

## Lineamento de vegetação no Pantanal: correlação do comportamento temporal da pluviosidade e verdor da vegetação e sua persistência espacial

Eduardo Francisco Ribeiro<sup>1</sup>  
Natasha Costa Penatti<sup>1</sup>  
Teodoro Isnard Ribeiro De Almeida<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geociências—USP/IGc  
Rua do Lago, 562 – Cidade Universitária, São Paulo-SP - 05508-080  
{eduardofribeiro, nat.bio}@gmail.com  
talmeida@usp.br

**Abstract.** The Pantanal basin is a Quaternary active sedimentary basin which subsidence is controlled by faults. It is the largest tropical wetland in the world, which is located in the center of South America and has an area of about 170,000 km<sup>2</sup> (with 138,183 km<sup>2</sup> in Brazil). Vegetation lineaments in wetlands are very important because they help to identify tectonic features that are important to understand their formation and environmental variability. These features in Pantanal are expressed by differences in vegetation type and phenology. Although the relief express the location of faults, in this flat surface it changes abruptly the vegetation phenology. This paper discusses from remote data the relation between local rainfall and vegetation phenology variability, using TRMM and MODIS data, in a vegetation lineament with about 100 km long and the azimuth of 69°NE. The results show strong correlation between rain and phenology in the SE portion of the lineament, while the NW portion shows a weak dependence due to a slightly difference in elevation that changes the flood seasonality. These conclusions, associated with the linearity of the contact between these environments, indicate that the presence of a fault with vertical displacement is responsible for this phenological variability.

**Palavras-chave:** multi-sensor, lineamento de vegetação, geobotânica, TRMM, MODIS, séries temporais, vegetation lineament. multisensor, geobotany, time series

## 1. Introdução

O Pantanal é uma bacia sedimentar ativa do Quaternário e também a maior área úmida tropical do planeta. Localizada na Bacia do Alto Paraguai (BAP) é considerada Patrimônio Natural da Humanidade e Reserva da Biosfera Mundial. Sua área dentro do Brasil abrange 138.183km<sup>2</sup> e está inserida entre as latitudes 15° 30' e 22° 30' sul e longitudes 54° 45' e 58° 30' oeste, na região Centro-Oeste do Brasil entre os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (Silva e Abdon, 1998) e limítrofe com a Bolívia e Paraguai onde ocupa em torno de 30.000km<sup>2</sup> (Pott e Silva, 2016). Apesar de sua importância, ainda é pouco conhecida sua rica variabilidade ambiental, que ocorre devido a mistura dos biomas do Cerrado, Floresta Amazônica, Chaco, Mata Atlântica, relictos de Caatinga e a complexa relação entre os tipos de solo, a vegetação e a água (Pott e Silva, 2016). Estes autores observam que pequenas variações no relevo afetam drasticamente a presença, a intensidade e a duração das inundações dessa planície, gerando ambientes diferentes, referindo-se a um “caos auto-organizado”.

De acordo com Ussami et al. (1999) a Bacia do Pantanal é consequência da reativação tectônica do *forebulge* durante o último evento compressivo andino, a aproximadamente 2,5 Ma. Seu depocentro é paralelo à elongação do *forebulge* e a sua subsidência é controlada por falhas (Assine e Soares, 2004). Efeitos da reativação de falhas do embasamento são evidentes na morfologia da bacia sob a forma de lineamentos, condicionando, além da ocorrência dos terrenos pré-cambrianos na borda oeste, as drenagens aluviais modernas no interior da bacia e delimitando os lobos deposicionais e provocando frequentes sismos (e.g. Dias et al., 2016).

