



AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA EXTRAÇÃO DE CORPOS D'ÁGUA E ÁREAS INUNDADAS EM IMAGENS LANDSAT-TM

Hiran Zani - Doutorando em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Bolsista FAPESP. hiran@dsr.inpe.br;

Rogério Ribeiro Marinho - Mestrando em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Bolsista CNPq. rogeosr@dsr.inpe.br;

André Augusto Gavlak - Mestrando em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Bolsista CAPES. gavlak@dsr.inpe.br.

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo avaliar diferentes métodos de extração de corpos d'água e áreas alagadas em imagens Landsat TM em duas regiões hidrográficas de ambientes distintos (área de estudo 1 predomínio de relevo plano e área 2 com relevo montanhoso). Foram testados o uso do fatiamento da banda TM5, índice de água modificado (MNDWI), transformação tasseled cap e modelo de mistura espectral (LSU). Os resultados obtidos foram comparados com pontos coletados sistematicamente através de interpretação visual. Os melhores resultados foram obtidos através dos métodos de LSU e fatiamento da banda TM5, alcançando valores de exatidão global de 98,53% para área 1 e de 59,77% para a área 2.

PALAVRAS-CHAVE: Classificação de imagens, Landsat-TM, Detecção de Corpos d'água, Áreas úmidas.

ABSTRACT: This study aims to evaluate different methods for water body and wetlands extraction, using LANDSAT TM imagery in two different environments. The study area 1 has a predominance of plain relief and the study area 2 is marked by mountainous topography. We had tested the following methods: TM5 slice, modified normalized difference water index (MNDWI), tasseled cap transformation and linear spectral unmixing (LSU). The results were compared with a large number of control point data, collected systematically through visual interpretation. The best results were obtained using LSU and TM5 slice, obtaining an overall accuracy of 98.53% for study area 1 and 59.77% for study area 2.

KEY WORDS: Image classification, Landsat-TM, Water body detection, Wetlands



1 INTRODUÇÃO

A identificação e delineamento das águas superficiais são de grande importância para a predição de enchentes (p.e., Smith, 1997), monitoramento dos recursos hídricos (p.e., Sanyal et al., 2004) e mapeamento de áreas que são alagadas apenas sazonalmente (p.e., Pietroniro et al., 2002). A análise de dados de sensoriamento remoto contribui neste tipo de abordagem, possibilitando uma visualização sinóptica dos corpos d'água em diversas escalas.

Os métodos utilizados para a extração de corpos d'água e áreas alagadas vão desde simples operações de fatiamento em bandas espectrais específicas (Frouin et al., 1996; Frazier e Page, 2000), operações aritméticas de bandas (McFeeters, 1996; Xu, 2006), a transformações das bandas multiespectrais (Ouma e Tateishi, 2006) e mapeamentos em nível sub-pixel (Knight et al., 2009). Diante desta variedade de métodos disponíveis se faz necessário a avaliação destes procedimentos, tanto em termos de desempenhos individuais como de forma comparativa, para áreas com diferentes características físicas. Desta maneira, é possível identificar os métodos ideais para situações e problemas específicos. Neste sentido, este trabalho como objetivo avaliar a exatidão e características dos métodos mais comuns de processamento digital de imagens para extração de corpos d'água e áreas de inundação. Imagens LANDSAT-TM foram classificadas utilizando fatiamento da banda TM5, índice de água modificado (MNDWI), transformação tasseled cap e modelo de mistura espectral (LSU).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Áreas de Estudo e Datasets - Neste estudo foram utilizadas duas áreas com características geográficas distintas (Fig. 1). A área de estudo 1 correspondente ao baixo curso do rio Branco, região norte do Brasil no Estado de Roraima cuja planície de inundação está localizada no hemisfério Norte da Amazônia Brasileira. Este ambiente apresenta relevo plano, cercado por vegetação natural e composto por diversos sistemas aquáticos (rios, lagos, várzeas). Já a área de estudo 2 corresponde ao baixo curso do rio Itajaí-Açu até sua foz no oceano Atlântico, no Estado de Santa Catarina região sul do Brasil. Entre os corpos d'água, nesta região há o predomínio do rio Itajaí-Açu e canais de drenagem de menor vazão.

Topograficamente, a área é caracterizada por uma planície margeando o rio e por terrenos fortemente ondulados, com altitudes de até 750m acima do nível do mar. Esta área sofre forte pressão antrópica, principalmente pela proximidade de áreas urbanas e atividades agrícolas, como o cultivo de arroz irrigado.

