

Estudo das inundações do Pantanal a partir de imagens MODIS

Carlos Roberto Padovani ¹
Carlos Alberto Vettorazzi ³
Yosio Edemir Shimabukuro ²
Marcos Adami ²
Ramon Morais de Freitas ²

¹ EMBRAPA PANTANAL
Caixa Postal 109 – 79.320-900 – Corumbá - MS, Brasil
Doutorando em Ecologia Aplicada pelo CENA/ESALQ/USP
guara@cpap.embrapa.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{ramon, adami, yosio}@dsr.inpe.br

³ Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP
Caixa Postal 09 – 13418-900 - Piracicaba - SP, Brasil
cavettor@esalq.usp.br

Abstract The objective of this study was to analyze the flooding dynamics for a pilot area influenced directly by the Paraguay river at Ladário, MS. It is a case study for the delineation and determination of flooding patterns for other Pantanal regions. So, we used 14 images of surface reflectance bands of MOD13Q1, from MODIS sensor, and applied the Linear Spectral Mixture Model (LSMM) to quantify flooding areas of a hydrological cycle. The flooded area varied from 2,276.68 km² to 5,688.31 km², averaging 4,460.76 km². The flooded area influenced directly by the Paraguay river disagrees with the prior Pantanal subregions map delimitations, indicating the necessity for updated maps. Correlation analysis between river stage at Ladário and total flooded area influenced by Paraguay river showed a correlation of R=0.85. The flooded areas mostly related to the Ladário river stage records were determined by a map of correlation at the pixel level and are close to the stage river section and its river channel, few kilometers up and downstream. Extrapolations of flooding dynamics and their relation with ecological processes, based on the Paraguay river records, for the whole Pantanal or for distant areas, need to be analyzed. A flooding time map shows the areas permanently, sazonalmente, and never flooded. MODIS surface reflectance images and LSMM showed consistent results and can be applied to monitor quantitatively the flood dynamics in the Pantanal.

Palavras-chave: remote sensing, spatial analysis, hydrology, sensoriamento remoto, análise espacial, hidrologia

1. Introdução

Os processos ecológicos, a distribuição e abundância da fauna e flora e a produtividade da pecuária e pesca do Pantanal dependem do regime de inundações, portanto seu entendimento é fundamental para o manejo e conservação desse bioma.

É conhecido, há décadas, que a sazonalidade das inundações no Pantanal é acentuada, com uma fase de inundação e uma fase de seca, bem pronunciadas, embora algumas áreas permaneçam permanentemente inundadas ou secas. Estas fases estão relacionadas e podem ser observadas pelos registros das chuvas e do nível dos rios, principalmente do rio Paraguai, que apresenta um hidrograma anual unimodal (Brasil, 1974).

Devido a sua localização, a seção de medição de nível do rio Paraguai em Ladário integra o escoamento de mais de 80 % da área de drenagem da bacia do alto rio Paraguai, além de ser o registro mais antigo (desde 1900) e completo. Por esses motivos, o registro de nível do rio Paraguai, tem sido usado como um indicador das inundações para todo o Pantanal (Galdino, 1997) e correlacionado com a área inundada tanto para a área total quanto para sub-regiões

(Hamilton et al., 1996; Hamilton, 1999). Porém, não há informação sobre a dinâmica e a área inundada diretamente pelo rio Paraguai, na região da seção de medição de Ladário.

Vários trabalhos propuseram a delimitação de sub-regiões do Pantanal com base em critérios como relevo, geomorfologia, regime de inundações, solos e vegetação, sendo os mais recentes e mais aceitos os de Hamilton et al. (1996) e Silva e Abdon (1998). Esses trabalhos não consideraram séries temporais de nível dos rios e da área inundada para definir a delimitação das sub-regiões, pela impossibilidade de reunir imagens que pudessem agregar informação de detalhe e qualidade suficientes na escala desejada.

O presente trabalho trata de um estudo de caso, considerando apenas a contribuição da inundação pela superfície, que é passível de ser mensurada por sensoriamento remoto, utilizando imagens do sensor MODIS a bordo da plataforma Terra *EOS (Earth Observing System)* e aplicando o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME, Shimabukuro e Smith, 1991) para quantificar a dinâmica das inundações para a área de influência do rio Paraguai na altura da seção de medição de Ladário, como um modelo que pode ser aplicado para a delimitação da extensão e determinação de padrões de inundação de outras regiões do Pantanal.