Lineamentos são definidos por O’Leary et al. (1976) como feições mapeáveis, simples ou compostas por segmentos lineares cujas partes estão alinhadas de forma retilínea ou levemente curvilínea e que se distinguem do padrão das feições adjacentes. Essas expressões podem ser fisiográficas (originadas por variações do relevo) ou tonais quando é dada pelo contato entre diferentes tonalidades em imagens orbitais, causadas, por exemplo, pelo contraste entre duas unidades geológicas distintas ou pela vegetação. A relação dessas estruturas está, muitas vezes, relacionada a causas geológicas, como por exemplo falhas ou fraturas. No Pantanal, devido às pequenas variações de relevo e à grande variabilidade da altura do dossel das coberturas vegetais, os modelos digitais de elevação (MDE) acabam representando elevações aparentes que são, na verdade, o contraste entre dosséis de diferentes alturas. Entretanto o estudo destas variações pode mostrar informações importantes sobre a geologia local e sobre a influência tectônica no desenvolvimento da paisagem pantaneira através dos lineamentos de vegetação. Os lineamentos de vegetação são feições lineares formadas por coberturas vegetais diferentes, em geral em função de falhas e fraturas que modificam o movimento preferencial da água e afetam os parâmetros sazonais da vegetação.

No Pantanal, pequenas alterações na topografia podem gerar ambientes diferentes para o desenvolvimento da vegetação. Almeida et al. (2015) discutem que variações de elevação decimétricas (não identificáveis em MDE) podem afetar drasticamente o regime de alagamentos e, conseqüentemente, a resposta sazonal da vegetação e os habitats, como discutido mais longamente em Pott & Silva (2016). A partir de séries temporais de índices de vegetação é possível se quantificar e analisar os parâmetros sazonais que controlam essas mudanças através da *Land Surface Phenology* (LSP) em grande escala (De Beurs e Henebry, 2004; Tan et al., 2008). Na região norte do Pantanal há um lineamento de vegetação evidente e retilíneo que divide dois conjuntos de vegetação bastante diferentes (Figura 1), como pode ser observado em WWF- Brasil (2009) e em Evans et al. (2014). Visando investigar este lineamento, o presente trabalho tem como objetivo mostrar a anômala relação entre chuva e fenologia da vegetação nos dois lados deste lineamento de vegetação com em torno de 100 km de extensão que ocorre no norte do Pantanal.