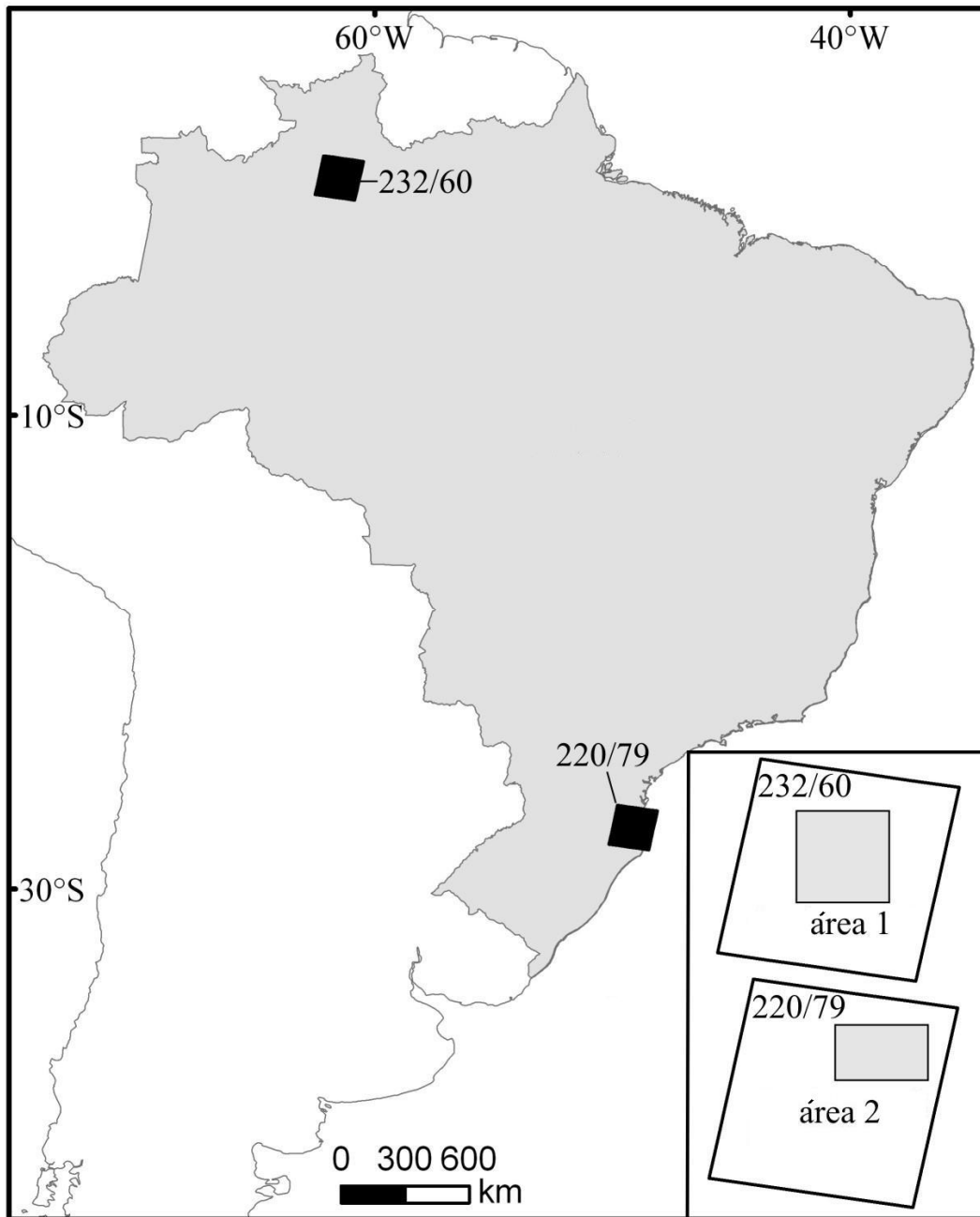


Figura 1: Localização das áreas de estudo.



Neste trabalho foram utilizadas duas cenas do sensor TM a bordo dos satélites LANDSAT 4 (área 1 órbita/ponto 232-60 de 26/09/1992) e LANDSAT 5 (área 2 órbita/ponto 220-79 de 04/06/2007). Estas imagens são distribuídas gratuitamente pelo United States Geological Survey (USGS) através da rede mundial de computadores (<http://glovis.usgs.gov>). Ambas as cenas estão em nível de correção L1T, que incorpora correções radiométricas baseadas nos dados coletados pelo próprio sensor, e geométricas feitas a partir pontos de controle coletados com o auxílio do MDE-SRTM (USGS, 2009).

2.2 Pré-processamento dos dados: Restauração - A restauração de imagens é uma técnica de correção radiométrica que visa corrigir as distorções inseridas pelo sensor durante o processo de geração do dado resultando em uma imagem com melhor realce. Este procedimento opera através de um filtro linear, com pesos obtidos a partir das configurações específicas do sensor. Esta etapa é realizada em conjunto com uma interpolação dos pixels, que produz uma grade mais detalhada e melhora a resolução espacial efetiva. Para isto, aplicou-se o algoritmo implementado no software SPRING 5.1 (Camara et al., 1996) nas duas cenas utilizadas, que tiveram seus pixels reamostrados para 15 m.

