

Delimitação da planície inundável e avaliação a partir de um evento de inundação ocorrido no município de São Borja (RS)

Omar Felipe Chaparro Saavedra¹

Viviana Aguilar Muñoz¹

João Bosco Coura dos Reis¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{omar, viaguila, joaoreis}@dsr.inpe.br

Abstract. The mapping of flooded areas has been widely explored due to the usefulness of this information to support emergencies. The land use planning and disaster prevention involves the concept of susceptibility to flooding, which can be understood as a set of natural conditions that predispose a region to floods and can be observed before the occurrence of a disaster. The delineation of the floodplain by observing the topography contributes to the zoning of susceptible areas to flooding and is an interesting complement to risk management. In this paper it was identified a flooded area mapped using images from OLI sensor, provided by Landsat 8, through the spectral index called MNDWI. Simultaneously it was delineated the floodplain from topographic height obtained from the DEM of Topodata database. It were defined different threshold of topographic height (2, 3, 4 and 5m), generating a raster map for each section and the threshold that defines the best plain it was estimated by the accuracy of each of those maps and by the control map corresponding to the flooded area. The estimates were made from 1000 random samples using contingency table, that showed that the best threshold for establishing the floodplain was 3m with the following parameters: CSI: 0.518, *Phi* coefficient: 0.531 and *Kappa* 0.516. It was concluded that although the flooded area may underestimate the plain area, is still a good indicator for determining the cutoff threshold of the floodplain, which can be used for the risk management.

Palavras-chave: processamento digital de imagens, MDE, Topodata, Landsat 8, MNDWI.

1. Introdução

Planícies de inundação, também conhecidas como áreas de várzeas no Brasil, são áreas que apresentam características morfométricas homogêneas, com destacada importância social, visto a histórica ocupação populacional de suas planícies, e ambiental, em função da grande quantidade de serviços ambientais. Estas áreas são predominantemente planas e margeiam o canal principal das bacias hidrográficas, conformando seu leito maior. Como sugere seu nome, estas planícies são suscetíveis às inundações, acompanhando os ciclos de vazão do rio.

Nos últimos séculos foi visto um rápido crescimento da população global, tendo dobrado desde 1960 e é estimado que ultrapasse a marca de 9 bilhões de pessoas no mundo até 2050 (UNFPA, 2001). McBean e Rodgers (2010) destacam que o crescimento contínuo da população tem contribuído para a superlotação das áreas urbanas, levando pessoas a viver, por escolha ou circunstância, em áreas de risco. A ocupação urbana nas planícies de inundação cria condições de exposição aos perigos hidrometeorológicos, a qual, periodicamente, resulta em desastres naturais.

O mapeamento de áreas inundadas a partir de dados de sensoriamento remoto tem sido amplamente explorado (SERPICO *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2002), tendo em vista a utilidade destas informações para o apoio às emergências. O mapeamento destas áreas pode ser abordado de duas formas: pela classificação das áreas efetivamente inundadas logo após um evento hidrometeorológico ou por delimitação da topografia da planície propriamente dita, isto é, da área inundável. Entretanto, a segunda abordagem tem sido menos frequente e em consequência ainda necessita de mais estudos relacionados; acreditando que esta abordagem possa ser muito útil para o planejamento da ocupação do solo e a prevenção de desastres naturais.

Entre os dados mais utilizados para aplicação da primeira abordagem, de classificação das áreas inundadas, destacam-se produtos obtidos por técnicas de processamento digital de

imagens de sensores ópticos, por exemplo os produtos dos sensores a bordo do satélite Landsat (XU, 2006), ou por processamento de dados de radar na região espectral de micro-ondas, como imagens do satélite RADARSAT (MARINHO *et al.*, 2012). Este mapeamento baseia-se na classificação das imagens para extração de áreas úmidas e superfícies d'água. Técnicas de processamento digital de imagens obtidas por sensores ópticos para mapeamento de áreas inundadas são baseadas em algoritmos de classificação que buscam se aproveitar do comportamento espectral da água, seja pela análise mono ou multi bandas. Análises multi bandas têm sido indicados para discriminação de corpos d'água devido a sua eficiência na separação das classes (água e outros elementos contidos na imagem) através de índice espectral (LI *et al.*, 2013). No processamento de imagens de radar os algoritmos focam na avaliação do retroespalhamento do sinal, que varia linearmente com a constante dielétrica dos materiais. Corpos d'água apresentam uma elevada constante dielétrica e conseqüentemente um alto valor de retroespalhamento, o que permite sua fácil discriminação de outros objetos da superfície (NOVO; COSTA, 2005).

