

Delimitação das áreas alagadas do Pantanal a partir da análise por Componentes Principais e Transformada Wavelet

Luciana de Oliveira Pereira¹
Francielle da Silva Cardozo¹
Yhasmin Mendes de Moura¹
Leila Maria Garcia Fonseca¹
Gabriel Pereira¹
Elisabete Caria Moraes¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515
12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{luciano, cardozo, yhasmin, gabriel, bete}@dsr.inpe.br; leila@dpi.inpe.br

Resumo. O Pantanal é considerado uma das maiores planícies de sedimentação do mundo, sendo drenado pelo alto curso do rio Paraguai e seus afluentes, ficando inundado por muitos meses durante o ano. Neste trabalho, imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) referentes aos produtos MOD13A3 e MOD43B3 foram utilizadas para obter os mapas de variabilidade espacial e temporal das áreas alagadas por meio da Análise por Componentes Principais (PCA). A partir do mapa de uso e cobertura da terra obtiveram-se quatro amostras de diferentes usos (Ecótono, Savana, Floresta Estacional Decidual e Pecuária) na qual foram extraídos os dados de precipitação e *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), estimados pelos produtos do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) e do MOD13A3, respectivamente. Com estes dados, utilizou-se a técnica de Transformada *Wavelet* para analisar a variação temporal do NDVI em função da precipitação. Os resultados mostram que a variação do vigor vegetativo das classes analisadas responde aos déficits hídricos e variações sazonais da precipitação, apresentando uma variação cíclica de 6 meses, na maioria dos casos analisados. Observou-se que a segunda componente da PCA, gerada a partir do produto da reflectância no infravermelho próximo e médio (IVP+IVM), obteve uma melhor distinção das áreas alagadas. Por outro lado, a terceira componente da PCA identificou melhor as alterações no uso e ocupação da terra referente às áreas de agricultura e pecuária, cujas variações temporais diferem significativamente em relação aos alagamentos sazonais.

Palavras-chave: análise por componentes principais, transformada de wavelet, Pantanal.

Abstract. The Pantanal is considered one of the largest sedimentary plains of the world, being drained by the upper course of the Paraguay river and its tributaries, being flooded for many months during the year. In this work, the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) images sensor relating to MOD13A3 and MOD43B3 products were used to obtain spatial and temporal variability wetlands maps through the Principal Components Analysis (PCA). From the use and land cover map were obtained four samples of different uses (Ecotone, Savanna, Deciduous Forest and Livestock) which were extracted the precipitation data and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), estimated by the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and MOD13A3 products, respectively. With these data, were used the Wavelet Transform technique to analyze the temporal variation of NDVI as a function of precipitation. The results show that the variation of the vegetation force of the analyzed classes responds to water deficit and seasonal variations in precipitation, showing a cyclic variation of 6 months in most cases analyzed. It was observed that the second component of PCA, generated from the near infrared and middle reflectance (IVP + IVM) product, had a better distinction of the flooded areas. Furthermore, the third component of PCA identified better the use and land occupation changes related to the areas of agriculture and livestock, whose temporal variations differ significantly in relation to the seasonal flooding.

Key-words: principal component analysis, wavelet transform, Pantanal.

1. Introdução

O Pantanal é considerado uma das maiores planícies de sedimentação do mundo, sendo drenado pelo alto curso do rio Paraguai e seus afluentes (Silva e Abdon, 1998; Silva, 2002). Como resultado da pequena inclinação da planície, a maior parte da área do Pantanal fica inundada por muitos meses durante o ano devido ao extravasamento das águas do rio Paraguai e seus tributários (Haase and Haase, 1995). O período seco ocorre de abril a setembro devido aos baixos índices de precipitação, e o período chuvoso ocorre a partir de outubro com o aumento da intensidade e da duração das precipitações (Magalhães, 1992; Silva *et al.*, 2002).

Devido a essa alternância de períodos secos e chuvosos, o rio Paraguai e seus afluentes possuem diferentes padrões de descarga e carga de sedimentos, resultando em um mosaico de formações geomorfológicas variadas cobertas por diferentes tipos de vegetação (Junk e Cunha, 2005). A vegetação superficial do Pantanal, sujeita a inundações sazonais, consiste de um mosaico composto por florestas, campos e pastagens abertas (Haase e Haase, 1995).

O regime de inundações determina os principais processos bióticos e abióticos, bem como as composições específicas das unidades de paisagem do Pantanal (Adamoli, 1995). Todo o bioma é influenciado pelas alterações no regime de inundações, causando mudanças na cobertura vegetal. Porém, o monitoramento dessas áreas é uma tarefa difícil, pois o Pantanal possui uma grande extensão territorial e é de difícil acesso (Pott e Pott, 2004).