2.3 Calibração - O procedimento de calibração radiométrica foi aplicado para transformar os números digitais das cenas utilizadas em reflectância de topo da atmosfera. Esta operação é fundamental para uma correta aplicação dos dados de sensoriamento remoto (Mather, 2004), pois compensa o desgaste que o sensor sofre com a ação do tempo e normaliza o ângulo de elevação solar, permitindo a estimação de parâmetros biofísicos. Esta etapa foi realizada no software ENVI 4.5, com valores de ganho de offset atualizados de acordo com Chander et al. (2009) e informações relativas à posição da órbita extraídas do arquivo de metadado que acompanha as cenas.

2.4 Correção atmosférica - Segundo Mather (2004) a correção atmosférica para imagens orbitais deve ser realizada nos seguintes casos: (1) operações aritméticas que envolvam razões de bandas; (2) utilização de modelos físicos para o tratamento dos dados orbitais; e (3) estudos multitemporais. O presente trabalho faz parte dos casos (1) e (2), o que justifica a aplicação de um procedimento para correção atmosférica. Foi utilizado o método de subtração



do pixel escuro, descrito por Chavez (1988). Este procedimento é relativamente simples e amplamente utilizado na literatura de sensoriamento remoto (Song et al., 2001). Considera que a imagem possui um ganho de reflectância que é atribuído ao espalhamento atmosférico. Assim, a partir dos alvos escuros é possível identificar a contribuição da atmosfera e subtrair dos demais pixels da imagem.

Esta etapa foi realizada no software ENVI 4.5. Com auxílio das bandas TM1 e TM5 foram identificadas sombras de nuvens e corpos d'água puros, que possuem valores de reflectância próximos a zero. A partir destas regiões foi estimada a contribuição total da atmosfera, posteriormente subtraída de cada cena.

2.5 Extração dos Corpos d'Água: Fatiamento da Banda TM5 - Bandas espectrais localizadas na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR) são ideais para a delimitação de corpos d'água e áreas alagadas, devido aos baixos valores de reflectância da água que contrastam com outros alvos (p.e., solo e vegetação) que possuem maior reflectância nestes comprimentos de onda (Alfoldi, 1982). A técnica de fatiamento consiste na simples definição de um limiar mínimo e máximo para representação de regiões homogêneas em imagens orbitais. Assim, todos os valores de reflectância contidos no intervalo previamente estabelecido são agrupados em uma classe. Frazier e Page (2000) demonstraram que através do fatiamento da banda TM5 é possível delimitar corpos d'água com uma exatidão global de até 96.9%. No entanto, o desempenho deste método depende do conhecimento exato do intervalo de todos os corpos d'água presentes na cena, além disto, sua exatidão pode ser consideravelmente reduzida pela ocorrência de sombras e áreas de vegetação que foram recém queimadas. Este procedimento foi realizado no software ENVI 4.5. A identificação dos limiares mínimos e máximos para o fatiamento foi obtida com auxílio da estatística descritiva dos valores de reflectância de regiões de interesse previamente coletadas sob regiões alagadas e rios.

2.6 Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) - Índices utilizados para a extração de áreas inundadas exploram as diferentes respostas espectrais das regiões do infravermelho e do visível (p.e., Ouma e Tateishi, 2006). Um índice pioneiro e amplamente utilizado é o normalized difference water index (NDWI), proposto por McFeeters (1996):



NDWI = (Verde-NIR)/(Verde+NIR) sendo para os satélites LANDSAT 4 e 5, Verde a banda TM2, e NIR a banda espectral do infravermelho próximo TM4. Esta operação resulta em uma imagem monocromática com os corpos d'água realçados e representados por valores positivos (McFeeters, 1996), enquanto para a vegetação e solo serão atribuídos valores nulos ou negativos.

No entanto, esta abordagem pode confundir alvos urbanos com corpos d'água (Xu, 2006) e falha no realce de áreas alagadas com pouca profundidade (Knight et al., 2009). Neste sentido, Xu (2006) propõe a modificação do NDWI (MNDWI) com a utilização de uma banda no intervalo espectral do SWIR: $MNDWI = (Verde-SWIR)/(Verde+SWIR)$, sendo para os satélites LANDSAT 4 e 5 Verde a banda TM2, e SWIR a banda TM5. Esta operação produz uma imagem monocromática com os alvos de água representados por valores positivos.

2.7 Tasseled cap - A transformação tasseled cap foi inicialmente desenvolvida para o estudo de culturas agrícolas (Kauth e Thomas, 1976), sendo identificada posteriormente como importante ferramenta para a redução do volume de dados espectrais (Crist e Cicone, 1984). Este processo transforma as bandas multiespectrais dos sensores TM em três componentes, que são diretamente associados com características físicas das cenas: (1) brightness, associado com solo; (2) greenness, associado com vegetação; e (3) wetness, relacionado com umidade do solo e vegetação (Crist e Kauth, 1986). Os componentes resultantes da transformação tasseled cap expressam em níveis de cinza e com maior brilho as características físicas em que estão associados. Desta maneira, corpos d'água e áreas alagadas estarão representados pelos valores de maior intensidade do componente wetness. De maneira geral, este método é capaz de identificar feições de menores dimensões espaciais que o índice MNDWI (Ouma e Tateishi, 2006), o que pode resultar em um traçado mais suave dos limites dos corpos d'água.