A classificação das áreas inundadas pode eventualmente subestimar a planície inundável, pois a área coberta por água decorrente de um evento de chuva que deflagra a inundação, não necessariamente irá corresponder a toda área potencialmente inundável. Assim o conceito de susceptibilidade a inundação pode ser entendido como o conjunto de condicionantes naturais que predispõem uma região a ser inundada e que podem ser observados antes da ocorrência de um evento extremo. A delimitação da planície pela observação da topografia contribui para o zoneamento de áreas susceptíveis de inundação a partir de modelo digital de elevação (MDE) e se configura um complemento interessante à primeira abordagem, como insumo para a gestão de risco de desastre por inundações.

Muñoz (2014) desenvolveu uma metodologia para a delimitação de planícies de inundação a partir da topografia, utilizando como recurso dados de elevação da missão SRTM, com resultados satisfatórios para a bacia do rio Itajaí, em Santa Catarina. O trabalho destacou a utilidade deste tipo de abordagem na avaliação da exposição a inundações e no mapeamento da susceptibilidade, como uma contribuição metodológica à prevenção de desastres por inundações.

Neste contexto o objetivo do trabalho foi delimitar a planície inundável e avaliar o resultado a partir de um evento de inundação ocorrido no dia 5 de julho de 2014, no município de São Borja, localizado no Estado do Rio Grande do Sul (RS), comparando os resultados da delimitação da planície inundável a partir de um MDE e da classificação das áreas inundadas utilizando imagens do sensor OLI, a bordo do satélite Landsat 8. Espera-se com este experimento contribuir com o desenvolvimento e aprimoramento de metodologias de mapeamento da susceptibilidade a inundações para prevenção de desastres naturais.

2. Metodologia de trabalho

2.1 Estudo de caso

Chuvvas torrenciais atingiram o Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, nos meses de junho e julho de 2014, provocando inundações que afetaram mais de 20.000 pessoas em 115 municípios. No dia 4 de julho o Estado do RS declarou situação de emergência, ativando o *International Charter*, rede de colaboração internacional entre agências espaciais que objetiva prover um sistema unificado de aquisição de dados sobre desastres naturais de grande porte, no âmbito global (ESA, 2013). Um dos municípios mais afetados no período foi São Borja, onde o nível do rio Uruguai atingiu 15,88m no dia 2 de julho, às 9h, registrado pela estação fluviométrica Passo São Borja (75780000), pertencente ao Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional das Águas (ANA, 2014)

A *United States Geological Survey* (USGS) disponibilizou imagens do sensor *Operational Land Imager* (OLI) do satélite Landsat 8, cobrindo a região de São Borja, no dia

5 de julho de 2014, um dia depois do Estado declarar situação de emergência, quando a estação fluviométrica em São Borja registrava 13,56 m acima da média do rio Uruguai. Desta forma, foi escolhido esse município para execução do experimento proposto neste trabalho.

Na Figura 1 apresenta-se a localização do município de São Borja (RS).