Desta forma, técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas para análise e monitoramento ambiental, pois estas possibilitam o monitoramento de locais extensos e de difícil acesso como a região do Pantanal. Aliados a isso, existem diversas técnicas e modelos destinados ao mapeamento e análises ambientais variadas, como, por exemplo, Análise por Componentes Principais (PCA) e a técnica de Transformada *Wavelet* (TW).

Geralmente as bandas de uma imagem multiespectral são correlacionadas, o que torna o processamento e análise de imagens ineficientes devido à redundância de informações e quantidade de dados. A PCA é utilizada para analisar dados multivariados e remover a redundância espectral, gerando um novo conjunto de bandas descorrelacionadas, cujas bandas individuais apresentam informações não disponíveis em outras bandas (Crosta, 1992).

A TW é apropriada para analisar eventos irregularmente distribuídos e séries temporais que contêm potência não-estacionária em diferentes frequências. A decomposição pela TW de uma série temporal unidimensional é representada no tempo e frequência simultaneamente. Assim, é possível obter informações da amplitude de quaisquer sinais periódicos dentro da série, bem como informações de como esta amplitude varia com o tempo (Clemen, 1997).

Dada as circunstâncias acima descritas, o objetivo deste trabalho consiste na identificação da variabilidade espacial e temporal das áreas alagadas, assim como, das áreas agrícolas e pecuária presentes no bioma Pantanal a partir de imagens multitemporais do sensor MODIS, utilizando a técnica de PCA e, também, verificar a variabilidade temporal dos padrões fenológicos da vegetação em função da precipitação da bacia hidrográfica do Alto Paraguai a partir da TW.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo e Material

O Pantanal está localizado na porção centro-sul do Continente Sul-Americano, entre as coordenadas $59^{\circ}15'W$ e $22^{\circ}10'S$; e $54^{\circ}50'W$ e $15^{\circ}30'S$, possuindo uma área de aproximadamente 160 mil km^2 , no qual 35,36% desse total está situado no Estado do Mato Grosso e 64,64% no Estado do Mato Grosso do Sul, conforme mostra a **Figura 1**.

