

O PANTANAL E O LIMIAR DAS ÁGUAS: A INTRÍNSECA RELAÇÃO ENTRE INUNDAÇÃO, VEGETAÇÃO E GEOMORFOLOGIA

Merino, E.R. (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA) ; Montes, C.R. (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO) ; Assine, M.L. (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA) ; Pereira, G. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI) ; Melfi, A.J. (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

RESUMO

As áreas úmidas estão entre os ecossistemas mais importantes e diversos do planeta e entendê-las é fundamental para garantir sua conservação. No entanto, ainda existem lacunas sobre suas características naturais. Dessa forma, o presente trabalho buscou entender a relação entre inundações, vegetação e geomorfologia em uma das maiores do planeta, o Pantanal. O trabalho foi desenvolvido com base em uma série temporal (1985-2019) de dados orbitais (imagens dos satélites Landsat 5, 7 e 8) e dados climáticos, processados em nuvem na plataforma Google Earth Engine. O trabalho destacou importantes diferenças no pulso de inundação da bacia tal como com defasagem temporal dos alagamentos entre as porções norte e sul da planície. Importantes mudanças ambientais foram notadas em algumas regiões após a ocorrência de processos geomorfológicos tais como avulsões fluviais. Os resultados deste trabalho destacam o ganho propiciado pela computação em nuvem e podem contribuir para preservação do Pantanal.

PALAVRAS CHAVES

Google Earth Engine; Landsat; CHIRPS; Mudanças Ambientais; Avulsão

ABSTRACT

Wetlands are among the most important and diverse ecosystems on the planet, and understanding them is crucial for ensuring their conservation. However, there are still gaps in our knowledge about their natural characteristics. Thus, this study aimed to understand the relationship between floods, vegetation, and geomorphology in one of the largest on the planet, the Pantanal. The study was based on a time series (1985-2019) of orbital data (images from Landsat 5, 7, and 8 satellites) and climatic data, processed in the cloud on the Google Earth Engine platform. The study highlighted significant differences in the flood pulse of the basin, such as the temporal lag of flooding between the northern and southern portions of the plain. Important environmental changes were observed in some regions following geomorphological processes such as river avulsions. The results of this study emphasize the benefits provided by cloud computing and may contribute to the preservation of the Pantanal.

INTRODUÇÃO

Wetlands (áreas úmidas) são regiões transitórias entre sistemas aquáticos e terrestres, sujeitos a alagamentos sazonais ou permanentes que estão entre os ambientes mais diversificados do planeta (Harris et al., 2005). Tais áreas desempenham papel primordial na deposição e transporte de sedimentos, recarga de aquíferos, armazenamento de carbono, produção pesqueira dentre outros fatores físicos, ecológicos e econômicos (Keddy et al., 2009). Dentre as maiores, o Pantanal possui área de ~150.000 Km² (Padovani, 2010; Figura 1), mundialmente conhecido por suas paisagens únicas e por sua vasta biodiversidade (Harris et al., 2005). A planície apresenta regime sazonal de cheias que causam alagamentos periódicos na região, porém o pulso de inundação, ou onda de cheia, faz com que diferentes áreas apresentem picos de inundação defasados que resultam em distintos ambientes (Junk et al., 1989). O Pantanal compreende um vasto sistema deposicional com planícies aluviais e leques fluviais formados por rios que compõem a bacia hidrográfica do Alto Rio Paraguai (Assine et al., 2015b). Rios erosivos que drenam planaltos sedimentares paleozóicos e dissecam os terrenos pré-cambrianos, alimentam a bacia e tornam-se desconfinados ao alcançar a planície pantaneira, onde os rios adquirem padrão aluvial. Tais características favorecem a sedimentação ao desconfinamento do canal e redução no gradiente topográfico (Assine et al.,