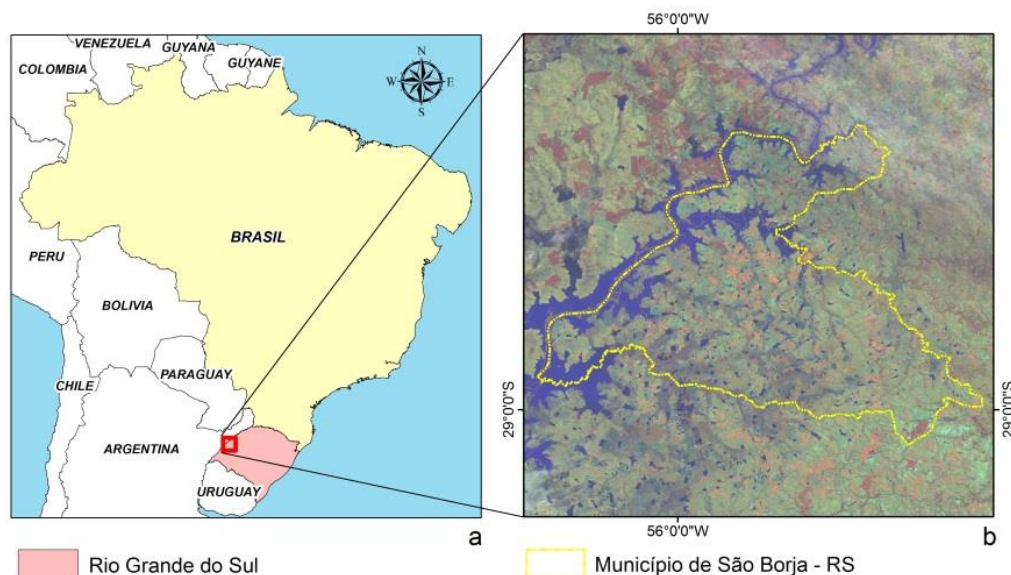


Figura 1. a) Localização do Estado do Rio Grande do Sul e da região do município de São Borja; e b) limite municipal de São Borja sob composição colorida R5G6B4 do Landsat 8.

2.2 Material

Para execução deste trabalho foram utilizadas as bandas 3 (525 a 600 nm) e 6 (1560 a 1660 nm), referentes a região espectral do verde e do infravermelho de ondas curtas (SWIR - abreviado do inglês *shortwave infrared*), oriundas do sensor *Operational Land Imager* (OLI) a bordo do satélite Landsat 8. As imagens correspondem a órbita/ponto 224/80, adquiridas no dia 5 de julho de 2014, apresentando resolução espacial de 30 metros e radiométrica de 12 bits (4096 níveis de cinza) (IRONS *et al.*, 2012). Os dados de elevação utilizados correspondem a um excerto do MDE composto pelas folhas 28S57, 28S555 e 29S57 do banco de dados do projeto Topodata (INPE, 2008).

Para classificação das imagens foi utilizado o *software* SPRING 5.2 para *Windows* (CÂMARA *et al.*, 1996), para processamento dos dados de elevação o *software* Idrisi (CLARK LABS, 2000) e para as análises estatísticas o pacote R-statistics (R CORE TEAM, 2013).

2.3 Metodologia

A sequência experimental consta de três etapas: (i) classificação das áreas inundadas no dia 5 de julho 2014 em São Borja a partir de dados ópticos; (ii) delimitação da planície inundável a partir de dados de elevação; e (iii) comparação dos resultados das etapas i e ii para avaliação do ajuste entre ambos produtos. As etapas de desenvolvimento estão resumidas no fluxograma da Figura 2.

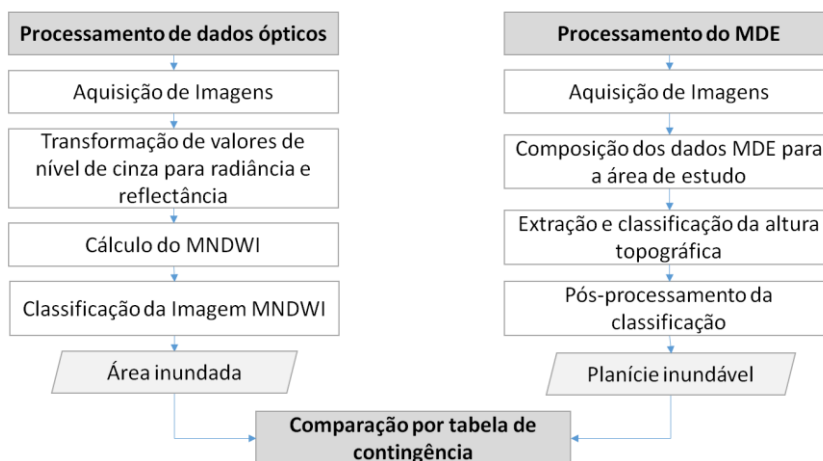


Figura 2. Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.

2.3.1 Classificação de áreas inundadas

O *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) (XU, 2006), é a versão modificada do *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (MCFEETERS, 1996), desenvolvido para extração de corpos da água. Pesquisas recentes indicam que o MNDWI é o índice espectral que proporciona melhores resultados para o mapeamento de áreas inundadas, áreas úmidas e corpos d'água, a partir de dados ópticos (LI *et al.*, 2013). Foi definido para aplicação neste trabalho o MNDWI (XU, 2006), utilizando as bandas 3 e 6 do sensor OLI, região espectral do verde e do SWIR, respectivamente. Para o cálculo do MNDWI (Equação 1) foi necessário converter os valores de nível de cinza para radiância espectral e então para valores de refletância espectral.

$$MNDWI = \frac{\rho_{verde} - \rho_{SWIR}}{\rho_{verde} + \rho_{SWIR}} \quad (1)$$

Onde ρ_{verde} é a refletância espectral da banda do verde e ρ_{SWIR} da banda do SWIR.