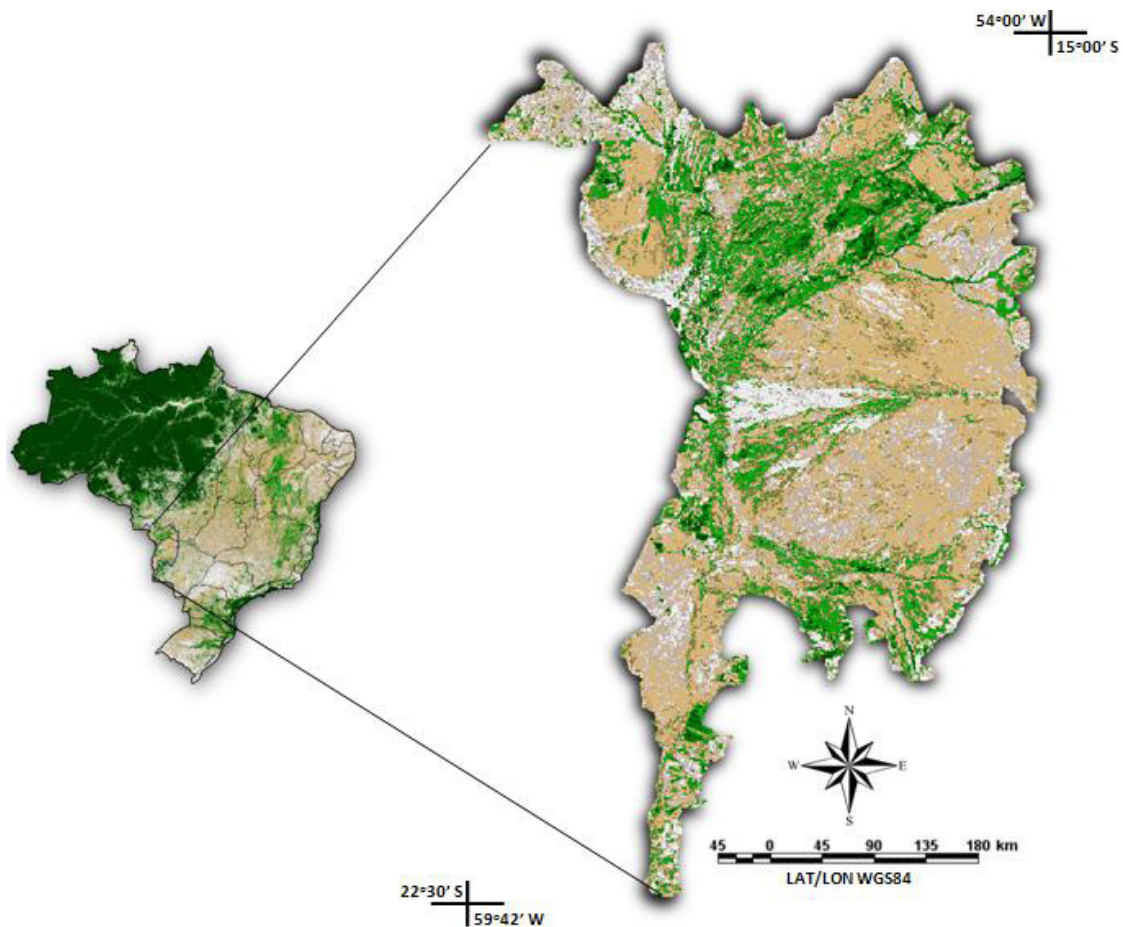


Figura 1. Mapa de Localização do Bioma Pantanal.

Para a realização dos experimentos, imagens do sensor MODIS referentes aos produtos MOD13A3 e MOD43B3 são usadas. As imagens englobam os *tiles* V10, V11 e H12, que abrangem todo o bioma Pantanal. A análise temporal dos dados compreende o período de 2000, que marca o início da aquisição dos dados do sensor MODIS, até a presente data (julho de 2010).

O produto MOD13A3 refere-se aos dados do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que fornece informações sobre as condições da vegetação. Este produto é computado a partir da reflectância bi-direcional da superfície, fornecendo dados mensais com resolução espacial de 1 km. O produto MOD43B3 refere-se à reflectância nas faixas do Infravermelho próximo e médio (NIR/SWIR), que é composto de um mosaico de 16 dias com 1 km de resolução espacial.

2.1 Geração dos Mapas de Variabilidade Espacial e Temporal das Áreas Alagadas

O pré-processamento das imagens do sensor MODIS foi realizado através da conversão dos dados em formato *Hierarchical Data Format* (HDF) para geotiff, geração de mosaicos e do recorte da área de estudo a partir do aplicativo *MODIS Reprojection Tool* (MRT). Após da etapa de pré-processamento, as imagens de reflectância NIR/SWIR e do NDVI são processadas por meio da análise de componentes principais para extrair as informações da variabilidade espacial das áreas alagadas e de uso agrícola/pecuária para o período compreendido entre 2000 e 2010.

Posteriormente, a série temporal MOD13A3 (2000-2010) é processada usando a técnica da TW. A interpretação da variabilidade temporal de 4 tipos de fisionomias vegetais foi realizada a partir da comparação dos valores de NDVI e dos dados de precipitação obtidos pelo *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), em conjunto com o mapa de Uso da terra do Pantanal do ano de 2002. Com os dados de uso e cobertura da terra, extraiu-se 4 pontos contendo os valores médios mensais de NDVI e precipitação para as classes de ecótono (extraído sobre a região do leque do rio Taquari, que está sobre uma área permanentemente alagada), pecuária, savana e floresta estacional decidual, originando, desta forma, as séries temporais que foram processadas usando a TW. Esse processamento foi realizado na plataforma *Interface Description Language* (IDL) através do pacote IDL *Wavelet Toolkit*, aplicando-se o modelo Morlet de ordem 3, com a significância global de 5%. A Figura 2 mostra o fluxograma da metodologia do trabalho.

