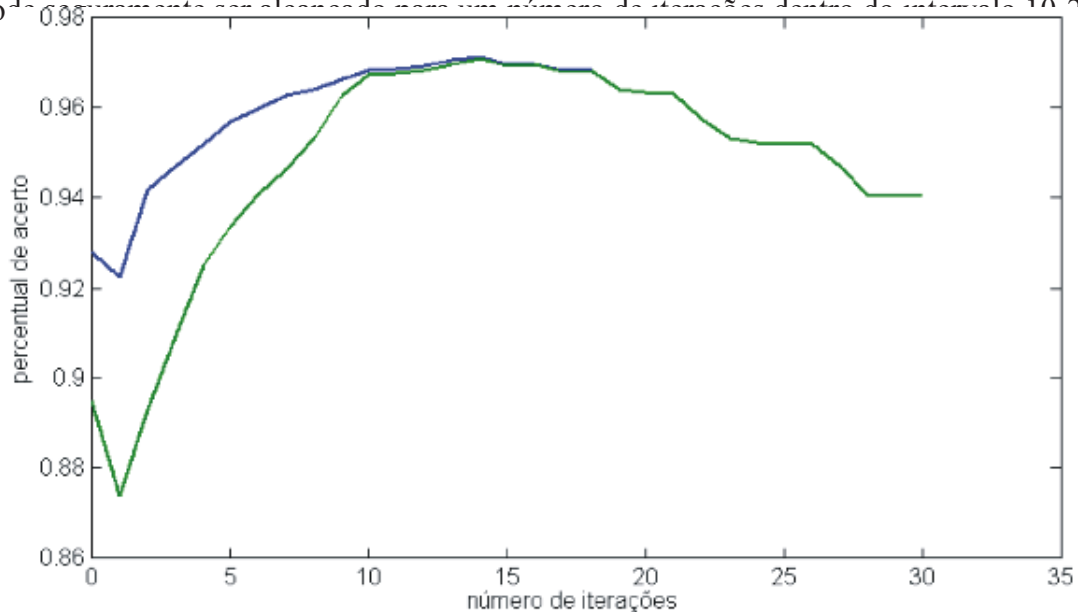


Figura 4. Comportamento do percentual de acerto frente ao número de iterações aplicadas com os operadores de erosão-dilatação.

A **Tabela 1** mostra que uma redução considerável nos erros pós-classificação é alcançada com a combinação da classificação pelo critério Bayesiano a partir de parâmetros estatísticos gerados automaticamente pelo algoritmo EM, seguida da exclusão das áreas consideradas alagadas e aplicação de informações de contexto espacial pelo operador erosão-dilatação de imagens.

Tabela 1. Resultados obtidos nos experimentos.

Método de Detecção das Queima-	Pixels Classifica-	Total de Pixels	Percen-
das	dos Corretamente	Classificados In-	tual de
		corretamente	acerto
Imagem Classificada	93232	10997	89,4 %

Imagem Classificada + Exclusão de áreas alagadas	96704	7525	92,7 %
Imagem Classificada + Exclusão de áreas alagadas + Aplicação do contexto com 15 iterações	101206	3023	97,1 %

É interessante notar que por volta da 15ª iteração as curvas azul e verde tornam-se sobrepostas. Isso é explicado pelo fato de que com o aumento do número de iterações, mesmo grandes regiões, como as resultantes de alagamentos, são eliminadas da imagem. Porém esse fator depende das dimensões das regiões alagadas, ou seja, quanto maior o tamanho das regiões alagadas, maior o número de iterações necessárias para ocorrer a sobreposição. Dependendo do tamanho das regiões alagadas, tal efeito pode ocorrer somente com um número grande de iterações, onde a acurácia do processo se encontra em fase descendente. Isso assegura que a pré eliminação das áreas rotuladas como alagamento é fator importante para a qualidade do resultado final.