A extração dos corpos da água foi feita por classificação não supervisionada do produto do MNDWI, utilizando o algoritmo k-médias, método que não requer amostras de treinamento (JENSEN, 2005). O classificador requer que o usuário determine o número de classes em que os espectros serão divididos e a quantidade de iterações para cálculo do novo valor médio de cada classe. No final das iterações cada *pixel* é atribuído a classe com valor mais próximo (MACQUEEN, 1967). Para este experimento foram determinadas duas classes: área inundada e área não inundada.

2.3.2 Delimitação da planície inundável

A geometria do relevo pode ser obtida por derivações numéricas a partir de modelo digital de elevação (MDE). Variáveis topográficas como aquelas que compõem o banco de dados Topodata (VALERIANO e ALBUQUERQUE, 2010) indicam as variações do relevo local, enquanto que outras, como a amplitude topográfica ou a altura, são úteis para a percepção da geometria regional do relevo. Na tentativa de delimitar de forma automática planícies de inundação, Muñoz (2014) observou que a altura topográfica teve o melhor desempenho dentre outras variáveis morfométricas.

A altura topográfica é a distancia vertical entre um ponto na superfície da terra e sua projeção numa superfície de elevações mínimas. Sua derivação a partir do MDE em sistemas de informação geográfica, SIG, consiste no cálculo da diferença aritmética entre o MDE e um modelo de cotas mínimas obtidas a partir do mesmo MDE, como descrito em Muñoz e Valeriano (2013). O resultado desta operação é classificado em duas categorias: planície e não

planície, pelo estabelecimento de um valor limiar da altura que separe as duas classes. Por fim, são aplicados filtros morfológicos para melhor definição dos polígonos de cada classe.

2.3.3 Comparação entre área inundada e planície inundável

Diferentes alturas de corte da altura topográfica foram definidas (2, 3, 4 e 5m), gerando um mapa *raster* para cada corte. Com o propósito de determinar o limiar que define a planície de inundação estimou-se a exatidão entre cada um dos mapas extraídos da altura topográfica e o mapa de controle correspondente à área inundada obtido por meio do MNDWI. Embora a área inundada possa subestimar a área da planície, ela é um bom indicador para determinação do limiar de corte.

As estimativas foram feitas a partir de um conjunto de 1000 amostras aleatórias, mediante tabela de contingência para dados dicotômicos ($i = j = 2: 2 \times 2$) (WILKS, 2011). Estimou-se diferentes atributos para avaliar a qualidade das planícies geradas através do *critical success index* (CSI), o coeficiente de correlação *phi* (ϕ) e o índice *Kappa*, cujos valores próximos de 1 indicam os melhores ajustes. Para estimar o viés foi utilizado o índice *Bias* (B) onde: $B > 1$ indica que o evento (a planície) foi estimado um maior número de vezes do que observado (a área inundada) e $B < 1$ indica que o evento foi estimado um menor número de vezes do que foi observado.

3. Resultados e discussão

3.1 Classificação de áreas inundadas

Na Figura 3 observa-se a imagem Landsat 8 com composição colorida RGB 564 e o resultado da classificação da imagem MNDWI, a qual gerou um forte contraste, permitindo a delimitação da área inundada e os diferentes corpos d'água presentes na área de estudo, confirmando os resultados obtidos por Li *et al.* (2013) e Xu (2006).

Para avaliar a precisão da classificação foram utilizadas 75 amostras aleatórias, representando a verdade terrestre, obtendo uma exatidão global de 0,973 e um valor *Kappa* de 0,944, resultados que atestam a qualidade da classificação.