2. Metodologia

A área de estudo está localizada entre as coordenadas $56^{\circ} 33' 28''$ e $58^{\circ} 18' 12''$ de longitude W e $18^{\circ} 23' 29''$ e $19^{\circ} 35' 53''$ de latitude S, entre duas estações de medição de nível do rio Paraguai: São Francisco ao norte e Porto Esperança ao sul (Figura 1). Entre essas duas estações localiza-se a estação de medição de nível de Ladário.

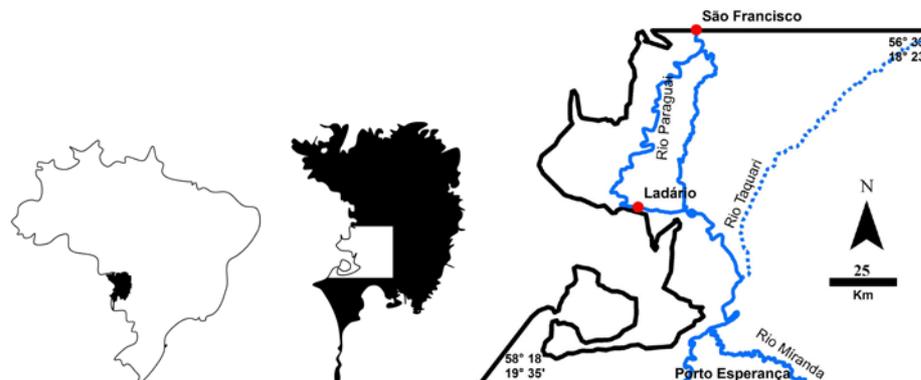


Figura 1. Localização da área de estudo. As estações de medição de nível estão representadas por São Francisco, ao norte, Ladário ao centro e Porto Esperança ao sul. O rio Taquari está representado por uma linha pontilhada, pois o mesmo mudou seu curso mais para o norte, na década de 90.

O hidrograma dos níveis médios mensais do rio Paraguai em Ladário e chuva acumulada mensal para a área de estudo, no ano hidrológico de novembro de 2006 a outubro de 2007, mostram um padrão unimodal e a distribuição dos níveis do rio Paraguai se opõe à distribuição das chuvas (Figura 2). O período estudado foi de 18 de fevereiro a 14 de setembro de 2007, período em que o nível do rio permaneceu acima de 3 metros de cota, registrado pela régua de Ladário. Na área de estudo o rio sai de sua calha a partir do nível de 3 metros na enchente, inundando a planície, alcançando seu pico de cheia, e retornando para a calha na vazante. A contribuição das chuvas locais para a inundação dessa região é pequena, comparada à contribuição do rio Paraguai e, em menor escala, dos tributários (Hamilton et al., 1996).

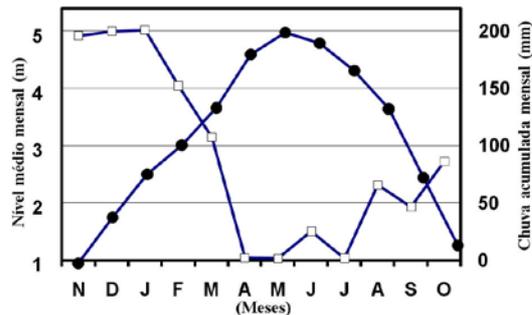


Figura 2. Nível médio mensal (pontos cheios) do rio Paraguai em Ladário, obtidos do Serviço de Sinalização Náutica do Oeste da Marinha Brasileira, e chuva acumulada mensal (quadrados abertos), do *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Online Visualization and Analysis System*, (NASA, 2008a).