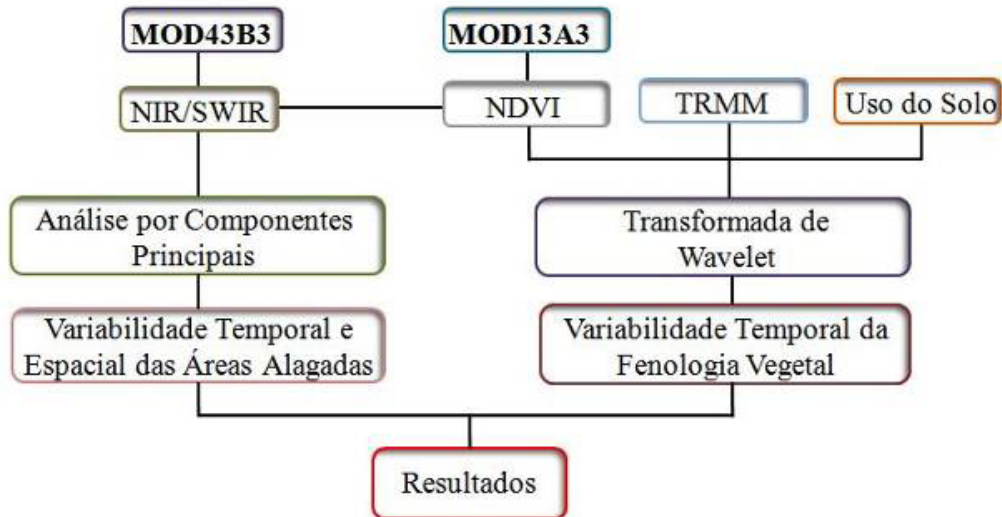


Figura 2. Fluxograma das etapas de processamento.

3. Resultados e Discussões

A **Figura 3** mostra o mapa de uso e cobertura da terra para o Bioma Pantanal disponibilizado pela EMBRAPA (2004). Este mapa foi confeccionado a partir da aplicação de segmentação (critério de crescimento de região) em imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) do satélite Landsat 5, e interpretação visual dos segmentos gerados pelo processamento da imagem. Embora o mapa tenha sido confeccionado em diversas classes de fisionomias vegetais e usos, optou-se por agrupá-lo nas classes Ecótono, Formações Pioneiras, Formações Florestais, Influência Urbana, Hidrografia, Agricultura/Pecuária e Savana.

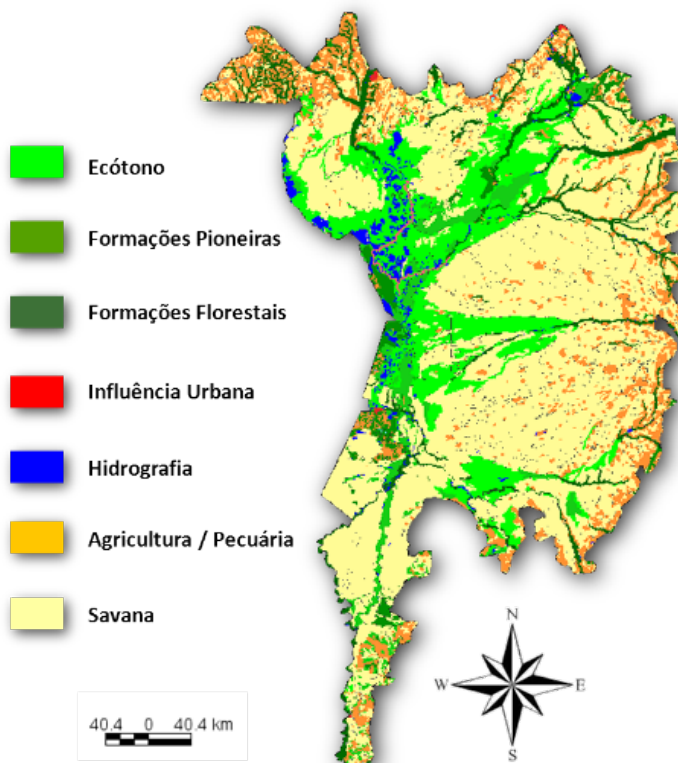


Figura 3. Mapa de Uso da Terra do Pantanal no ano de 2002.

A **Figura 4** mostra o gráfico com as medidas de área (km²) para as principais classes de uso e cobertura da terra para o Bioma Pantanal. Pode-se observar que na região do Pantanal, a classe de maior ocorrência é a Savana com 81.773 Km², seguida da classe Ecótono, com 26.000 Km². Na terceira posição encontra-se a classe Pecuária que corresponde a 16.922 Km², seguida pela Savana Estépica com 12.762 Km². As classes de menor ocorrência na região são compostas por Floresta Estacional Semi-Decidual (6.453 Km²), Formações Pioneiras (6.230 Km²), Hidrografia (2.620 Km²), Floresta Estacional Decidual (1.518 Km²) e Enclave (1.310 Km²). As classes restantes foram pouco representativas na área de estudo, possuindo menos de 1000 Km² de ocorrência ao total.