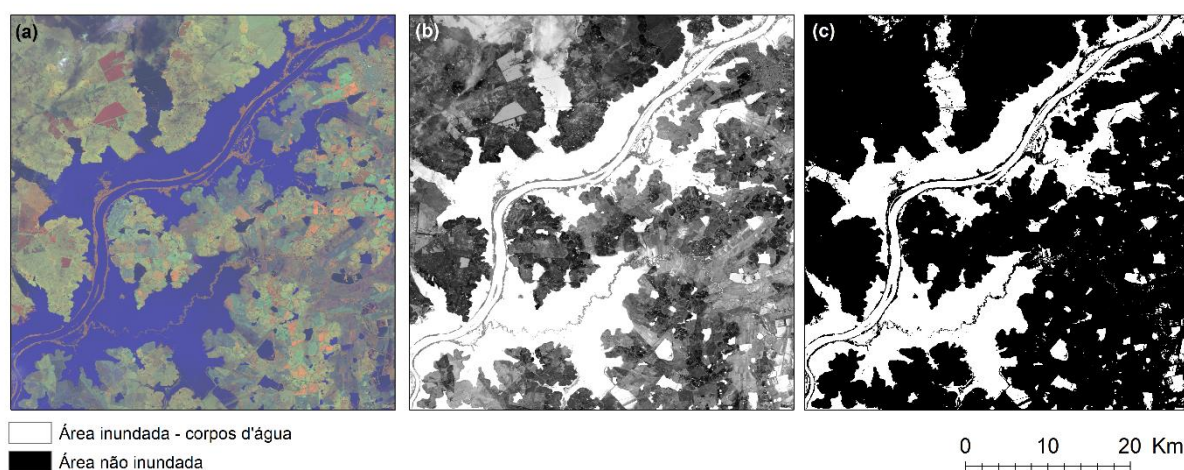


Figura 3. Área inundada obtida através do MNDWI. (a) imagem Landsat 8 R5G6B4, (b) Imagem MNDWI, (c) Classificação da imagem MNDWI pelo algoritmo k-médias.

3.2 Delimitação da planície inundável

A Figura 4 apresenta os resultados do processo de delimitação automática da planície inundável. Observa-se que no primeiro limiar ou nível de corte, com altura de 2m (Figura 4c), a planície gerada apresenta uma área descontínua ou com presença de “ilhas”, produto de pequenas variações no terreno. A planície gerada com alturas de corte de 3 e 4m (Figura 4d e

4e, respectivamente) apresentam visualmente um melhor ajuste com o mapa de controle ou área inundada durante o evento. No último nível de corte foram gerados polígonos maiores do que no mapa de controle, superestimando a planície inundável.

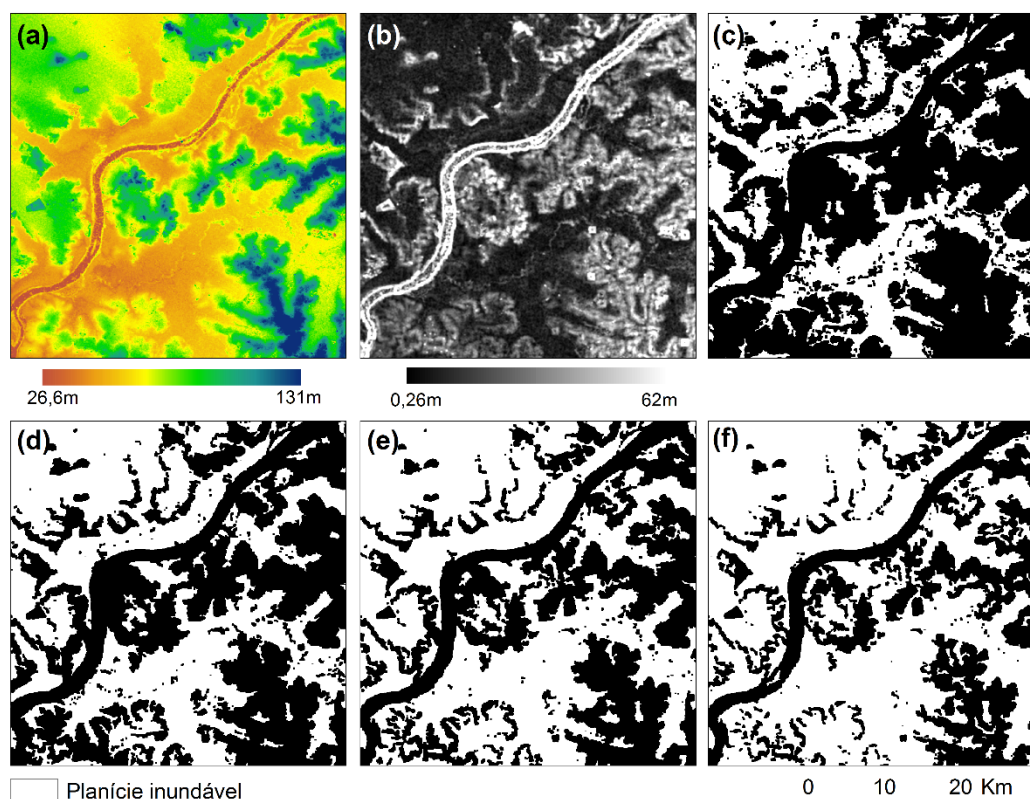


Figura 4. Planície inundável. (a) Modelo digital de elevação; (b) modelo digital de altura; (c, d, e, f) planície inundável com limiar de corte de 2, 3, 4 e 5 m, respectivamente.