O procedimento de processamento e análise das imagens seguiu as seguintes etapas:

1. Foram adquiridas do portal *EOS Data Gateway*, NASA (2008b), 14 imagens compostas MOD13Q1, versão 5, do sensor MODIS da plataforma Terra, com resolução espacial de 250 metros, resolução temporal de 16 dias e resolução espectral de quatro bandas de reflectância (azul, vermelho, NIR, MIR);
2. Mosaico, recorte, re-projeção (WGS84, UTM, fuso 21) e conversão do formato HDF para TIF;
3. Conversão de resolução radiométrica de 16 bits para 8 bits;
4. Coleta de pixels puros, para aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME);
5. Fatiamento de histograma das imagens fração água, classes “inundado” e “não-inundado”;
6. Conversão do formato matricial (raster) para o formato vetorial;
7. Edição manual de erros de classificação de áreas de inundação por áreas queimadas, usando shapefile de pontos de focos de calor disponível em <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>;
8. Cálculo de área para cada data;
9. Junção dos limites de cada data para extração do limite final de inundação máxima;
10. Cálculo da área final máxima.

Na etapa 2 foi usado o software MRT (MODIS Reprojection Tool); na etapa 3 foi usado o software ConvGeoTif (Arai et al., 2005); na etapa 4 foi usado o software SPRING; e nas etapas 5 a 10 o software ArcGIS.

A Figura 3 mostra a imagem de referência, na composição colorida (R7, G2, B1), a imagem fração água e a classificação por fatiamento das áreas inundadas para a fase de cheia.

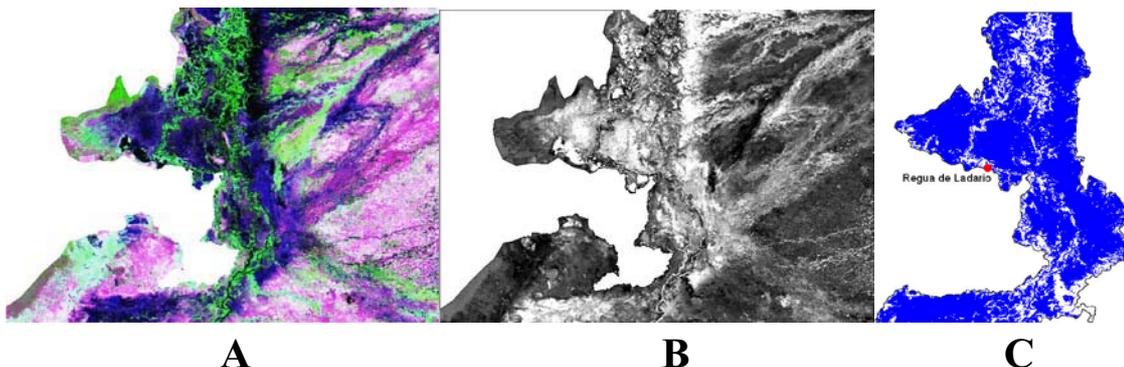


Figura 3. Área piloto na altura da régua de medição de nível de Ladário: A) imagem de referência na composição colorida (R7, G2, B1); B) imagem fração água; e C) classificação por fatiamento das áreas inundadas, para 25 de maio de 2007, período de cheia.

Os valores de reflectância de cada banda, e para cada *endmember* do MLME, foram obtidos como pixels puros a partir da imagem de 25 de maio de 2007. Para a pré-seleção dos pixels puros foram obtidos os maiores valores do produto EVI (Huete et al., 2002), da banda do infravermelho médio (MIR) e da banda do azul, para os *endmembers* vegetação, solo e água, respectivamente, juntamente com a imagem de qualidade “*Pixel reliability*”. As curvas espectrais obtidas para cada *endmember* combinam com as curvas espectrais padrão, esperadas para os *endmembers* vegetação (Ponzoni, 2001), solo (Netto, 2001) e água (Novo, 2001), para as bandas de reflectância do azul, vermelho, NIR e MIR.

3. Resultados e Discussão

A área inundável afetada pelo rio Paraguai na região de Ladário, variou de 2.276,68 km² a 5.688,31 km², com uma média de 4.460,76 km².

A Figura 4 mostra o limite da área de inundação provocada pelo rio Paraguai em 2007 sobre os mapas das sub-regiões do Pantanal de acordo com Hamilton et al. (1996) e Silva e Abdon (1998). Observa-se que, a oeste, as diferenças devem-se mais à questão de amostragem, uma vez que esse estudo de caso considera apenas o ciclo hidrológico do ano de 2007. Na sub-região do Paraguai, a diferença do limite máximo de inundação do presente estudo com a delimitação de Silva e Abdon (1998) deve-se a que esta delimitação é restrita às fronteiras políticas do Brasil.