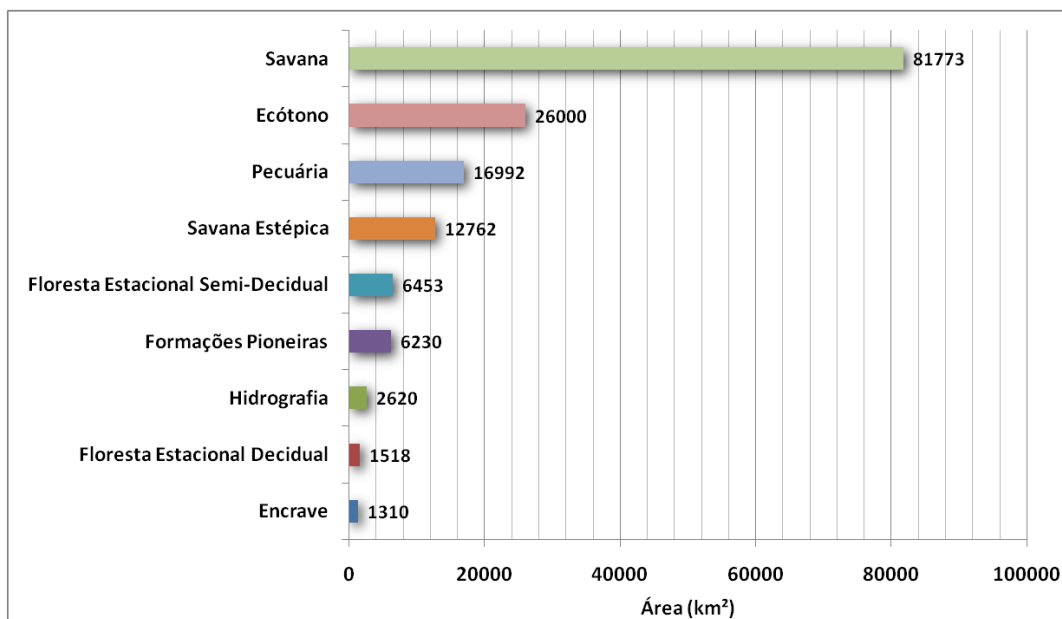


Figura 4. Gráfico das medidas em km² das classes de uso da terra do Pantanal em 2002.

A **Figura 5** mostra os espectros de potência obtidos a partir da TW. A TW é utilizada para converter séries temporais em uma série com os coeficientes da *wavelet*, na qual cada um destes representa a amplitude relacionada com uma função *wavelet* em uma dada posição. Cada coeficiente gerado pela TW representa a melhor correlação entre a função escolhida (neste caso Morlet de ordem três) e a relação da variabilidade temporal dos dados analisados. O IDL *Wavelet Toolkit* utiliza as transformações contínuas e discretas (Daubechies, 1992; Mallat, 1989), indicando no eixo x a intensidade temporal (mensal) e no eixo y a escala de variação temporal (inverso da frequência). A escala de cores representa a potência, valor absoluto ao quadrado dos coeficientes gerados pela TW, na qual o peso de cada ponto mede a contribuição de cada dado na variabilidade total da série. O nível de significância é originado pelo teste χ -quadrado com dois graus de liberdade.

A **Figura 5** indica a variabilidade temporal do NDVI (2000 a 2010) das quatro classes selecionadas para análise (Ecótono, Formações Florestais, Pecuária e Savana). A análise dos gráficos mostra que a variação dos valores de NDVI, que indica o vigor vegetativo, está coerente com as respostas fenológicas ao estresse hídrico, apresentando uma variabilidade semestral relacionada com a disponibilidade de precipitação. O único caso na qual foi constatado uma variabilidade quinquenal foi a classe Ecótono (**Figura 5a**), cuja amostra selecionada compreende a área central do leque do Rio Taquari. Nesta classe percebe-se que houve uma diminuição significativa nos valores de NDVI a partir do segundo semestre de 2004, indicando uma provável área de alagamento que não

existia nos anos anteriores ou mesmo uma queda na produtividade primária da vegetação predominante naquela área.

A classe Formações Florestais (**Figura 5b**) apresenta variação semestral, chamando a atenção para uma considerável variação ocorrida a partir de junho de 2005 e 2008. A variação semestral, possivelmente, ocorreu devido à queda das folhas na época seca, aumentando a produtividade na época chuvosa. Esta fisionomia vegetal responde rapidamente às flutuações na variabilidade das estações. A classe Pecuária (**Figura 5c**) apresenta variação semestral e possui maior magnitude entre junho de 2007 e 2009, indicando um aumento no vigor vegetativo a partir de 2007.

Por último, a classe Savana (**Figura 5d**) apresentou uma variabilidade temporal semestral no início da série, (2001 a 2006), porém, a partir de 2007 os valores de NDVI sofreram poucas variações. Ainda, nesta classe percebe-se uma contribuição, embora pequena, de ciclos bianuais na variabilidade temporal do NDVI.