Este procedimento foi realizado no software ENVI 4.5 com os coeficientes de transformação específicos para o sensor TM, propostos por Crist e Cicone (1984). Para a classificação dos corpos d'água foi identificado o limiar mínimo e máximo dos níveis de cinza que representam estas feições, com o auxílio de estatísticas descritivas obtidas a partir de regiões de interesse previamente coletadas sobre composição colorida $TM5(R)/TM4(G)/TM3(B)$.



2.8 Modelo de Mistura Espectral - A análise de imagens orbitais pelo modelo espectral de mistura linear (LSU) assume que os valores de reflectância de cada pixel estão em função da soma de um número finito de endmembers (Shimabukuro e Smith, 1991). O procedimento inicial desta abordagem consiste na identificação dos endmembers que compõe a cena. A partir destas referências, são extraídas imagens de abundância relativas às proporções individuais dos endmembers que compõe os pixels. No presente trabalho, a seleção dos endmembers foi realizada seguindo as orientações de Smith et al. (1985), que é efetuada com auxílio da transformação dos componentes principais. Estes autores observaram que os endmembers podem ser identificados nas extremidades de gráficos de dispersão, feitos com as duas primeiras bandas das componentes principais.

Este processamento foi realizado no software ENVI 4.5, onde foram extraídas as imagens monocromáticas correspondentes aos endmembers água, vegetação e solo exposto. Para a extração dos corpos d'água foi utilizada apenas a imagem referente ao endmember água, através de um limiar mínimo de 0.75 de proporção de água no pixel. Assim, todos os pixels da imagem de abundância do endmember água com valores de 0.75 a 1 foram agrupados na classe de corpos d'água.

2.9 Avaliação dos Resultados - foi feita através de uma matriz de confusão, obtida com os resultados individuais das classificações contra pontos que representam a verdade de campo. A partir deste procedimento foi calculado o índice Kappa, avaliado segundo os parâmetros de Landis e Koch (1977), e obtida a exatidão global dos mapas temáticos. A coleta dos pontos verdade foi realizada com base em análise visual da composição colorida TM5(R)/TM4(G)/TM3(B) dos recortes das cenas utilizadas. Foi utilizado o esquema de amostragem sistemática (Congalton, 1991), que assegura boa representatividade dos corpos d'água com diferentes características espaciais (p.e., rios, lagos, wetlands). Para diminuir a subjetividade da validação, buscou-se coletar o maior número de pontos representativos possível, o que tornou esta etapa bem extensa, sendo classificação visual dos corpos d'água feita ponto-a-ponto. Foram coletados um total de 216.712 para a área de estudo 1 e 292.397 para a área de estudo 2.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os desempenhos individuais dos métodos aplicados, para as duas áreas de estudo, estão representados na tab 1. Na área de estudo 1 observa-se que os métodos de fatiamento da banda 5 e LSU tiveram maior concordância com a verdade de campo, com um desempenho excelente verificado pelo índice Kappa. O método de extração de corpo d'água pelo tasseled cap resultou em uma concordância moderada, embora sua exatidão global seja boa. Na área de estudo 2 observa-se que todos os métodos aplicados resultaram em baixa concordância e com uma acurácia global razoável.

Tabela 1: Parâmetros individuais do desempenho dos métodos aplicados.

Área 1				
	Area (km ²)	Total (%)	Kappa	Exatidão Global (%)
Fatiamento TM5	449	5.42	0.87	97.30
MNDWI	462	5.60	0.79	89.43
Tasseled cap	379	4.59	0.48	79.97
LSU	568	6.89	0.91	98.53
Área 2				
	Area (km ²)	Total (%)	Kappa	Exatidão Global (%)
Fatiamento TM5	106	16.22	0.38	59.77
MNDWI	117	17.89	0.38	59.44
Tasseled cap	129	19.70	0.37	58.79

Esta diferença na concordância dos resultados pode ser explicada por dois fatores: (1) características físicas das áreas de estudo; e (2) menor extensão areal dos corpos d'água presentes na área de estudo 2. O fator (1) está relacionado com a alta amplitude relevo presente na área 2, responsável pelas sombras de relevo, que possuem comportamento espectral similar aos corpos d'água (Alfoldi, 1982; Jensen, 2007). Este fato contribuiu para os maiores erros que foram observados nesta aplicação. O fator (2) refere-se às diferentes características hidrológicas das áreas de estudo. A área de estudo 2 possui rios mais estreitos e menor quantidade de áreas alagadas com relação à área 1, que contribui para maior influência de alvos secundários (p.e., mata galeria, edificações urbanas) e resulta em subestimação dos corpos d'água (p.e., Ouma e Tateishi, 2006).