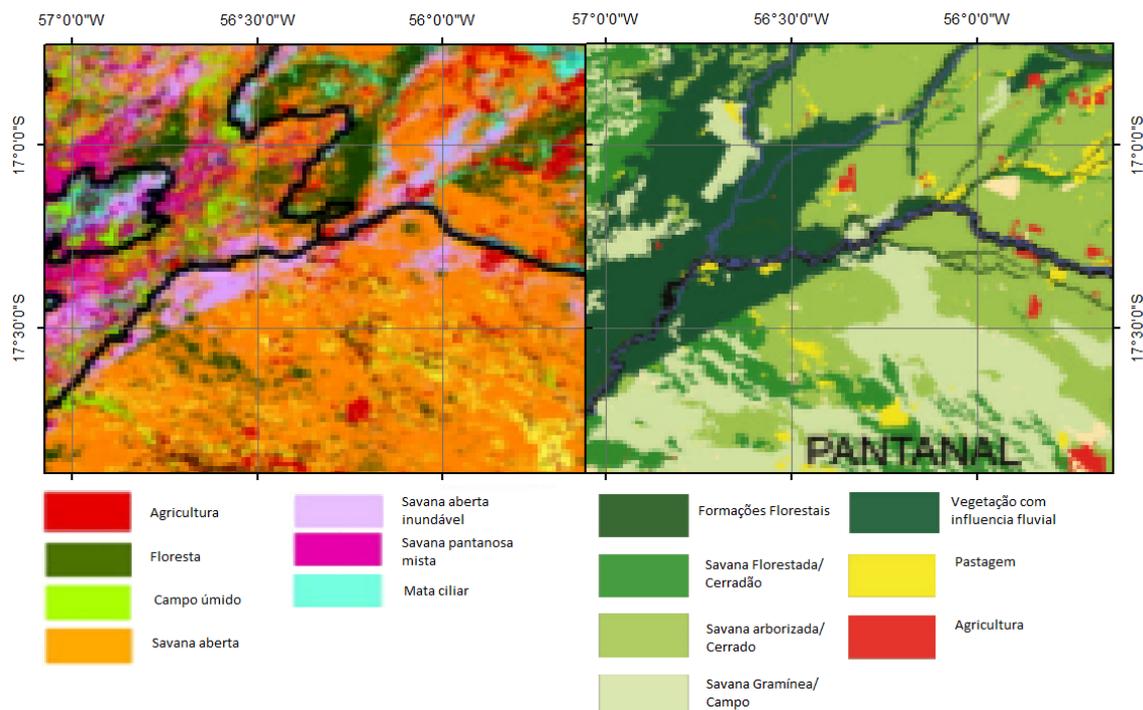


Figura 1. A esquerda, mapa de vegetação modificado de Evans et al. (2014), notar a presença do lineamento marcando a variação entre Savana aberta e Savana aberta inundável. A direita, mapa de vegetação segundo WWF- Brasil (2009), notar a presença do lineamento marcando a variação entre Formações Florestais e Savana florestada/Cerradão e Savana arborizada/Cerrado.

## 2. Metodologia de trabalho

As imagens do programa MODIS são fundamentais no estudo de extensas regiões, particularmente as que tem intensa dinâmica sazonal como ocorre no Pantanal. O produto MOD13Q1 trata-se de imagens compostas dos melhores pixels coletados a cada dois dias em uma dada região durante 16 dias, ou seja, 23 imagens por ano com pouca ou nenhuma nebulosidade. Este produto tem resolução espacial de 250m e possui dois índices de vegetação, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), uma banda no infravermelho médio, uma no infravermelho próximo, uma no vermelho, no azul e uma imagem de qualidade de pixel (*pixel reliability*). São ideais no estudo da evolução sazonal, devido a possibilidade de se construir séries temporais com baixo ruído e cobertura de nuvens, permitindo o estudo das variações sazonais da vegetação, como por exemplo através da LSP, partir de um sensor remoto.

A partir dessas imagens, foi construída uma série temporal de NDVI entre os anos de 2001 e 2015. Embora problemas atmosféricos das imagens sejam minimizados no produto MOD13Q1 ainda resta o ruído de variações angulares, nuvens residuais e perturbação atmosférica, que pode atrapalhar a análise dos dados. Com o objetivo de minimizar esses ruídos no perfil temporal, foi realizada a filtragem dos dados através do algoritmo Savitsky-Golay (Savitzky e Golay, 1964) no software TIMESAT (Chen et al., 2004; Jönsson e Eklundh, 2002, 2004). Este software foi desenvolvido para o tratamento de séries temporais bem como para a extração dos seus parâmetros sazonais. A filtragem consiste no ajuste do perfil temporal a uma função polinomial de baixo grau através do conjunto de dados usando como fator ponderador a banda de qualidade (pixel reliability) e a forma do perfil. A partir das imagens filtradas, foram definidas duas áreas como demonstrado na Figura 1, uma a noroeste da feição estudada e uma a sudeste. A partir dessas imagens foi extraído o perfil temporal médio para as duas regiões.

Foi obtida ainda a série temporal do produto 3B43 do sistema sensor TRMM que estima a média mensal obtida a partir de dados de sensores ópticos e em micro-ondas. A comparação entre o comportamento do verdor (indicado pela série NDVI) e a pluviosidade foi feita considerando as áreas definidas na Figura 1. A resolução espacial do sistema sensor TRMM é de 0,25 graus (27,5 km no local) e para cobrir as áreas acima definidas foi considerada a resposta média de um grupo de cinco pixels para cada lado. Decidiu-se trabalhar com esses conjuntos de pixels para minimizar erros na base de dados. As séries TRMM são mostradas na forma de perfis temporais médios extraídos das duas áreas e seu resultado foi comparado com o perfil temporal médio das mesmas áreas na série de NDVI. Foi então calculado para as duas áreas o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) considerando a resposta simultânea NDVI-TRMM e a com um e dois meses de retardo para o NDVI já que o tempo de resposta da vegetação à chuva não é instantâneo.