3.3 Comparação entre área inundada e planície de inundação

Embora tenham sido observados valores muito próximos entre si para todos os limiares de corte, o parâmetro CSI indica como melhor, o limiar em 3m. Este resultado foi confirmado pelos resultados do índice de correlação e o índice *Kappa*. Em quase todos os níveis de corte o estimador *Bias* (B) indicou que a área de planície é maior do que a área inundada, o que é de se esperar, considerando que a planície de inundação não necessariamente é preenchida por um evento específico (Tabela 1). Mesmo que o melhor B tenha sido 2m, por interpretação visual, indica-se como melhor resultado o corte em 3m.

Tabela 1. Matriz de confusão da classificação do MNDWI por k-médias.

Limiar de corte	CSI	Correlação ϕ	Kappa	B
2m	0,442	0,460	0,459	0,916
3m	0,518	0,531	0,516	1,369
4m	0,512	0,531	0,484	1,695
5m	0,490	0,508	0,439	1,889

Apresenta-se na Figura 5 os produtos finais do processamento: classificação da área inundada e imagem da área inundável (corte em 3m).

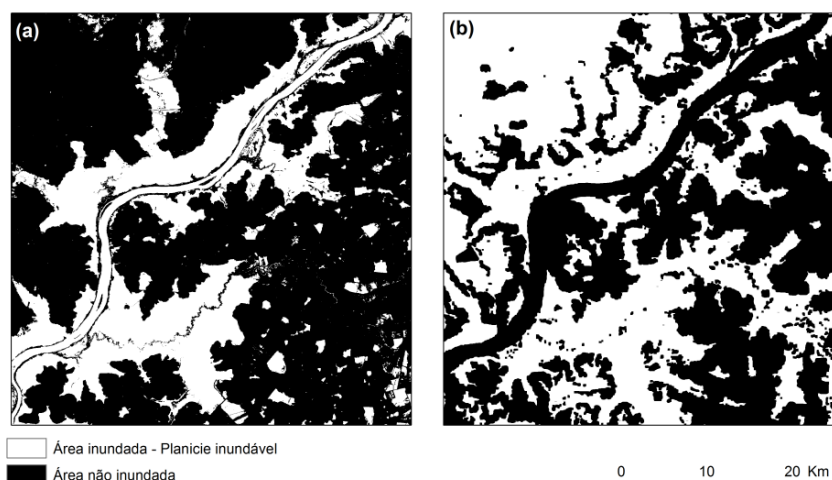


Figura 5. (a) Área inundada obtida a partir da classificação da imagem MNDWI e (b) planície inundável obtida através da classificação da altura topográfica, limiar de corte em 3m.

5. Conclusão

Por meio da análise visual, pelo índice *Kappa* e exatidão global, conclui-se que a classificação utilizando o MNDWI apresentou bons resultados para o mapeamento de superfície da água ou área inundada, facilitado pelo forte contraste entre a água e a superfície terrestre, sendo indicado para trabalhos que necessitem identificar corpos d'água.

A delimitação de planícies inundáveis apresentou resultados satisfatórios quando comparado com um evento de inundação no município de São Borja. Como esperado, a classificação de superfícies inundadas pode subestimar a planície inundável propriamente dita, pois a área ocupada por água durante um evento de inundação específico não necessariamente irá corresponder a toda a área potencialmente inundável. A delimitação de planícies inundáveis a partir de um modelo digital de elevação (MDE) contribui para o zoneamento de áreas susceptíveis a inundação, sendo este um insumo importante no planejamento do território e na gestão do risco por inundação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão das bolsas, e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo apoio através da Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto e a disponibilidade do *software* SPRING.