2015c). A diminuição da declividade, a agradação vertical do canal e o aumento no volume de água durante o período chuvoso favorecem o transbordamento dos rios, desencadeando rompimentos laterais (crevasses), que, eventualmente, podem evoluir para avulsões que provocam a mudança completa do canal principal para outra direção (Slingerland & Smith, 2004). A região apresenta grande diversidade fitogeográfica, visto que a área é zona de confluência de vários biomas como o Cerrado, Amazônia, Mata Atlântica e Chaco (Pott & Silva, 2015). A vegetação é fortemente influenciada pelo pulso de inundação, exigindo grande adaptação da biota local, mas que por sua vez também favorece a vasta diversidade existente na região (Evans et al. 2010). As distintas formações vegetacionais estão diretamente relacionadas a formas e processos geomorfológicos. Cordões florestais localmente conhecidos como cordilheiras e áreas florestadas, de formato arredondado, conhecidas como capões, ocorrem em áreas ligeiramente mais elevadas (1 a 2 m) que as planícies adjacentes, normalmente livres de alagamentos e com solos bem drenados (Prance & Schaller, 1982; Pott & Pott, 2004). Áreas permanentemente alagadas tendem a concentrar grande quantidade de macrófitas aquáticas e plantas epífitas que formam "ilhas flutuantes" localmente como "camalotes" quando o substrato é formado por plantas do gênero Eichhornia (aguapé) ou "baceiros" quando o substrato flutuante foi substituído por solo orgânico (Pott & Pott, 2000). Embora as wetlands tenham se tornado ambientes-chave no gerenciamento de água e conservação da vida selvagem, ainda existem lacunas nas informações sobre sua dinâmica ambiental (Melack & Hess, 2004). O sensoriamento remoto por satélite oferece várias vantagens para o monitoramento de seus recursos, especialmente para grandes áreas e regiões de difícil acesso (Ozemi & Bauer, 2007) tendo sido amplamente utilizados para reconhecimento do padrão de inundação de áreas alagadas (ex. Pereira et al., 2021). Atualmente, o Google Earth Engine (GEE) se apresenta como uma nova plataforma baseada no processamento em nuvem, altamente adequada para análise de dados ambientais em escalas locais e planetária, com acesso e processamento rápido de múltiplos dados orbitais de diferentes missões (Gorelick et al., 2017). Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação multi-temporal (1985 - 2019) do pulso de inundação e da relação entre geomorfologia, hidrologia e vegetação utilizando GEE para compreender como a relação entre formas e processos afetam a paisagem.