Com relação aos limites dos corpos d'água extraídos, observa-se para a área de estudo 1 que o fatiamento da banda 5 e o LSU resultaram em traçados mais exatos (Fig. 2). Os



métodos tasseled cap e MDNWI apresentaram problemas na delimitação de feições estreitas e produziram artefatos (Fig. 2). Nenhum dos métodos aplicados foi capaz de eliminar os artefatos gerados pelo sombreamento do relevo na área 2 (Fig. 3). No entanto, a partir da Figura 3 é possível observar que os métodos de fatiamento da banda 5 e LSU geraram menor quantidade de artefatos que os demais. As observações feitas em ambas as áreas de estudo corroboram com os resultados obtidos por Frazier e Page (2000) e Ryu et al. (2002) que demonstraram que o simples fatiamento da banda 5 é eficiente para delimitar corpos d'água e áreas alagadas. Com relação aos resultados obtidos a partir do LSU, observou-se que as feições extraídas por este método possuem contornos mais suaves, fato também verificado por (Knight et al., 2009).

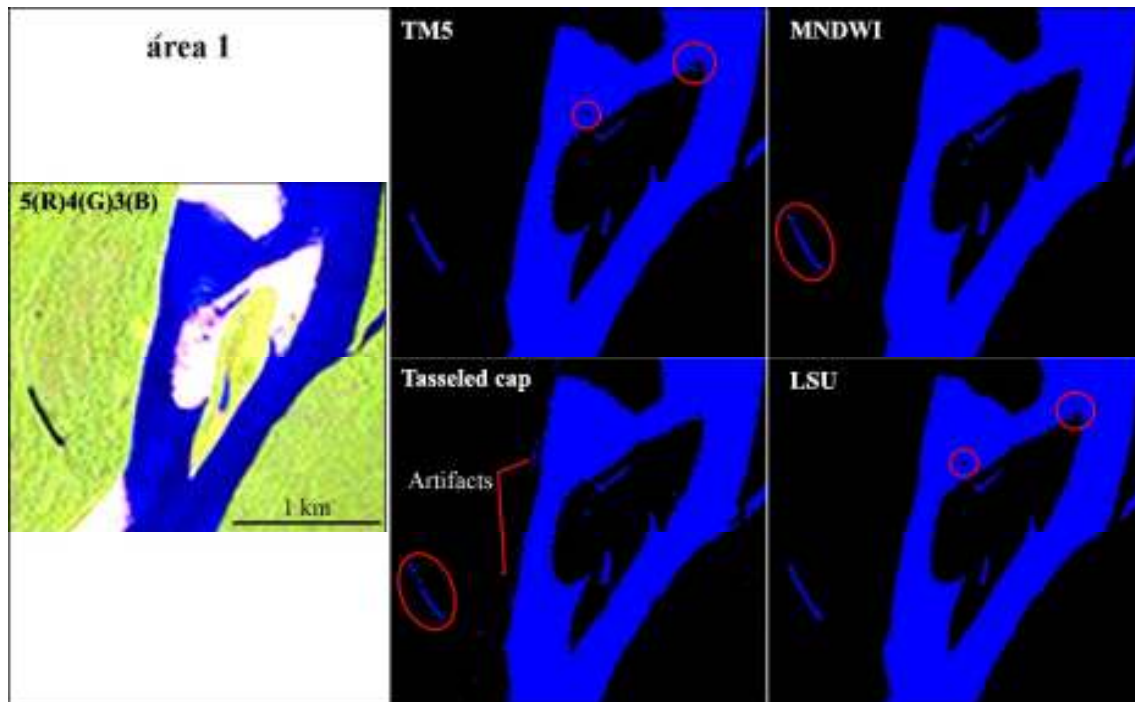


Figura 2: Detalhe da área de estudo 1.

Na Fig. 2 observa-se que os métodos de fatiamento da banda TM5 e LSU foram capazes de extrair com maior precisão ilhas e detalhes nas margens, marcados por contornos vermelhos. Os métodos MNDWI e tasseled cap produziram descontinuidades em feições estreitas (contornos vermelhos). Os artefatos gerados pelo tasseled cap estão apontados por linhas vermelhas.