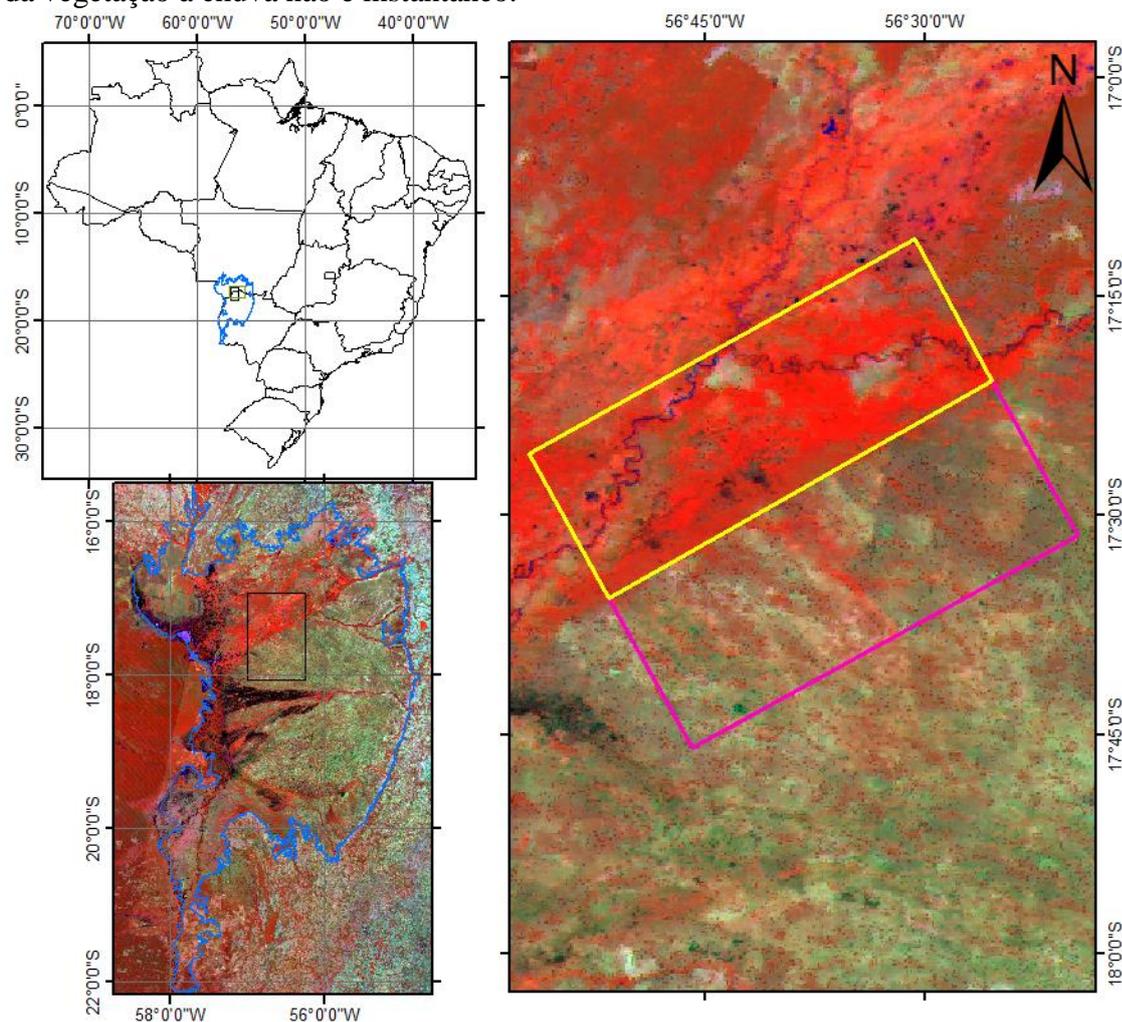


Figura 2. A esquerda a localização do Pantanal em relação ao Brasil. Abaixo a localização do Pantanal (limites em azul) e a região estudada em uma imagem do produto MOD13Q1 do DOY 241 (29 de agosto, seca) do ano 2000 em RGB: *NIR*, *MIR* e *Red*. À esquerda as porções NW e SE estudadas neste trabalho.