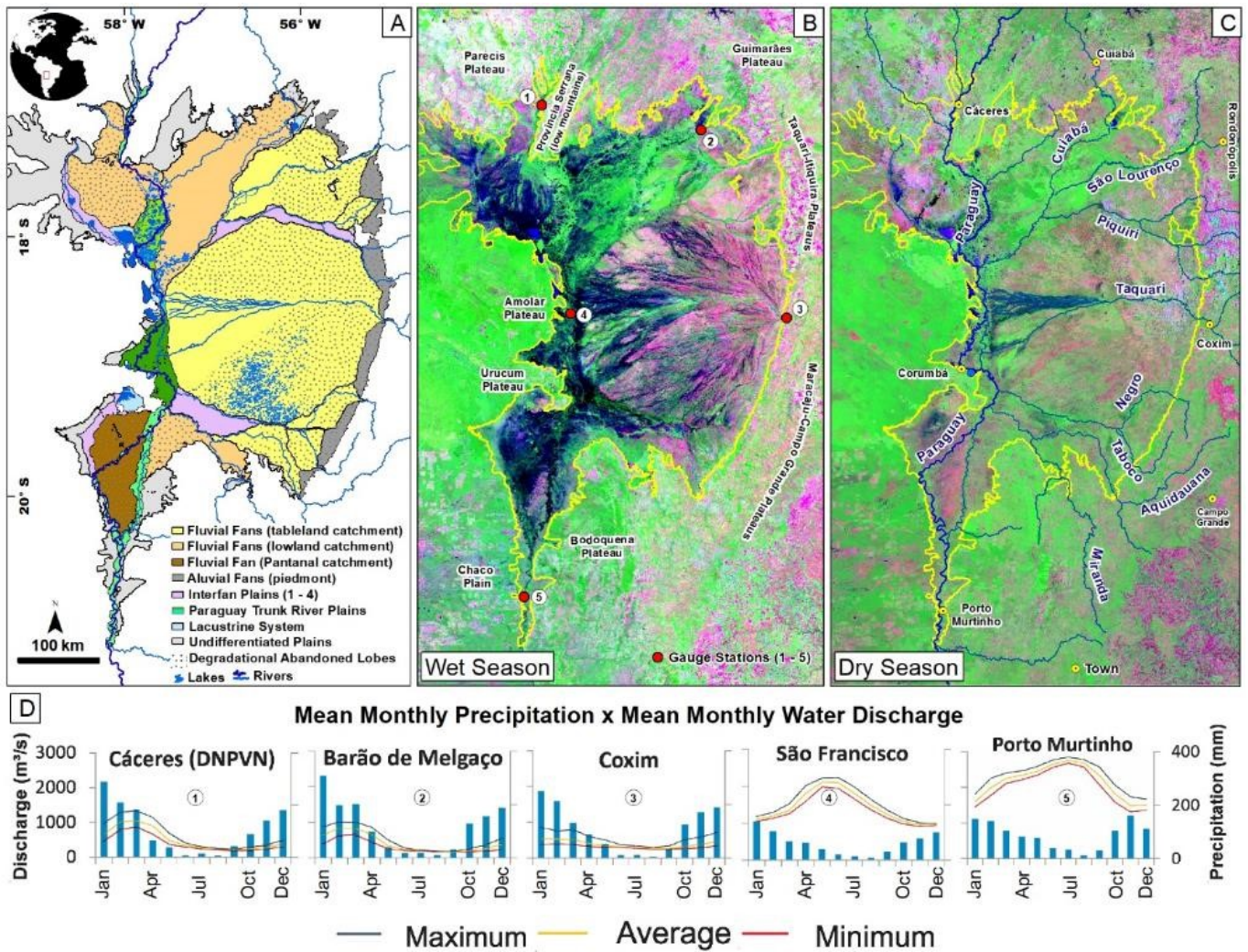
MATERIAL E MÉTODOS

A obtenção dos dados de precipitação, correção e processamento das imagens foram realizadas na plataforma Google Earth Engine (GEE). As imagens dos satélites Landsat 5, 7 e 8 foram analisadas, corrigidas e processadas com base em um código de programação desenvolvido na Linguagem JavaScript. Imagens corrigidas das coleções TOA Reflectance foram processadas para eliminação prévia de pixels com nuvens. Com base nas imagens resultantes foram obtidos índices de água e de vegetação. Para comparação entre os atributos foi utilizado o índice de água "Modification of the normalized difference water index" (MNDWI; Xu, 2006) descrito pela Equação 1 e o índice de vegetação "Two-bands enhanced vegetation index" (EVI2; Jiang, 2008) descrito pela Equação 2: Equação 1: $(Green - SWIR^*) / (Green + SWIR)$ * Shortwave Infrared Equação 2: $2.5 \times (NIR^{**} - Red) \div (NIR + (2.4 \times Red) + 1)$ ** Near Infrared ; Também foi elaborado um código para criação de um mapa de frequência de inundação do Pantanal. Para obtenção do mapa de frequência de inundação é necessário criar limiares para definições de categorias temáticas: "área inundada" e "não inundada". Foram atribuídos valor 1 aos pixels com água ou áreas úmidas e 0 para áreas secas. A frequência de inundação foi calculada pela soma de todas as imagens reclassificadas em uma operação de álgebra de mapas cujo produto final é uma imagem com valores de pixel variando de acordo com o número de imagens processadas, na qual os "end-members" representam ausência total de água durante o período analisado, quando o valor do pixel for igual a 0 e área sempre permanentemente alagada quando o valor atingir a máximo de pixels alagados. Para entender a dinâmica do pulso de inundação, ano hidrológico foi definido com base na análise de climogramas gerados a partir de dados de estações meteorológicas (ex. Figura 1D) e também com dados de modelos climáticos disponíveis no GEE, tal como o CHIRPS (Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations), que forneceu dados de precipitação acumulada mensal em milímetros. Foram definidas quatro estações para compor o ano hidrológico: a) início da estação chuvosa (outubro a dezembro); b) cheia (janeiro - abril); c) vazante (maio - junho); d) seca (julho - setembro).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