Porém, à leste observa-se uma diferença clara entre ambas delimitações anteriores e a do presente estudo. Os critérios usados em cada delimitação podem explicar parte das diferenças. Silva e Abdon (1998) citam o uso de informações sobre solo, relevo, vegetação e inundação, além da base topográfica e imagens Landsat-5 de diferentes datas. Hamilton et al. (1996) citam o uso de informações hidrológicas, mapas de geomorfologia e vegetação, além da base cartográfica e imagens Landsat-5 de diferentes datas. Mas, os autores não descrevem como cada fonte de informação foi usada e qual o peso de cada informação na delimitação de uma determinada sub-região. Assim, a delimitação das inundações para a região do Paraguai (“PARA” em Hamilton et al. (1998)) à leste, parece ser uma linha média, traçada a mão ou compilada/adaptada de delimitações prévias.

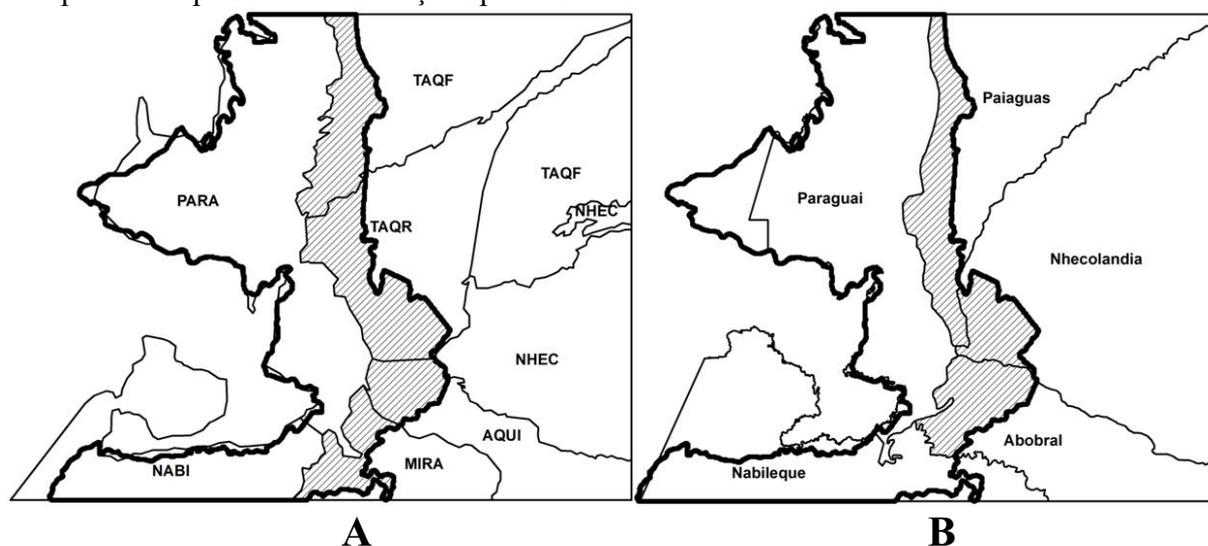


Figura 4. Delimitação da área inundada pelo rio Paraguai em 2007 (linha grossa) sobre os mapas de delimitação das sub-regiões do Pantanal por Hamilton (1998) (A) e Silva e Abdon

(1998) (B). A faixa hachurada representa a diferença nas delimitações entre o presente estudo e os estudos anteriores.

No estudo de Silva e Abdon (1998), o uso de diferentes critérios foi certamente o procedimento mais correto para diferenciar sub-regiões, pois o foco não era apenas hidrológico. No estudo de Hamilton et al. (1996), o foco era hidrológico, mas as sub-regiões foram delimitadas mais com o propósito de apresentação e análises que para refletir a dinâmica hidrológica. Em ambos os estudos não havia na época a disponibilidade de uma série temporal de imagens que retratasse com fidelidade o ciclo hidrológico de uma determinada região, como é possível fazer hoje com as imagens MODIS.