### 3. Resultados e discussão

A precipitação nas regiões NW e SE do lineamento apresentaram grande similaridade (Figura 2), indicando não haver grandes alterações na pluviosidade local. O cruzamento da série temporal de precipitação com a de NDVI para as sub-regiões a NW e SE do lineamento mostraram resultados muito diversos (Figura 3). Evidentemente há relação entre a resposta de clorofila e área foliar, parâmetros básicos indicados pelo NDVI, com o ciclo de chuvas.

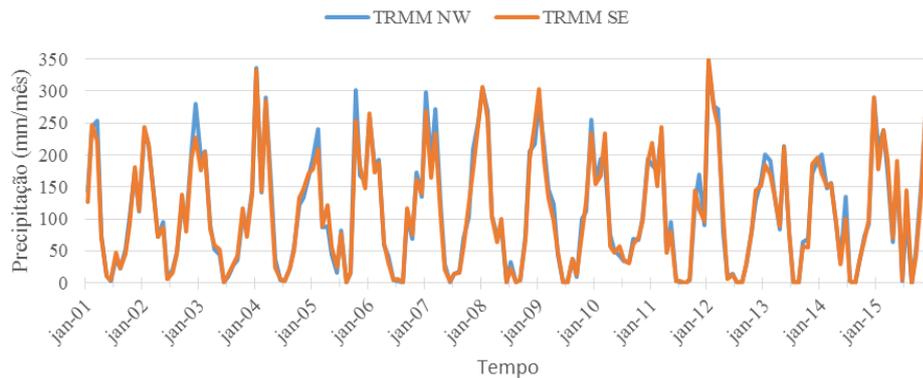


Figura 3. Perfil temporal médio TRMM das áreas a noroeste (NW) e a sudeste (SE) do lineamento em estudo.

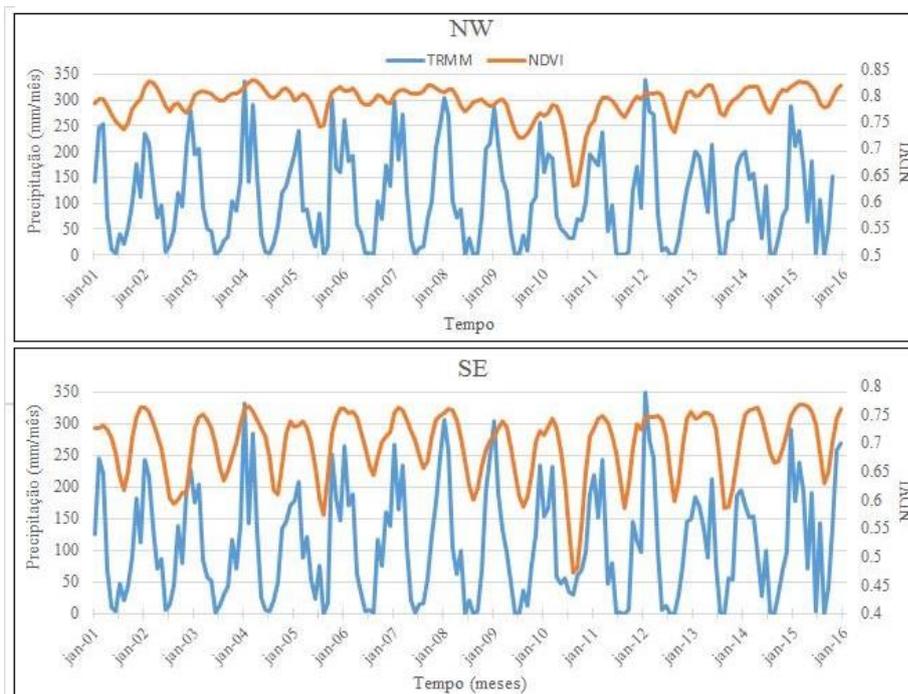


Figura 4. Comparação do perfil temporal de NDVI e precipitação mensal das áreas a noroeste (NW) e a sudeste (SE) do lineamento em estudo.