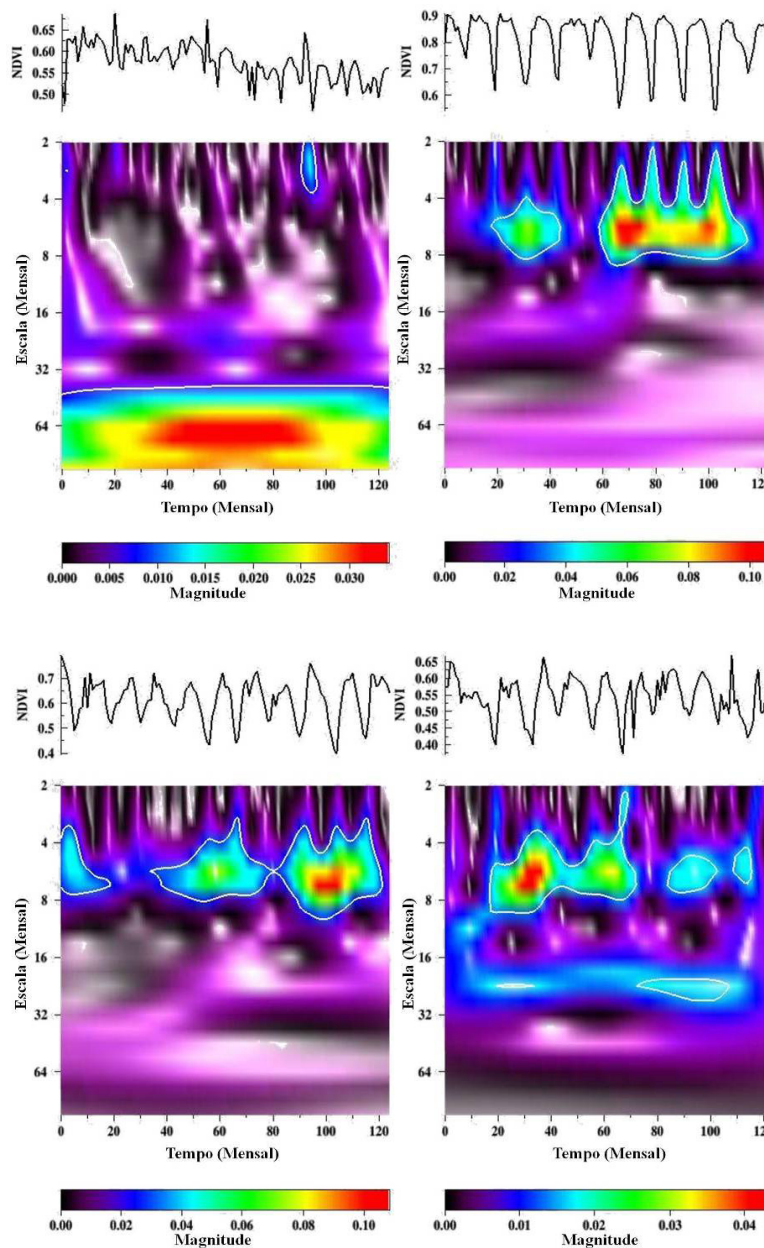


Figura 5. Espectro de potência das formações vegetacionais analisadas, obtidas a partir da Transformada Wavelet.

A **Figura 6** ilustra as imagens do sensor MODIS (composição 1B2R6G) adquiridas em 2000, ano de maior alagamento, e de 2009, ano de menor alagamento na área de estudo, onde se pode observar a variação na dinâmica da paisagem. As **Figuras 7 e 8** representam as componentes 2 (PCA2) e 3 (PCA3) geradas a partir dos dados de NDVI e reflectância NIR/SWIR, respectivamente. Analisando a **Figura 7**, percebe-se que a componente CP2, gerada a partir do produto da reflectância NIR/SWIR, identificou melhor a variabilidade das áreas alagadas, pois a água possui baixa resposta espectral neste canal, diferentemente da vegetação pioneira exposta após a inundação, que apresenta resposta espectral alta neste comprimento de onda. As regiões com tons de vermelho são cobertas por lâminas d'água na estação chuvosa, resultando em lagos temporários extensos, que inundam a vegetação existente. Após a inundação a vegetação volta a ficar exposta, ocupando a área.

A **Figura 8**, que representa a componente CP3, também, apresentou melhor resposta na imagem de reflectância NIR/SWIR. No entanto, observa-se maior sensibilidade para a identificação de alterações no uso e ocupação da terra, como nas áreas de agricultura e pecuária (como visualizado na **Figura 3**), pois o solo, quando exposto, apresenta baixa resposta espectral nesta banda comparado à vegetação.