Nesse sentido, o presente estudo traz informações recentes, uma vez que o Pantanal, assim como outras regiões de planícies aluviais inundáveis, é um sistema dinâmico. Por exemplo, o rio Taquari, que na área de estudo divide as sub-regiões Paiaguás e Nhecolândia no mapa de Silva e Abdon (1998) e que forma uma sub-região no mapa de Hamilton et al. (1996) (TAQR), desviou seu curso mais para o norte, na década de 90, desembocando atualmente à montante da estação de medição de São Francisco, no rio Paraguai. Isso deve ter alterado também o volume de água que passa pela seção de medição de Ladário e a faixa de influência de inundação do rio Paraguai a leste da área de estudo, nos últimos anos.

A delimitação da área diretamente inundada pelo rio Paraguai, considerando a área de abrangência da estação de medição de nível de Ladário, permite avaliar a relação entre nível do rio Paraguai e área inundável (Figura 5).

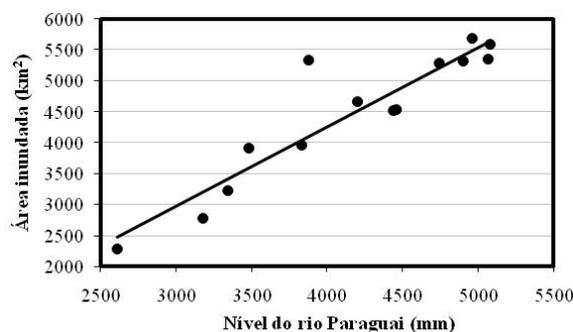


Figura 5. Relação entre o nível do rio Paraguai e a área inundada. Coeficiente de correlação $R=0.85$.

Fatores como a presença de áreas inundadas por águas provenientes principalmente de tributários e devido a área não inundar homogeneamente, a partir da calha do rio na altura da seção de Ladário, mas sim como uma onda de inundação vinda de montante, explicam parte da variação dessa relação.

Devido aos padrões de inundação no Pantanal serem nitidamente sazonais, independentemente do local e da fonte de água para as inundações, Hamilton et al. (1996) encontraram uma alta relação entre o nível do rio Paraguai e a área inundada para todo o Pantanal, usando os dados da seção de medição de Ladário. Porém, ajustes de defasagem no tempo tiveram que ser feitos em função da época da inundação ser diferente em diferentes regiões do Pantanal. Adami et al. (2008) mostraram variações na inundação em função da chuva e suas variações espaço-temporais, até dentro das sub-regiões de Paiaguás e Nhecolândia.

No estudo de Hamilton et al. (1996) o nível do rio Paraguai, medido pela régua de Ladário, está relacionado indiretamente com as inundações em outras regiões do Pantanal, pois estas inundam em função de água das chuvas, de outros rios ou de outras porções do rio Paraguai. Nesse estudo, os níveis do rio Paraguai em Ladário representam uma resposta às inundações ocorridas no Pantanal, enquanto que o presente estudo propõe, com a análise da

seção de medição de Ladário, uma medida da relação causal entre os níveis do rio e a área inundada.

A determinação dos padrões de inundação, estabelecendo as relações diretas entre as áreas inundadas e sua fonte de água, adotada no presente estudo, é um enfoque diferente daquele adotado por Hamilton et al. (1996) que determinou previamente sub-regiões no Pantanal como unidades amostrais para a determinação de padrões de inundação para toda a região. Como mostrado no presente estudo, as séries temporais das imagens MODIS permitem determinar regiões hidrologicamente distintas, em função da própria dinâmica hidrológica destas, ao invés de usar delimitações pré-determinadas por fatores não exclusivamente da dinâmica de inundação.

Os métodos convencionais de classificação de imagens limitam-se a classes qualitativas, porém, com o emprego do Modelo Linear de Mistura Espectral, é possível quantificar a proporção de determinado alvo de interesse. Dessa forma, nas imagens fração água, usadas no presente estudo, cada pixel representa uma unidade amostral da proporção de água na superfície do terreno. Então, é possível relacionar cada pixel da imagem com os dados de nível do rio Paraguai e obter um mapa dessa relação (Figura 6).