O tempo de resposta entre a rebrota e o início das chuvas e a perda de clorofila após o início da estiagem foi comparado entre os perfis temporais de precipitação média mensal e NDVI. Analisou-se a correlação existente entre os dados originais e com um e dois meses de retardo do verdor em relação à pluviosidade, considerando que a maior correlação entre os dados indicaria o tempo de reação da vegetação, tanto com o início das chuvas como com o início da estiagem. A Tabela 1 mostra que o tempo de retardo de um mês do NDVI em relação à precipitação foi o que apresentou maior correlação na região noroeste ( $r=0,68$ ).

A região a SE do lineamento (Figura 3) apresenta alta correlação entre as duas variáveis na região SE, demonstrando uma forte dependência da intensidade do verdor da vegetação com a evolução das chuvas com a precipitação precedendo o verdor em um mês. Assine et al. (2016a) discutem a dinâmica da hidrologia superficial do Pantanal e mostram que na região a SE do lineamento o fluxo d'água superficial dominante é de escoamento pluvial (*pluvial runoff*), o que implica na ausência de outra entrada significativa de água no sistema e dependência da vegetação à água de chuva, o que corrobora com os dados aqui obtidos.

A região noroeste apresenta menor correlação linear ( $r=0,41$ ), ou seja, a relação chuva-verdor é menos intensa. Desta forma, pode-se verificar que parte considerável da água que

abastece esta área não é de origem das chuvas locais: a dominância do fluxo de água superficial é dada pelo fluxo de água em rios, córregos e outros canais (*streamflow*), como demonstrado por Assine et al. (2016a). Outro fator que diminui a relação da chuva e do verdor nessa região é que no período das chuvas há a queda na resposta de NDVI causada pelas inundações, que são longas e espacialmente importantes na região imediatamente a NW do lineamento. Quando áreas de campo, campo sujo e florestas de dossel aberto (fitofisionomias comuns na região) estão inundadas há inevitável redução na resposta do verdor (NDVI). Observe-se ainda que a amplitude das variações do NDVI a noroeste do lineamento é muito menor que a sudeste, pois há uma introdução contínua de água por rios perenes, disponibilizando-a para a vegetação. Em longas e generalizadas estiagens naturalmente também a água dos rios escasseará e a variação no NDVI na região a NW do lineamento será mais intensa e com comportamento mais semelhante ao encontrado na região a SE. No ano de 2009 (mês 115; Figura 3) ocorreu esta situação graças à intensa seca em toda a região, a qual levou a uma queda importante do verdor em ambos os lados do lineamento.

Tabela 1. Teste de retardo do dado de verdor (NDVI) em relação à estimativa de precipitação (TRMM).

Correlação de Pearson (r)	r direto	r com um mês de atraso	r com dois meses de atraso
NW	0.38	0.41	0.36
SE	0.58	0.68	0.60

A partir dos dados apresentados pode-se concluir pela simples dominância de *runoff* na porção mais elevada e distante do principal rio da região enquanto, nas proximidades do rio, dominância por fluxo superficial, em drenagens perenes ou não é uma situação comum. O incomum na área de estudo é a linearidade do contato entre áreas com tais dominâncias e a total independência do curso atual do rio: na área demarcada em amarelo na Figura 1 o lineamento está entre 3 km e 20 km do rio São Lourenço. Os trabalhos de WWF- Brasil (2009) e Evans et al., (2014), ao discutirem respectivamente as coberturas vegetais e os habitats pantaneiros, mostram que a diferente dinâmica da hidrologia superficial, limitada pelo lineamento de vegetação aqui estudado, tem importante significado ambiental. A magnitude desta feição linear por si sugere uma origem geológica, uma possível falha em que o bloco noroeste foi abatido em relação ao bloco sudeste. Em Assine et al. (2016b) este movimento é descrito, quando afirmam que um sistema de falhas NE-SW controla áreas de maior ou menor subsidência e que o mais notável exemplo destas estruturas é o que separa uma importante área de subsidência no norte do Pantanal, que recebe sedimentos das áreas-fonte dos rios Cuiabá São Lourenço e Paraguai da região mais elevada do megaleque do Taquari, com sedimentos da área-fonte dominados por areia quartzosa. Acrescente-se que a região a sudeste do lineamento é dominada por sedimentos arenosos do megaleque do Taquari, muito permeável e com baixa taxa de armazenamento de água, tornando-se mais dependente da água da chuva enquanto a região a noroeste é submetida a inundações do rio São Lourenço cuja área fonte possui mineralogia mais variada do que os sedimentos do Rio Taquari.