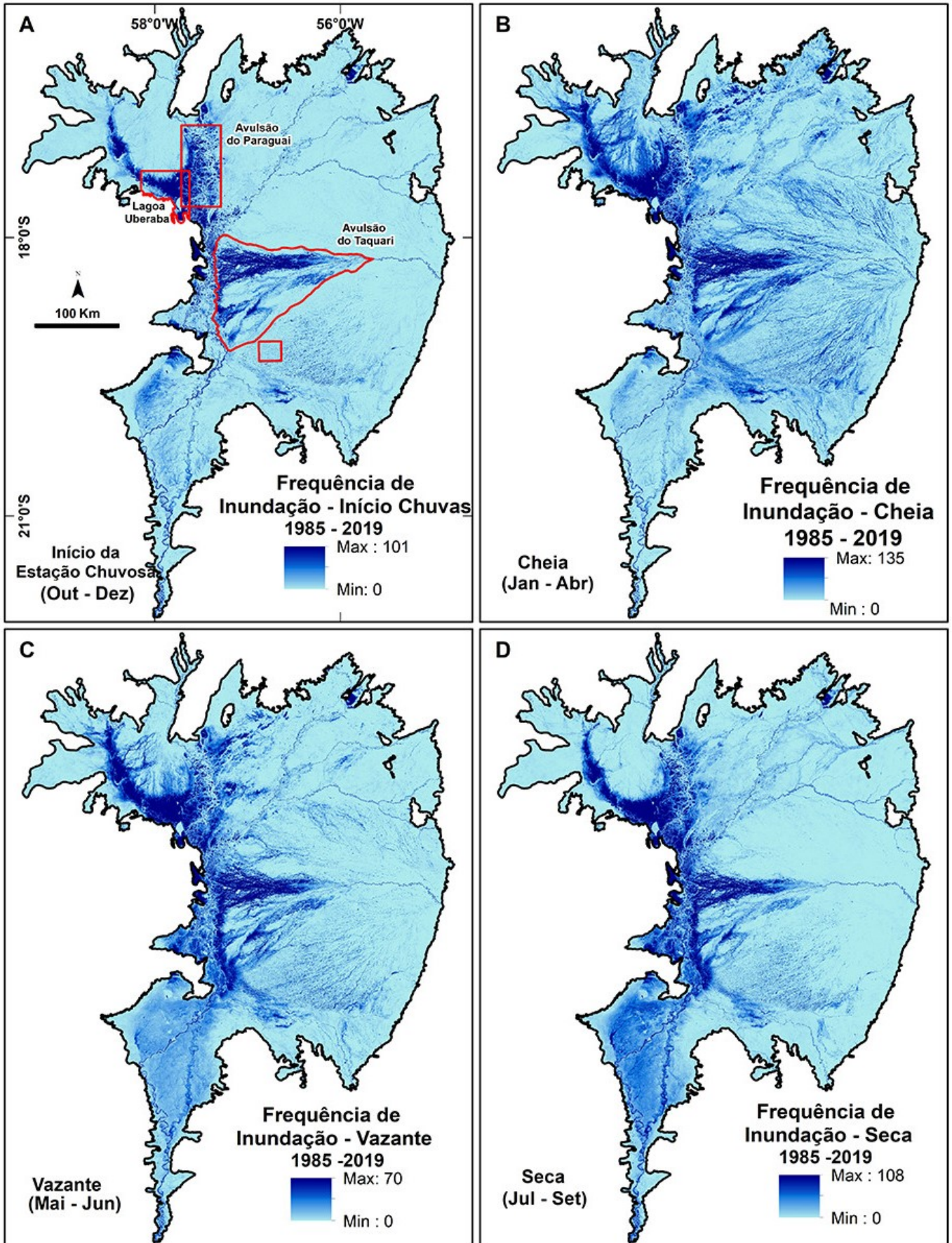
A análise de séries temporais é uma ferramenta poderosa para mapear e analisar variações de curto prazo nas características e dinâmicas da paisagem de áreas úmidas e/ou outros biomas ao redor do mundo (Sakamoto et al., 2007; Hansen et al., 2013; Sagin et al., 2015; Park & Latrubesse, 2017). No entanto, até recentemente, esse tipo de estudo exigia grande quantidade de dados baixados e demandava alta capacidade de processamento computacional, podendo levar muito tempo para análise ou até inviabilizar o estudo. Contudo, com a utilização do Google Earth Engine tornou-se possível e acessível a análise de grandes áreas tal como o Pantanal. O presente trabalho processou todas as imagens disponíveis dos satélites Landsat 5, 7 e 8 entre 1985 e 2019 possibilitando a geração de um mapa de frequência de inundação para toda a bacia do Pantanal. Desta etapa foram gerados três produtos distintos para a frequência de inundação da bacia: um mapa para todo período analisado (1985 -2019), um mapa mensal (ex. todos os meses de janeiro de 1985 até 2019) e um mapa para cada estação do ano hidrológico (1985 - 2019). No presente trabalho será apenas apresentado o mapa das estações (Figura 2) uma vez que foi o que melhor caracterizou o pulso de inundação do Pantanal. No início da estação das chuvas a planície pantaneira está praticamente seca (Figura 2A), água superficial ocorre apenas nas regiões permanentemente alagadas, tais como na região da avulsão do rio Taquari e em regiões ao longo da planície do Paraguai. Os maiores picos de precipitação ocorrem principalmente entre janeiro e março, período em que o Pantanal atinge seu máximo alagamento (Figura 2B). Contudo, os maiores índices de alagamentos ocorrem nas porções norte e central da bacia. A partir de junho, período da vazante (Figura 2C), ocorre grande diminuição no volume de chuvas e as águas passam a se concentrar mais nas proximidades da planície do rio Paraguai. Nessa região ocorrem gargalos geomorfológicos que provocam uma grande concentração de água (Assine et al., 2015). O fator mais interessante do pulso de inundação pantaneiro é que já durante o período da seca, quando praticamente já não há precipitação ao longo da bacia, é que ocorre a