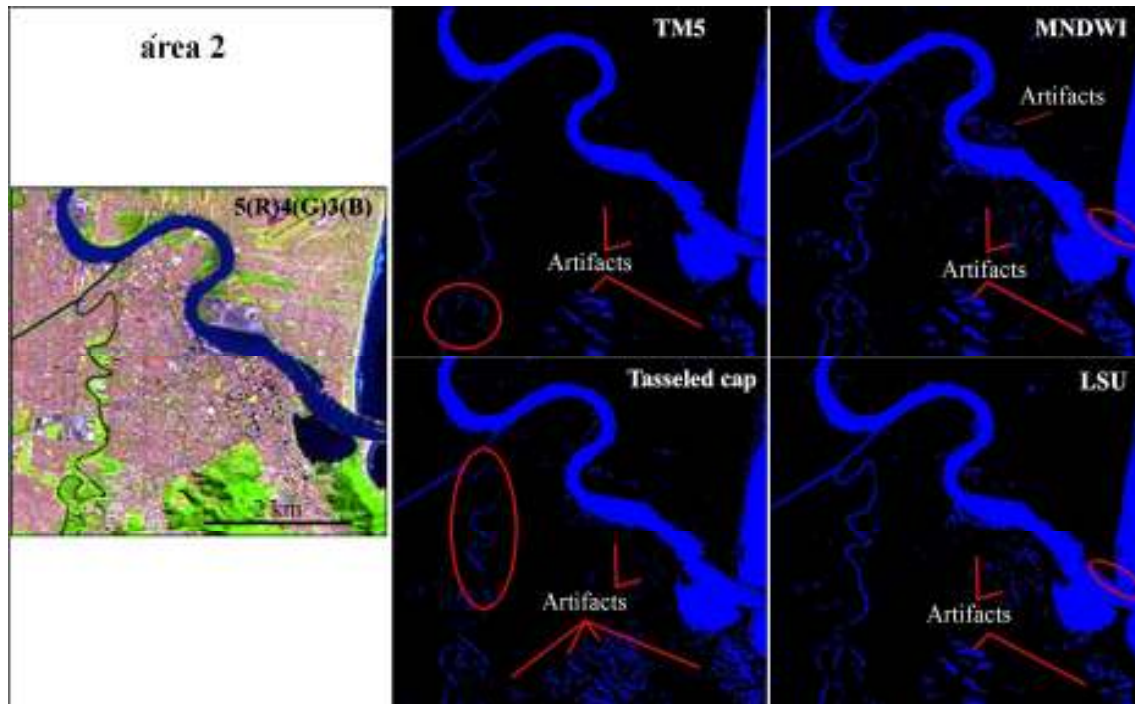


Figura 3: Detalhe de área de estudo 2.

Conforme observado na Fig. 3, todos os métodos produziram artefatos, induzidos pelo sombreamento do relevo, apontados por linhas vermelhas. Os métodos tasseled cap e fatiamento TM5 apresentam falhas no reconhecimento de feições estreitas, assinaladas por contornos vermelhos. Os métodos MNDWI e LSU superestimaram limites estreitos dos corpos d'água (contornos vermelhos).

Os limiares dos métodos aplicados não foram uniformes entre as áreas estudadas (Fig. 4), em função das diferentes características dos corpos d'água existentes. A partir da Fig. 4 é possível observar que todos os histogramas da área de estudo 1 apresentam maior variância que os da área de estudo 2. Isto representa a maior diversidade de corpos d'água presente na área de estudo 1, ao passo que na área de estudo 2 os rios possuem menor aporte sedimentar e pouca frequência de áreas alagadas, resultando em um reflectância uniforme para os corpos d'água desta área. Estudos de campo realizados por Novo et al. (2004) mostraram que os corpos d'água na planície amazônica possuem grande variabilidade espectral, fato que pode ser explicado pela alta diversidade de componentes opticamente ativos dissolvidos, o que é comum em grandes planícies alagáveis continentais, semelhantes à área de estudo 1.