A área vizinha do Pantanal, a nordeste da área de estudo, possui uma descontinuidade magnética com ao menos 400 km de extensão associada à zona de falhas General Carneiro a qual pode ser continuidade na direção NE do lineamento de vegetação aqui descrito o qual pode, assim, representar uma reativação de estrutura formada no Neoproterozoico e ativa no Mesozoico (Juro-Cretáceo), afetando a sedimentação na porção norte da Bacia Sedimentar do Paraná (Curto et al., 2014). Considerando ainda que a literatura associa o Lineamento General Carneiro e estruturas subsidiárias com o Lineamento Transbrasiliano (Curto et al., 2014), o lineamento de vegetação estudado estaria relacionado com uma geossutura que se

estende por cerca de 4.000 km na América do Sul e que continua na África como lineamento Kandi (Brito Neves et al., 2002), como já aventado na literatura por Soares et al. (1998).

#### 4. Conclusões

Neste trabalho discute-se a diferente importância das chuvas locais na cobertura vegetal que ocorre nos dois lados de grande lineamento de vegetação que há no norte do Pantanal. Cruzando dados mensais médios de um intervalo de quinze anos de verdor da vegetação (NDVI) e pluviosidade local (TRMM) demonstrou-se a maior independência entre verdor e chuva a noroeste do lineamento, o que é explicado pela alimentação do freático durante as secas pelo rio São Lourenço, o qual inunda ampla e longamente parte daquela região. Em consequência há maior disponibilidade hídrica na porção NW em relação à SE, com reflexo tanto no diferenciado comportamento fenológico da vegetação como nas espécies presentes.

Os dados apresentados, ao mostrar que a variação na disponibilidade hídrica responsável pela diferença entre os ambientes não é dada por variações climáticas, demonstram que na porção a NW do lineamento, alimentada por rio perene, encontra-se topograficamente abatida em relação à porção a SE. Como esse abatimento é limitado linearmente por cerca de 100 km, há a clara indicação de tratar-se de uma falha com rejeito vertical. A pequena diferença no relevo assim gerada, dificilmente perceptível em modelos digitais de elevação, é aqui demonstrada indiretamente por dados remotos de pluviosidade e verdor da vegetação.