máxima inundação do extremo sul da bacia, região conhecida como Nabileque. Esse atraso no pulso de inundação decorre do baixo gradiente topográfico da bacia que provoca um atraso de até quatro meses entre o máximo alagamento das regiões norte e sul (Assine et al., 2015). Wetlands englobam diferentes tipos de ambientes com variações em componentes naturais como hidrologia, dinâmica de inundação, solos e vegetação, e requerem abordagens especiais para avaliar a natureza de mudanças de curto e longo prazo, principalmente devido à alta variabilidade em flutuações de inundações (Finlayson & van der Valk, 1995; Prigent et al., 2001; Dronova et al., 2015). Selecionamos três áreas para demonstrar a relação entre água e vegetação (Figura 3). Foram analisadas mudanças ambientais bem documentadas, como avulsões de rios (ex. Assine, 2005; Assine et al., 2015c) e sucessão ecológica de diferentes tipos de vegetação em ambientes aquáticos (ex. Lo et al., 2017). No exemplo da avulsão em curso no rio Paraguai nota-se que ocorreu um aumento das taxas de EVI2 e uma diminuição do MNDWI. O desvio de parte da vazão da calha principal do Rio Paraguai neste trecho pode ter provocado uma diminuição geral nas taxas de transbordamento e alagamento da área, fazendo com que ocorresse uma maior colonização por espécies arbustivas e arbóreas explicando assim a variação dos índices. Já no caso da avulsão do rio Taquari ocorreu o inverso, aumento do MNDWI e diminuição do EVI2. Isso ocorreu pois, com avulsão ocorrida no lobo atual do megaleque uma grande área antes colonizada principalmente por espécies arbóreas tornou-se permanentemente alagada. Tal fato resultou numa grande mortandade de árvores e ficou refletido no índice de vegetação que ficou zerado a partir da avulsão ocorrida no início da década de 90. Por fim a mudança na dinâmica entre os índices de água e vegetação na região da Lagoa Uberaba está relacionada ao fato que a lâmina d'água da lagoa vem sendo gradualmente coberta por macrófitas aquáticas. Lo et al., (2017) destacam que ao longo das últimas três décadas, a área do lago diminuiu em cerca de 21,4%. Isso demonstra a rápida taxa de sucessão ecológica aquático-terrestre que pode mudar radicalmente a configuração da bacia ao longo do tempo.