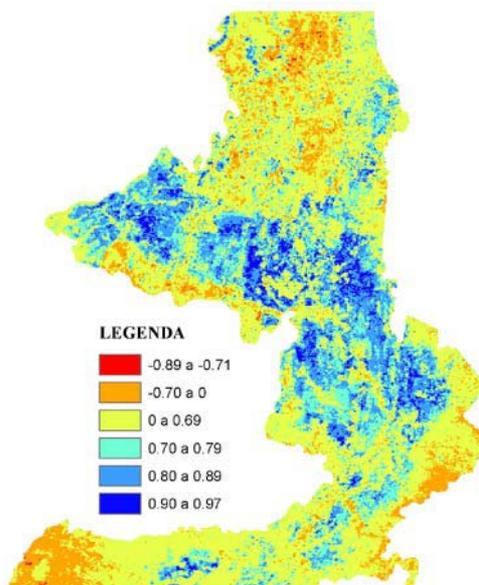


Figura 6. Mapa dos valores de coeficiente de correlação (R) para cada pixel da imagem, entre o nível do rio Paraguai, medido na seção de Ladário, e os valores da proporção de água na superfície do terreno, para as 14 datas do evento hidrológico de 18 de fevereiro a 14 de setembro de 2007.

Verificou-se que, mesmo restringindo a análise à área de influência direta do Rio Paraguai nas inundações, a maior parte dos pixels com valores altos da correlação entre os níveis medidos na seção de Ladário e área inundada situam-se próximos da seção de medição, ao longo do trecho com sentido noroeste-sudeste, transversal ao eixo norte-sul da Figura 6.

Isso mostra o quanto é restrita a relação direta entre os dados de nível medidos na seção de medição de Ladário com a área inundável no Pantanal. Embora a área delimitada como de inundação direta pelo rio Paraguai seja relativamente pequena, ainda assim a inundação não ocorre simultaneamente em toda a sua extensão. Observando-se a seqüência de imagens é possível visualizar claramente a onda de inundação vindo de norte para o sul na época de enchente. Mesmo nessa área seria preciso, então, considerar a defasagem de tempo da onda de cheia, para obter valores de correlação mais altos.

Fatores como o relevo e a drenagem locais podem explicar parte da distribuição espacial complexa dos valores de correlação. Rios de planície aluvial, como o rio Paraguai, formam diques marginais que são ultrapassados apenas a partir de um determinado nível do rio. Por outro lado, a drenagem local, conectada ao canal principal, temporária ou permanentemente, pode levar a água do rio para áreas distantes daquelas próximas ao seu leito, antes da inundação pelo extravasamento sobre os diques marginais.

Os valores negativos do coeficiente de correlação (R), da Figura 6, referem-se a áreas que antes de serem inundadas pelo rio Paraguai foram inundadas pelas águas das chuvas ou por tributários e que, em parte do período estudado, estão secando por evaporação ou escoamento.

Esses fatores influenciam também no tempo em que uma determinada área permanece inundada. Considerando as diferentes datas mapeadas para a inundação, pode-se compor um mapa de tempo de inundação para cada pixel (Figura 7).

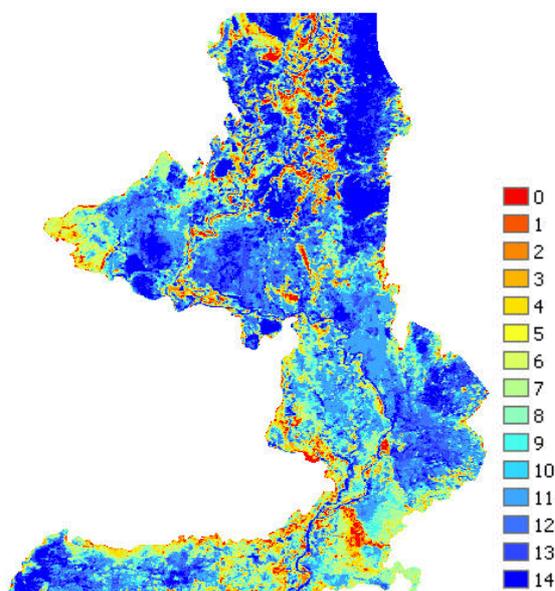


Figura 7. Tempo de inundação para as 14 datas do período estudado, de 18 de fevereiro a 14 de setembro de 2007. A legenda representa cada data de 16 dias, em que cada pixel da imagem permaneceu inundado. As áreas em vermelho coincidem com áreas mais elevadas no terreno, para o evento hidrológico estudado.