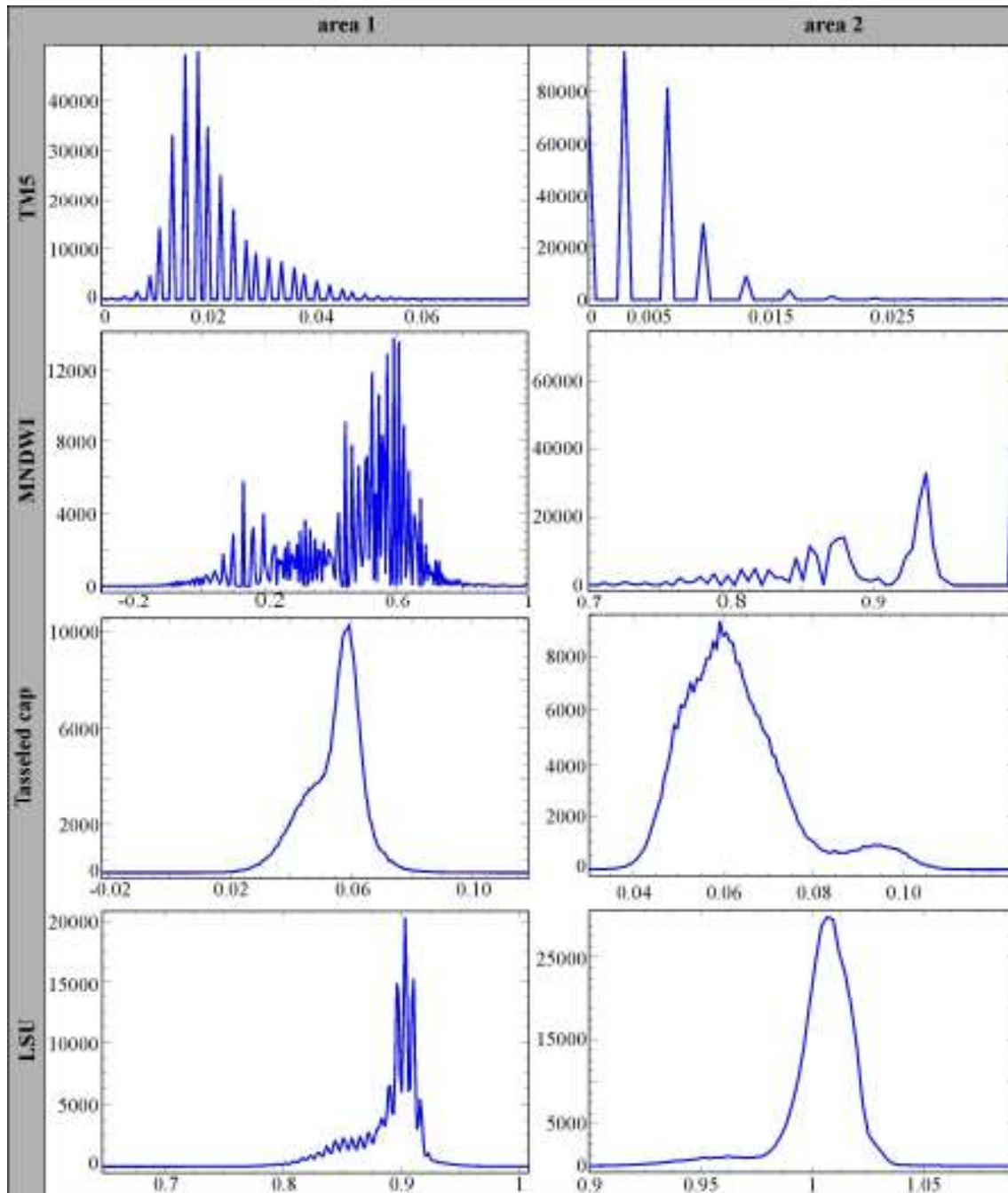


Figura 4: Histogramas das regiões de interesse para obtenção dos limiares de cada método.

Com relação ao total da área total dos corpos d'água, foram constatadas diferenças significativas entre os métodos utilizados (Tab. 2). Podemos observar que para a área 1 a



maior diferença na estimativa da superfície mapeada ocorreu entre os métodos tasseled cap e LSU (50%) e para a área 2 ocorreu entre os tasseled cap e fatiamento TM5 (21%). A menor diferença entre os métodos na área 1 ocorreu entre MNDWI e fatiamento TM5 (3%) e na área 2 a menor diferença ocorreu entre o LSU e MNDWI (4%). Estas diferenças refletem os desempenhos obtidos para cada metodologia. A respeito da estimativa da superfície d'água mapeada observamos através da Figura 5 que os métodos fatiamento TM5 e MNDWI têm os mesmos comportamentos para ambas as áreas de estudo. Já para os métodos tasseled cap e LSU são inversos. Sendo que para a área 1 o LSU classificou maior número de pixels e na área 2 o tasseled cap foi o que classificou maior quantidade de pixels

Tabela 2: Diferenças entre as áreas estimadas por cada método.

Área 1	Área 2	Fatiamento TM5	MNDWI	Tasseled cap	LSU
Fatiamento TM5		-	10%	21%	6%
MNDWI		3%	-	10%	4%
Tasseled cap		18%	22%	-	15%
LSU		27%	23%	50%	-