4. Conclusões

Neste trabalho um aprimoramento da técnica automática para a detecção de queimadas proposta em Zanotta (2009) foi sugerida e testada para uma região do Pantanal. Os resultados obtidos revelam que a classificação por um suporte Bayesiano juntamente com a eliminação de áreas rotuladas como alagamentos e posterior aplicação de operadores morfológicos de erosão seguida de dilatação apresentou resultados bastante satisfatórios na detecção de áreas atingidas por queimadas. O número de iterações do processo é tido como ótimo entre a décima e a vigésima. Os resultados obtidos no processo erosão-dilatação mostram que a acurácia é aumentada logo após o reconhecimento das áreas alagadas, sendo que sua pleno valor só é obtido após a aplicação dos operadores morfológicos de contexto espacial. A partir dos resultados apresentados pelo mapa final, o dimensionamento das áreas atingidas pode ser calculado, bastando para tanto conhecer a resolução espacial do sensor utilizado.

Um futuro desenvolvimento desta linha de pesquisa tem o objetivo de reunir e testar outras imagens com áreas maiores do Pantanal para confirmar a operacionalidade do método como um produto em larga escala agregado aos já oferecidos pelo programa de monitoramento de áreas queimadas do CPTEC-INPE.

5. Agradecimentos

Os autores externam seus agradecimentos a CAPES pela concessão de bolsa de doutorado a Daniel Zanotta, e a FAPESP pela concessão de bolsa de doutorado a Hiran Zani (processo 09/00672-3).

6. Referências

- Alfoldi, T.T. Remote sensing for water quality monitoring. In: C.J. Johannsen & J.L. Sanders, Remote sensing for resources management. **Iowa: Soil Conservation Society of America**, p. 317-328, 1982.
- Bruzzone, L.; Serpico, S.B. An iterative technique for the detection of land-cover transitions in

multitemporal remote-sensing images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 4, p. 858-867, 1997.

Bruzzone, L.; Prieto, D.F. Automatic Analysis of the Difference Image for Unsupervised Change Detection. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 3, p. 1171-1182, 2000.

Chander, G.; Markham, B.L. Helder, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 5, 893-903, 2009.

Chavez, P. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 3, p. 459-479, 1988.

CPTEC – INPE (www.cptec.inpe.br/queimadas/) acessado em 10/07/2010.

Duda, R.O.; Hart P.E.; Stork D.G. Pattern Classification, New York: John Wiley & Sons, 2001. 482 p.

Frazier, P.S.; Page, K.J. Water body detection and delineation with Landsat TM data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 66, n. 12, p. 1461–1467, 2000.

Frouin, R.; Schwindling, M.; Deschamps, P. Y. Spectral reflectance of sea foam in the visible and near-infrared: in situ measurements and remote sensing implications. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. c6, pp. 14361–14371, 1996.

Fung, T. An assessment of TM imagery for land-cover change detection. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, p. 681-684, 1990.

Giardina, C.R.; Dougherty, E.R. **Morphological Methods in Image and Signal Processing**, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice–Hall, 1988. 321 p.

Huete, A.R.; Jackson, R.D.; Post, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. **Remote Sensing of Environment**, v. 17, n. 1, p. 37-53, 1985.

Mitri, G.H.; Gitas, I.Z. A semi-automated object-oriented model for burned area mapping in the Mediterranean region using Landsat-TM imagery. **International Journal of Wildland Fire**, v. 13, n. 1, p. 367-376, 2004.

Singh, A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data, **International Journal of Remote Sensing**, v. 6: 989-1003. 1989.

Song, C.; Woodcock, C.E.; Seto, K.C.; Lenney, M.P.; Macomber, S.A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric. **Remote Sensing of Environment**, v. 75, n. 2, p. 230– 244, 2001.

USGS. **United States Geological Service**. 2010. Disponível em:

< http://edcsns17.cr.usgs.gov/helpdocs/landsat/product_descriptions.html>. Acessado em 28 de Abril de 2010.

Zanotta, D.C. Detecção de queimadas a partir de técnicas semi-automáticas e operadores morfológicos de erosão/dilatação usando imagens de sensoriamento remoto. **Geografia (Rio Claro. Impresso)**, v. 34, p. 817-824, 2009.