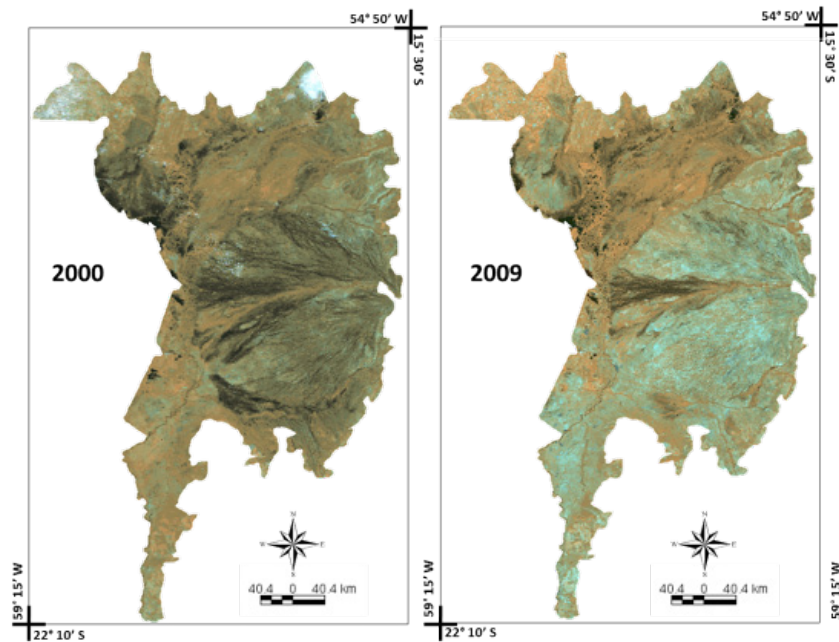


Figura 6. Imagens do sensor MODIS de 2000 (ano de maior alagamento) e 2009 (ano de menor alagamento), composição 1B2R6G (vegetação em tons de vermelho).

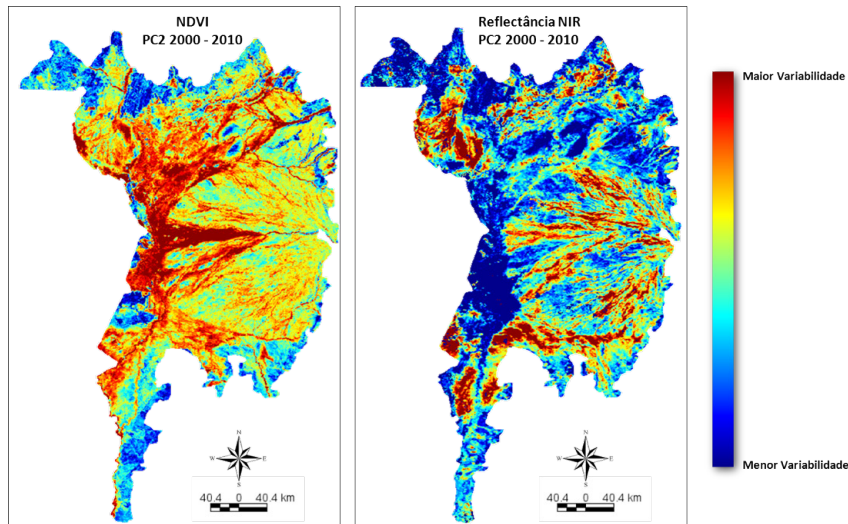


Figura 7. Mapa da variabilidade obtida a partir da componente principal CP2 das imagens NDVI (à esquerda) e de reflectância NIR/SWIR (à direita).