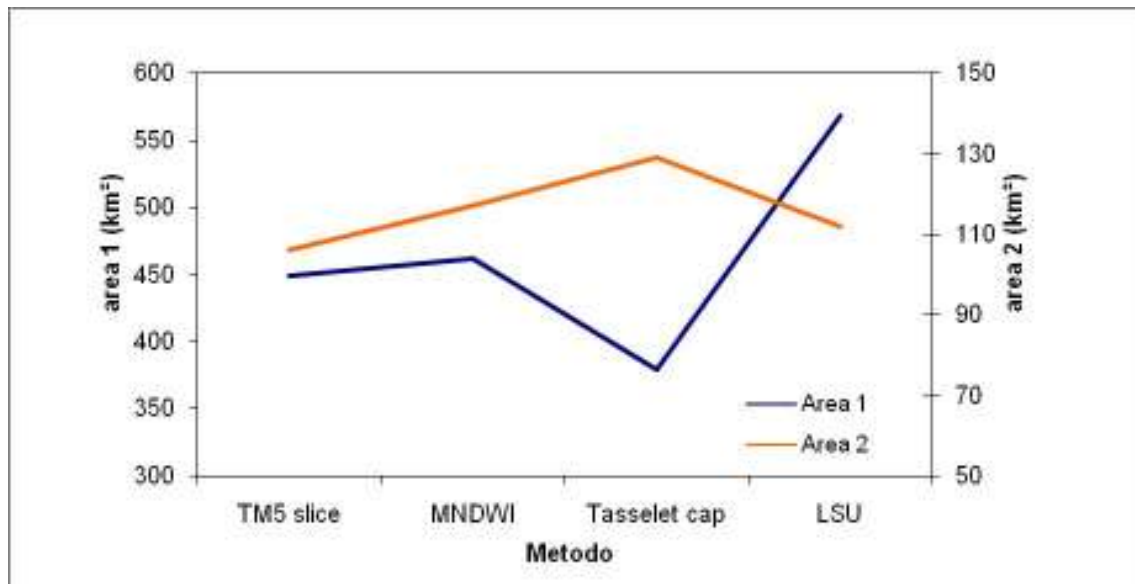


Figura 5: Comparação entre o total mapeado para as duas áreas com os métodos utilizados.



4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram aplicados diferentes métodos para extração de corpos d'água e áreas úmidas utilizando imagens LANDSAT TM. Nossos resultados levam a seguintes conclusões:

- 1) Os melhores resultados obtidos, independentemente da área de estudo, foram através dos métodos de fatiamento da banda TM5 e LSU;
- 2) Todos os métodos apresentaram melhor desempenho em áreas planas;
- 3) Existe uma diferença significativa entre os métodos, que varia de acordo com as características físicas específicas de cada área.

Sombras oriundas de feições do relevo aparecem como maior fonte de erro na classificação, principalmente para a área de estudo 2. Nenhum dos métodos utilizados foi capaz de reduzir a produção de artefatos em ambas as áreas. Assim, parâmetros de aquisição da imagem, como ângulo de elevação solar e estação do ano, terá uma considerável influência nos resultados e com isso devem ser considerados.

5 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, pp. 317-328, 1982.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. Computers & Graphics vol. 20 n. 3 pp.395-403. May-Jun 1996.
- 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, pp. 893-903, 2009.
- CHAVEZ, P. S. Jr. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, v. 24, n. 3, pp. 459-479, 1988.



- CONGALTON, R. G. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data". *Remote Sensing of Environment*, 37, pp. 35-46, 1991.
- CRIST, E.P.; CICONE, R.C. A physically-based transformation of Thematic Mapper data – the TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 22, pp. 256-263, 1984.
- CRIST, E. P.; KAUTH, R.J. The tasseled cap de-mystified. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52, pp. 81–86, 1986.
- FRAZIER, P. S.; PAGE, K.J. Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, pp. 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.
- JENSEN, J. R.; Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. K.C. Clarke, (Ed.) Upper Saddle River: Prentice-hall, 2007 pp. 592
- KAUTH, R.J.; THOMAS, G. S. The tasseled cap - a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In 1976 Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University of West Lafayette, Indiana, pp. 4B-41–4B-51.
- KNIGHT, A. W.; TINDALL, D. R.; WILSON, B.A. A multitemporal multiple density slice method for wetland mapping across the state of Queensland, Australia. *International Journal of Remote Sensing*, v. 30, n. 3, pp. 3365-3392, 2009.
- LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v.33, pp.159-174, 1977.
- MATHER, P. M. Computer processing of remotely-sensed images. 3rd ed. New York: Wiley. 2004, 324 pp.
- MCFEETERS, S. K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features". *International Journal of Remote Sensing*, 7, pp. 1425–1432, 1996.
- NOVO, E. M. L. M.; PEREIRA FILHO, W.; MELACK, J. M. Assessing the utility of spectral band operators to reduce the influence of total suspended solids on the relationship between chlorophyll concentration and the bidirectional reflectance factor in Amazon waters. *International Journal of Remote Sensing* , v. 25, n. 22, pp. 5105-5116, 2004.



- OUMA, Y. O. TATEISHI, R. A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley lakes: an empirical analysis using Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 27, n. 15, pp. 3153-3181, 2006.
- PIETRONIRO, T. J.; MARTZ, A.; PROWSE, T. D. A multi-sensor approach to wetland food monitoring. *Hydrological Processes*, vol. 16, pp. 1569-1581, 2002.
- RYU, J.; WON, J.; MIN, K.D. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: A case study in Gomso Bay, Korea. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, pp. 442-456, 2002.
- SANYAL, J.; LU, X. Application of Remote Sensing in Flood Management with Special Reference to Monsoon Asia: A Review. *Natural Hazards*, vol. 33, pp. 283-301, 2004.
- 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*, vol. 29, n. 1, 1991, pp.16-20.
- SMITH, M. O.; JOHNSON, P.E.; ADAMS, J.B. Quantitative determination of mineral types and abundances from reflectance spectra using principal components analysis, *Journal of Geophysical Research*, vol. 90, pp. 797-804, 1985.
- U. S. Geological Survey (USGS). Landsat product information. Acesso em 13 Outubro, 2009, em http://landsat.usgs.gov/products_productinformation.php.
- XU, H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 27, n. 14, pp. 3025-3033, 2006.