Figura 1



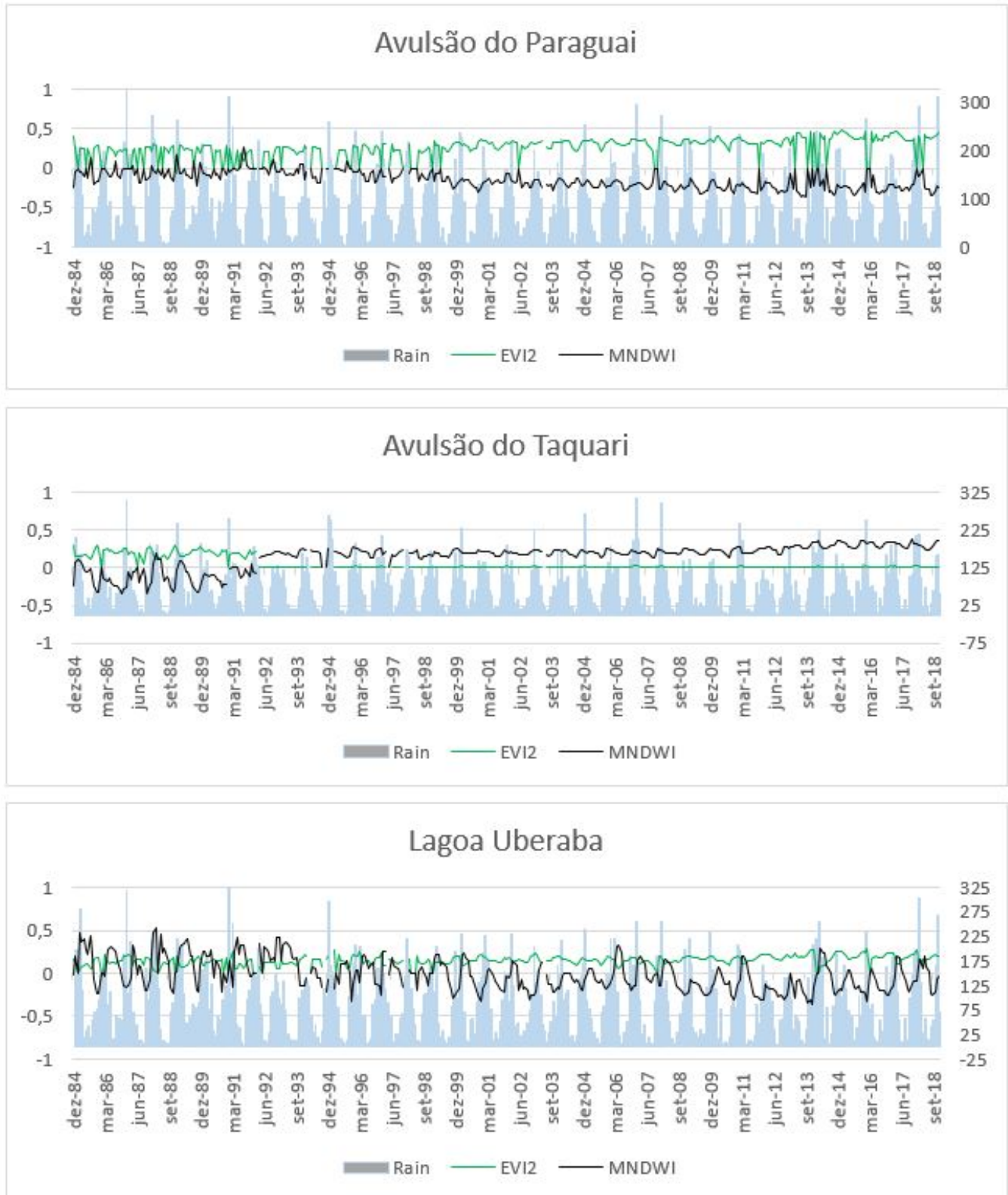
Bacia do Pantanal, sistemas deposicionais e estações cheia e seca (baseado em Merino & Assine, 2019)