Referências bibliográficas

ANA. Agência Nacional de Águas. **HidroWeb** – Sistemas de Informações Hidrológicas. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: nov. 2014.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. C. P. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented Data Modelling. **Computers and Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, Maio-Jun 1996.

CLARK LABS. **IDRISI 32 Version I32.02**. Idrisi Source Code ©1987-2000 J. Ronald Eastman. Idrisi Production ©1987-2000 J. Clark University. www.clarklabs.org. 2000.

EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA. **International Charter Space & Major Disasters**, 13th Annual Report. 2013. Disponível em: <https://www.disasterscharter.org/documents/10180/66908/13thAnnualReport>. Acesso em: nov. de 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil. Variáveis geomorfométricas locais: folhas 26S51, 26S495, 27S51 e 27S495. São José dos Campos, 2008. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: nov. 2014.

IRONS, J. R.; DWYER, J. L.; BARSİ, J. A. The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. **Remote Sensing of Environment**, 122, 2012. p. 11–21.

JENSEN, J. R. **Introductory Digital Image Processing**: a remoting sensing perspective. 3ª edição. Universidade da Califórnia: Prentice Hall. 2005. 526 p.

LI, W.; DU, Z.; LING, F.; ZHOU, D.; WANG, H.; GUI, Y.; SUN, B.; ZHANG, X. A comparison of land surface water mapping using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM+ and ALI. **Remote Sensing**. 2013, 5, p. 5530-5549.

MARINHO, R. R.; PARADELLA, W. R.; RENNO, C. D.; OLIVEIRA, C. G. Aplicação de imagens SAR orbitais em desastres naturais: mapeamento das inundações de 2008 no Vale do Itajaí, SC. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 64, n.3. 2012. p. 317-330. ISSN: 1808-0936.

MCBEAN, G.; RODGERS, C. Climate hazards and disasters: the need for capacity building. **Interdisciplinary Reviews: Climate Change**. v.1, number 6, nov/dec 2010. ISSN 1757-7780.

MCFEETERS, S.K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. **Int. J. Remote Sens.**, 17, 1996, p. 1425–1432.

MUÑOZ, V. A.; VALERIANO M. M. Mapping of floodplain by processing of elevation data from Remote Sensing. In: PARDO-IGÚZQUIZA, E.; GUARDIOLA-ALBERT, C.; HEREDIA, J.; MORENO-MERINO, L.; DURÁN, J. J.; VARGAS-GUZMÁN, J. A. (Org.). **Mathematics of Planet Earth**: Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences. Berlin: Springer-Verlag. 2013. p. 481-484. ISBN 9783642324079.

MUÑOZ, V. A. **Mapeamento de planícies de inundação a partir de dados SRTM**: contribuição para análise da exposição a inundação na bacia do rio Itajaí. 2014. 112 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.14.19.05-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3G5LL8E>>. Acesso em: 28 out. 2014.

NOVO, E. M. L. M.; COSTA, M. P. F. Fundamentos e aplicações de radar no estudo de áreas alagáveis. In: SOUZA, Ronald Buss (Ed.). **Oceanografia por satélites**. São José dos Campos: Oficina de Textos, 2005. v. Cap. 16, p. 236-258.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing, v. 3.0.2. The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. © 2013. www.R-project.org.

SERPICO, S. B. ; DELLEPIANE, S. ; BONI, G. ; MOSER, G.; ANGIATI, E.; RUDARI, R. Information extraction from remote sensing images for flood monitoring and damage evaluation. **Proc. IEEE**, v. 100, N.10, p. 2946–2970, 2012.

UNFPA - United Nations Population Fund. **The state of world population 2001**: people and possibilities in a world of 7 bilion. Marshall A (ed). 2001.

VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **Topodata**: processamento dos dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. 79 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.42-RPQ). Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37FCH9B>>. Acesso em: nov. 2014.

XU, H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **Int. J. Remote Sens.**, 27, 2006, p. 3025–3033.

WANG, Y.; COLBY, J. D.; MULCAHY, K. A. An efficient method for mapping flood extent in a coastal floodplain using Landsat TM and DEM data. **International Journal of Remote Sensing**. Vol. 23, Iss. 18, pages 3681-3696, 2002. DOI: 10.1080/01431160110114484.

WILKS, D. S. Chapter 8 - Forecast Verification, In: WILKS, D. S. (Editors) **International Geophysics**, Academic Press, 2011, Volume 100, Pages 301-394, ISSN 0074-6142, ISBN 9780123850225, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385022-5.00008-7>.