



Dinâmica espaço-temporal de pulsos de inundações nas Áreas Úmidas do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, sul do Brasil

Dinámica espacio-temporal de pulsos de inundaciones en humedales de Parque Nacional da Lagoa do Peixe, sur de Brasil

Spatio-temporal Dynamics of Flood Pulses in Wetlands of the Lagoa do Peixe National Park, South of Brazil

Historial del Artículo

Recibido:

16 de agosto de 2023

Revisado:

28 de noviembre de 2023

Aceptado:

14 de diciembre de 2023

Carina Cristiane Korb^a, Laurindo Guasselli^b, Tássia Fraga-Belloli^c, Christian Santana-Cunha^d

^aFiliación: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Correo: carinac.korb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9954-2043>

^bFiliación: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Correo: laurindo.guasselli@ufrgs.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8300-846X>

^cFiliación: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (UFRGS/CEPSRM). Correo: tassiabelloli@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6365-7796>

^dFiliación: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (UFRGS/CEPSRM). Correo: christhianscunha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0755-6760>

Palavras-chave

Diferença de Água Normalizada Modificado, eventos extremos, hidrogeomorfologia, lagoas costeiras, sensoriamento remoto

RESUMO

Os pulsos de inundação são responsáveis pelos processos e conectividades ecológicas em Áreas Úmidas, e um dos principais processos hidrogeomorfológicos ocorrentes nestes ecossistemas. O Parque Nacional da Lagoa do Peixe, situado na área costeira do extremo sul do Brasil, tem banhados, lagoas e marismas característicos das Áreas Úmidas. Os pulsos de inundação são previsíveis, polimodais, dependentes do regime de precipitação e sofrem influência de eventos associados à variabilidade climática (El Niño Oscilação Sul e Modo Anular do Hemisfério Sul). O objetivo deste trabalho é analisar a variação espaço-temporal dos pulsos de inundação das Áreas Úmidas do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, a partir da variabilidade da precipitação e dados de sensoriamento remoto. Para isso estruturamos o trabalho em duas etapas: (i) escolha das imagens de satélite e identificação dos pulsos de inundação, entre 1987 e 2023, contemplando eventos de El Niño, La Niña e Neutro, e (ii) mapeamento das áreas alagadas utilizando imagens de Índice de Diferença de Água Normalizada Modificado. Os resultados mostram a influência de El Niño Oscilação Sul e Modo Anular do Hemisfério Sul nos pulsos de inundação, com maiores áreas alagadas na primavera (2013, 2015, 1998, 1987), em ano de El Niño e em ano Neutro. Em eventos de estiagem, associados a La Niña (2023), normalmente no verão, ocorre a quase total ausência de lâmina de água no sistema lagunar.

Palabras clave

Diferencia de Agua Normalizado Modificado, eventos extremos, hidrogeomorfología, lagunas costeras, teledetección

RESUMEN

Los pulsos de inundaciones son responsables de los procesos ecológicos y de la conectividad en los Humedales, y uno de los principales procesos hidrogeomorfológicos que ocurren en estos ecosistemas. El Parque Nacional da Lagoa do Peixe, situado en la zona costera del extremo sur de Brasil, posee marismas, lagunas y bañados característicos de los Humedales. Los pulsos de inundación son predecibles, polimodales, dependientes del régimen de precipitaciones y están influenciados por eventos asociados a la variabilidad climática (El Niño Oscilación del Sur y Modo Anular del Hemisferio Sur). El objetivo de este trabajo es analizar la variación espacio-temporal de pulsos de inundaciones en los Humedales del Parque Nacional da Lagoa do Peixe, a partir de la variabilidad pluviométrica y de datos de teledetección. Para ello, estructuramos el trabajo en dos etapas: (i) selección de imágenes de satélite e identificación de los pulsos de inundación entre 1987 y 2023, teniendo en cuenta los eventos El Niño, La Niña y Neutro, y (ii) cartografía de las áreas inundadas utilizando imágenes de Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado. Los resultados muestran la influencia de El Niño Oscilación del Sur y el Modo Anular del Hemisferio Sur en los pulsos de inundación, con mayores áreas inundadas en primavera (2013, 2015, 1998, 1987), en un año El Niño y en un año Neutro. En los eventos de sequía asociados a La Niña (2023), generalmente en verano, hay una ausencia casi total de agua en el sistema lagunar.