Figura 2



Pulso de inundação do Pantanal por período hidrológico.

Figura 3



Gráficos da relação entre os índices de água e de vegetação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho ofereceu uma visão holística da dinâmica de inundação do Pantanal e como as características geomorfológicas e hidrológicas altamente complexas da bacia afetam a paisagem. Tal detalhamento só foi possível devido à funcionalidade da plataforma Google Earth Engine. Apesar de seu baixo gradiente topográfico e formas de relevo basicamente planas, os processos geomorfológicos são dinâmicos e criam diferentes unidades de paisagem onde a cobertura vegetal é diretamente afetada por inundações sazonais. O mapa de frequência de inundação destacou claramente a dinâmica do pulso de inundação, principalmente o atraso de alagamento da região sul em relação ao norte da planície. Nossos resultados destacam mudanças notáveis de importantes regiões, que alteraram o curso de importantes rios da Bacia do Pantanal. O trabalho fornece insights que podem ser aplicados em outras áreas alagáveis ao redor do mundo, ainda mais com o advento do processamento em nuvem. Além disso, esperamos que os resultados aqui apresentados possam contribuir para os esforços de compreensão e preservação de uma das maiores e mais importantes áreas úmidas do planeta.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), sob o número de concessão # 2016/14227-5" e pela bolsa de pós-doutorado concedida para ERM processo #2017/26318-8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Assine, M.L., Merino, E.R., Pupim, F.d.N., Macedo, H.d.A., Santos, M.G.M.d., 2015a. The Quaternary alluvial systems tract of the Pantanal Basin, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 45(3), 475-489. <http://dx.doi.org/10.1590/2317-4889201520150014>.
- Assine, M., Merino, E., Pupim, F., Warren, L., Guerreiro, R., McGlue, M., 2015b. Geology and Geomorphology of the Pantanal Basin. *The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 1-28. 10.1007/698_2015_349. https://doi.org/10.1007/698_2015_349.
- Assine, M., Macedo, H., Stevaux, J., Bergier, I., Padovani, C., Silva, A., 2015c. Avulsive Rivers in the Hydrology of the Pantanal Wetland. In: I. Bergier, M.L. Assine (Eds.), *Dynamics of the Pantanal Wetland in South America. The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer International Publishing, pp. 83-110. 10.1007/698_2015_351. https://doi.org/10.1007/698_2015_351.
- Assine, M.L., 2005. River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal wetland, Brazil. *Geomorphology*, 70(3-4), 357-371. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.013>.
- Dronova, I., Gong, P., Wang, L., Zhong, L., 2015. Mapping dynamic cover types in a large seasonally flooded wetland using extended principal component analysis and object-based classification. *Remote Sensing of Environment*, 158(0), 193-206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.027>.
- Evans, T.L., Costa, M., 2013. Landcover classification of the Lower Nhecolândia subregion of the Brazilian Pantanal Wetlands using ALOS/PALSAR, RADARSAT-2 and ENVISAT/ASAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 128(0), 118-137. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.022>.
- Finlayson, C.M., van der Valk, A.G., 1995. Wetland classification and inventory: A summary. *Vegetatio*, 118(1-2), 185-192. <https://doi.org/10.1007/bf00045199>.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Hamilton, S., Sippel, S., Melack, J., 1996. Inundation patterns in the Pantanal wetland of South America determined from passive microwave remote sensing. *Archiv für Hydrobiologie*, 137(1), 1-23.
- Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O., Townshend, J.R.G., 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>.
- Harris, M.B., Tomas, W., Mourão, G., Da Silva, C.J., Guimarães, E., Sonoda, F., Fachim, E., 2005. Safeguarding the Pantanal Wetlands: Threats and Conservation Initiatives. *Protegiendo a los Humedales del Pantanal: Amenazas e Iniciativas de Conservación. Conservation Biology*, 19(3), 714-720. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00708.x>.
- Jiang Z, Huete AR, Didan K, Miura T. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index