O mapa de tempo de inundação possibilita identificar bem os morros, diques marginais atuais e abandonados e áreas de vegetação arbórea, que ocorrem em áreas mais elevadas do terreno. As áreas permanentemente inundadas representam áreas mais baixas e que recebem água de outras fontes, que não apenas do rio Paraguai, ficando inundadas permanentemente. Os mapas da relação de nível do rio Paraguai e área inundada, e tempo de inundação tem grande importância no entendimento da distribuição e abundância da fauna e flora, pesca e pecuária e seu manejo.

4. Conclusões

1 – A delimitação da área sob influência máxima de inundação pelo rio Paraguai, nesse estudo, difere das delimitações prévias, sugerindo a necessidade de delimitação dinâmica, baseada em critérios hidrológicos, para o estudo de padrões de inundação no Pantanal.

2 – A área máxima e as áreas com maior influência do rio Paraguai para as inundações do Pantanal, na região da régua de Ladário, são relativamente pequenas e restritas, indicando que

extrapolações entre o nível do rio Paraguai, em Ladário, e as inundações para todo o Pantanal, devem ser utilizadas com cautela.

3 – A série temporal das imagens de reflectância do sensor MODIS e o emprego do Modelo Linear de Mistura Espectral mostraram-se muito úteis no mapeamento e na caracterização da dinâmica das inundações do Pantanal, podendo ser usados para o monitoramento quantitativo das inundações desse bioma.

Referências Bibliográficas

- Adami, M.; Freitas, R.M.; Padovani, C.R.; Shimabukuro, Y.E. e Moreira, M. A. Estudo da dinâmica espaço-temporal do bioma Pantanal por meio de imagens MODIS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 2008. v.43, n. 10, 1371-78 p.
- BRASIL. Ministério do Interior. Departamento Nacional de Obras de Saneamento. **Estudos Hidrológicos da Bacia do Alto Paraguai**: relatório Técnico. Rio de Janeiro, 1974. v.1.
- Galdino, S.; Clarke, R.T. Probabilidade de ocorrência de cheia no rio Paraguai, em Ladário, MS - Pantanal. Corumbá: EMBRAPA-CPAP, 1997. 58p. (EMBRAPA-CPAP. **Circular Técnica**, 23).
- Hamilton, S. K.; SIPPEL, S. J.; MELACK, J. M. Inundation patterns in the Pantanal wetland of South America determined from passive microwave remote sensing. **Archiv fur Hydrobiologie**, Stuttgart, v.137, p.1-23, jul., 1996.
- Hamilton, S. Potential Effects of Major Navigation Project (Paraguay-Parana “Hidrovia”) on Inundation in the Pantanal Floodplains. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* 15: 289–299 (1999).
- Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Earth observing system data gateway**. Disponível em: <<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>>. Acesso em: 15 fev. 2008a.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Monthly TRMM and other data sources rainfall estimate**. Disponível em: <http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/TRMM_V6.3B43.shtml>. Acesso em: 15 set. 2008b.
- Netto, J.S.M. Comportamento Espectral dos Solos. In: Meneses, P. R. e Netto, J. S. M. (Org.). **Sensoriamento Remoto - Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília, DF; UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. cap. 4, p. 127-154.
- Novo, E.M.L.M. Comportamento Espectral da Água. In: Meneses, P. R. e Netto, J. S. M. (Org.). **Sensoriamento Remoto - Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília, DF; UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p. 203-222.
- Ponzoni, F.J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: Meneses, P. R. e Netto, J. S. M. (Org.). **Sensoriamento Remoto - Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília, DF; UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p. 157-199.
- 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**, Piscataway, v. 29, p. 16-20, 1991.
- Silva, J. dos S. V. da; Abdon, M. de M. Delimitação do Pantanal brasileiro e suas sub-regiões. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 1998. v.33, 1703-11 p.