#### Referências Bibliográficas

- Almeida, T. I. R.; Penatti, N. C.; Ferreira, L. G.; Arantes, A. E.; do Amaral, C. H.; Principal component analysis applied to a time series of MODIS images: the spatio-temporal variability of the Pantanal wetland, Brazil. **Wetlands Ecology and Management**, v. 23, n. 4, p.737–748, 2015.
- Assine, M. L.; Soares, P. C.; Quaternary of the Pantanal, west-central Brazil. **Quaternary International**, v.114, n. 1, p.23–34, 2004.
- Assine, M. L.; Macedo, H.; Stevaux, J.; Bergier, I. Avulsive rivers in the hydrology of the Pantanal wetland. In: Bergier, I. ; Assine M.L (Org). **Dynamics of the Pantanal Wetland in South America**. Springer International Publishing, 2016a p. 83–110.
- Assine, M. L.; Merino, E. R.; Pupim, F. N.; Warren, L. V.; Guerreiro, R. L.; McGlue, M. M. Geology and geomorphology of the Pantanal basin. In: Bergier, I. ; Assine M.L. (Org). **Dynamics of the Pantanal Wetland in South America**. Springer International Publishing, 2016b, p.23–50.
- Brito Neves, B. B.; Van Schmus, W. R.; Fetter, A. North-western Africa–North-eastern Brazil. Major tectonic links and correlation problems. **Journal of African Earth Sciences**,v. 34, n.3, p. 275–278, 2002.
- Chen, J.; Jönsson, P.; Tamura, M.; Gu, Z.; Matsushita, B.; Eklundh, L. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter. **Remote sensing of Environment**, v. 91, n. 3, p. 332-344, 2004.
- Curto, J. B.; Vidotti, R. M.; Fuck, R. A.; Blakely, R. J.; Alvarenga, C. J. S.; Dantas, E. L.; The tectonic evolution of the Transbrasiliiano Lineament in northern Paraná Basin, Brazil, as inferred from aeromagnetic data. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 119, n. 3, p. 1544-1562, 2014.
- Curto, J. J. B.; Vidotti, R. R. M.; Blakely, R. R. J.; Fuck, R. A. R.; Crustal framework of the northwest Paraná Basin, Brazil: Insights from joint modeling of magnetic and gravity data. **Tectonophysics**, v. 655, p. 58-72, 2015.
- De Beurs, K. M.; Henebry, G. M.; Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 4, p. 497-509, 2004.

Dias, F. L. F.; Assumpção, M.; Facincani, E. M. E.; França, G. S.; Assine, M. L.; Paranhos Filho, A. C.; Gamarra, R. M.; The 2009 earthquake, magnitude mb 4.8, in the Pantanal Wetlands, west-central Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 88, n. 3, p. 1253-1264, 2016.

Evans, T. L.; Costa, M.; Tomas, W. M.; Camilo, A. R.; Large-scale habitat mapping of the Brazilian Pantanal wetland: A synthetic aperture radar approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 155, p. 89-108, 2014.

Jönsson, P.; Eklundh, L.; Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 8, p. 1824-1832, 2002.

Jönsson, P.; Eklundh, L.; TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 8, p. 833-845, 2004.

O’Leary, D.; Friedman, J. D.; Pohn, H. A.; Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **Geological Society of America Bulletin**, v. 87, n. 10, p. 1463-1469, 1976.

Pott, A.; Silva, J.; Terrestrial and aquatic vegetation diversity of the Pantanal wetland. In: **Dynamics of the Pantanal Wetland in South America**. Springer International Publishing, 2016. p. 111-131.

Savitzky, A.; Golay, M.; Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, 1964.

Silva, J. D. S. V.; Abdon, M. D. M.; Delimitação do Pantanal brasileiro e suas sub-regiões. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 33, p. 1703-1711, 1998.

Soares P.C.; Assine M.L.; Rabelo L.; The Pantanal Basin: recent tectonics, relationships to the Transbrasiliiano Lineament. **Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 459-469, 1998.

Sykes, L. R.; Intraplate seismicity, reactivation of preexisting zones of weakness, alkaline magmatism, and other tectonism postdating continental fragmentation. **Reviews of Geophysics**, v. 16, n. 4, p. 621-688, 1978.

Tan, B.; Morisette, J.; Wolfe, R.; Gao, F.; Vegetation phenology metrics derived from temporally smoothed and gap-filled MODIS data. In: **IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. IEEE, 2008. p. III-593-III-596.

Ussami, N.; Shiraiwa, S.; Dominguez, J. M. L.; Basement reactivation in a sub-Andean foreland flexural bulge: the Pantanal wetland, SW Brazil. **Tectonics**, v. 18, n. 1, p. 25-39, 1999.

WWF – Brasil. **Monitoring alterations in vegetation cover and land use in the upper Paraguay river basin, brazilian portion, period of analysis: 2002 to 2008**. Brasília: WWF, 2009, 56 p.