- without a blue band. *Remote Sensing of Environment* 112: 3833-3845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>
- Junk, J.W., Bayley, P.B., Sparks, R.E., 1989. The flood pulse concept in river floodplain systems. *Canadian Special Publications of Fisheries and Aquatic Sciences*, 106, 110-127.
- Keddy, P.A., Fraser, L.H., Solomeshch, A.I., Junk, W.J., Campbell, D.R., Arroyo, M.T., Alho, C.J., 2009. Wet and wonderful: the world's largest wetlands are conservation priorities. *BioScience*, 59(1), 39-51. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.1.8> .
- Lo EL, Silva A, Bergier I, McGlue MM, de Paula Silva BL, Silva APS, Pereira LE, de Azevedo Macedo H, Assine ML, da SILVA ERdS. 2017. Spatiotemporal evolution of the margins of Lake Uberaba, Pantanal floodplain (Brazil). *GEOGRAFIA* 42: 159-173
- Melack, J.M., Hess, L.L., 2004. Remote sensing of wetlands on a global scale. *Book Reviews*, 8, 9.
- Merino ER, Assine ML. Hidden in plain sight: how finding a lake in the Brazilian Pantanal improves understanding of wetland hydrogeomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* n/a. DOI: 10.1002/esp.4745
- Ozemi, S., Bauer, M., 2002. Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, 10(5), 381-402. <https://doi.org/10.1023/a:1020908432489>.
- Padovani, C.R., 2010. Dinâmica das Inundações do Pantanal. Doutorado, Universidade de São Paulo/ESALQ, Piracicaba - SP, 174 pp.
- Park, E., Latrubesse, E.M., 2014. Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 147, 232-242. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.013>.
- Pereira G, Ramos RdC, Rocha LC, Brunzell NA, Merino ER, Mataveli GAV, Cardozo FdS. Rainfall patterns and geomorphological controls driving inundation frequency in tropical wetlands: How does the Pantanal flood? *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 0: 0309133320987719. DOI: 10.1177/0309133320987719
- Pott, A., da Silva, J.S.V., 2015. Terrestrial and Aquatic Vegetation Diversity of the Pantanal Wetland. In: I. Bergier, M.L. Assine (Eds.), *Dynamics of the Pantanal Wetland in South America*. Springer International Publishing, Cham, pp. 111-131. https://doi.org/10.1007/698_2015_352.
- Pott, A., Pott, V.J., 2004. Features and conservation of the Brazilian Pantanal wetland. *Wetlands Ecology and Management*, 12(6), 547-552. <https://doi.org/10.1007/s11273-005-1754-1>.
- Prance, G.T., Schaller, G.B., 1982. Preliminary study of some vegetation types of the Pantanal, Mato Grosso, Brazil. *Brittonia*, 34(2), 228-251. <https://doi.org/10.2307/2806383>.
- Prigent, C., Matthews, E., Aires, F., Rossow, W.B., 2001. Remote sensing of global wetland dynamics with multiple satellite data sets. *Geophysical Research Letters*, 28(24), 4631-4634. <https://doi.org/10.1029/2001gl013263>.
- Sagin, J., Sizo, A., Wheeler, H., Jardine, T.D., Lindenschmidt, K.-E., 2015. A water coverage extraction approach to track inundation in the Saskatchewan River Delta, Canada. *International Journal of Remote Sensing*, 36(3), 764-781. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.1001084>.
- Sakamoto, T., Van Nguyen, N., Kotera, A., Ohno, H., Ishitsuka, N., Yokozawa, M., 2007. Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery. *Remote Sensing of Environment*, 109(3), 295-313. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.011>.
- Xu, H., 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.