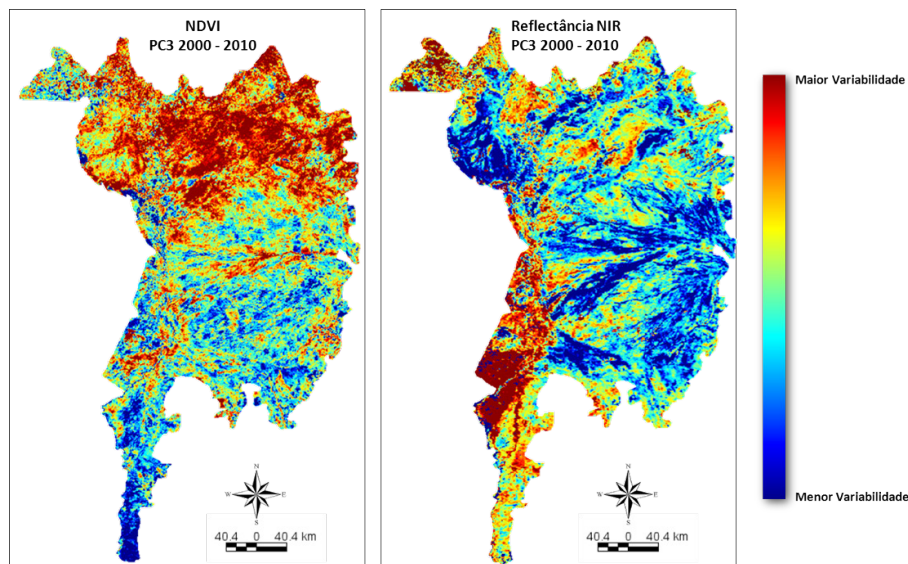


Figura 8. Mapa de variabilidade obtida a partir da componente principal CP3 das imagens NDVI (à esquerda) e de reflectância NIR/SWIR (à direita).

4. Conclusões

A importância do Bioma Pantanal no contexto nacional e internacional é evidente, sendo umas das áreas que possui maior variabilidade intra e interanual. Os espectros de potência gerados a partir da TW mostraram uma forte correlação entre os fenótipos analisados e os dados de precipitação. Eles variaram de acordo com o período chuvoso e seco, que ocorre num período cíclico de seis meses, exceto a classe Ecótono que apresentou uma variação periódica de 5 anos.

Dentre os produtos utilizados para identificar a variabilidade das áreas alagadas, o que apresentou melhor resultado foi a componente CP2, obtida a partir da imagem de reflectância NIR/SWIR. Este fato pode ser atribuído à melhor resposta espectral da

vegetação, em contraste com a baixa resposta da água, nesta banda. Por outro lado, a componente PC3, obtida a partir da imagem de reflectância NIR/SWIR, apresentou melhor capacidade na identificação das alterações no uso e ocupação da terra, como, por exemplo, áreas agrícolas e pastagens.

A identificação dos padrões de variabilidade dos diferentes fenótipos correlacionados com a precipitação é de suma importância para o manejo e melhor compreensão da dinâmica da área estudada. Com esse conhecimento pode-se fazer inferências sobre comportamentos futuros e identificar alterações na dinâmica que podem ser influenciados tanto por fatores ambientais, como por fatores climáticos e antrópicos.

5. Referências

- Adamoli, J. Zoneamento ecológico do Pantanal baseado no regime de inundações. In: Encontro sobre sensoriamento remoto aplicado a estudos no pantanal, 1., 1995, Corumbá. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 2005. p. 15-17.
- Clemen, T. Integrating Simulation Models into Environmental Information Systems-Model Analysis. In: Denzer, R. et al., 1997. **Environmental Software Systems**, Chapman and Hall, London, p. 292–299, 1997.
- Crosta, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas – SP: IG/UNICAMP, 170 p, 1992.
- Daubechies, I. **Ten Lectures on Wavelets**. Society for Industrial and Applied Mathematics, 357 p, 1992.
- Embrapa. **Levantamento e mapeamento dos remanescentes da cobertura vegetal do bioma Pantanal, período de 2002 na escala de 1:250.000**. Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP, 43 p, 2004.
- Haase, J.; Haase, P. Above-ground biomass estimates for invasive trees and shrubs in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. **Forest Ecology and Management**, 73, p. 29-35, 1995.
- Junk, W. J.; Cunha, C. N. Pantanal: a large South American wetland at a crossroads. **Ecological Engineering**, 24, p. 391–401, 2005.
- Magalhães, N. W. **Conheça o Pantanal**. São Paulo: Terragraph, 390 p, 1992.
- Mallat, S. **Multiresolution approximation and wavelets**. Trans. Amer. Math. Soc., 315, p. 69–88, 1989.
- Pott, A.; Pott, V. J. Features and conservation of the Brazilian Pantanal wetland. **Wetlands Ecology and Management**, v.12, p. 547-552, 2004.
- Silva, J. S. V; Abdon, M. M. Delimitação do Pantanal Brasileiro e suas subregiões. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 33. n. especial, p. 1703-1711, out. 1998.
- Silva, R. C. **Estudo do Balanço de Radiação no Pantanal Sul Matogrossense**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 213 p, 2002.
- Silva, R. C.; Alvalá, R. C. S.; Manzi, A. O.; Souza, A. **Estimativa da radiação de onda longa atmosférica no Pantanal Sul-Matogrossense durante o período seco de 1999**. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12, Foz de Iguaçu-PR, 2002.