Keywords

Modified Normalized Difference Water Index, extreme events, hydrogeomorphology, coastal lagoons, remote sensing

ABSTRACT

Flood pulses are responsible for ecological processes and connectivity in Wetlands, and are one of the main hydrogeomorphological processes occurring in these ecosystems. The Lagoa do Peixe National Park, located in the coastal area of the extreme south of Brazil, has marshes, lagoons, and salt marshes characteristic of the Wetlands. Flood pulses are predictable, polymodal, dependent on the precipitation regime, and are influenced by events associated with climate variability (El Niño Southern Oscillation and Southern Hemisphere Annular Mode). The aim of this work is to analyze the spatio-temporal variation of flood pulses in the Wetlands of the Lagoa do Peixe National Park, based on the variability of precipitation and remote sensing data. To this end, we structured the work in two stages: (i) choice of satellite images and identification of flood pulses, between 1987 and 2023, contemplating El Niño, La Niña, and Neutral events; (ii) mapping of flooded areas using Modified Normalized Difference Water Index images. The results show the influence of El Niño Southern Oscillation and Southern Hemisphere Annular Mod on flood pulses, with greater flooded areas in spring (2013, 2015, 1998, 1987), El Niño and Neutral year. In drought events, associated with La Niña (2023), usually in the summer, there is an almost total absence of water depth in the lagoon system.

Introdução

Os pulsos de inundação em banhados, marismas e lagoas, decorrentes de inundações sazonais (Simioni, 2017), são característicos da oscilação dos níveis de água em Áreas Úmidas (AUs) e descrevem a sua estrutura e funcionamento. É a força dominante dos processos ecológicos que nelas ocorrem (Ricaurte et al., 2019) e um dos principais processos hidrogeomorfológicos que atuam sobre essas paisagens (Goerl et al., 2012; He et al., 2023; Oliveira, 2021).

Os processos hidrogeomorfológicos ocorrem em função das características hidrológicas e geomorfológicas, que interagem entre si. Essas interações constituem as AUs como paisagens resultantes do processo hidrogeomorfológico reconhecido como pulsos de inundação, como várias classificações e abordagens permitem este entendimento (Brinson, 1993; Lisenby et al., 2019; Oliveira, 2021; Semeniuk e Semeniuk, 1995).

As mudanças climáticas podem ser uma grande ameaça às AUs (Salimi et al., 2021), e podem resultar em uma perda esperada de 20% das AUs costeiras nas décadas futuras (Nicholls, 2004; Rapinel et al., 2023). Em escala global, Ilyas et al. (2019) destacam o relacionamento entre os episódios de acoplamento de El Niño e La Niña com as variações globais de inundação, de diferentes classes de lagos globais e AUs. Os eventos do El Niño estão associados a um aumento na extensão da inundação superficial dos corpos de água e alterações no comportamento dos pulsos de inundações das AUs globais (Barros e Albernaz, 2014; Zhu et al., 2017). Ocasionalmente impactos significativos na dinâmica das AUs, nas suas funções hidrológicas e ecossistêmicas (Ilyas et al., 2019) devido às mudanças nos padrões de precipitação (Rossi e Soares, 2017), que por sua vez podem modificar a estrutura e função destes ambientes (He et al., 2023).

No entanto, os pulsos de inundação são importantes ao estabelecer a conectividade entre diferentes ambientes de AUs, permitir trocas ambientais e a preservação dos seus serviços ecossistêmicos, formando extensas áreas inundadas. Na literatura, o termo conectividade aparece como conectividade ecológica em relação às interações e movimentos de água, sedimentos, nutrientes, resíduos e organismos vivos (Amoros e Roux, 1988; Ward e Stanford, 1995); conectividade hidrológica (Pringle, 2003); conectividade hidrodinâmica entre ambientes inundáveis (Rocha e Rocha, 2007) e conectividade entre fragmentos de AUs e planícies de inundação (Simioni et al., 2017). A alternância entre períodos com e sem água superficial

tem um papel significativo na resiliência ecológica das AUs (Sheldon et al., 2010) e na capacidade do ecossistema de restaurar funções ecológicas saudáveis, complexidade, diversidade e processos após uma interrupção (Moomaw et al., 2018). Entretanto, poucas abordagens metodológicas (Lu et al., 2015; Rapport et al., 1985; Sun et al., 2017) adotam a dinâmica dos pulsos de inundação como indicador hidrogeomorfológico da integridade destes ecossistemas para avaliar a saúde ecológica das AUs.

Desse modo, a análise espaço-temporal das variações dos pulsos de inundação pode ser um indicador hidrogeomorfológico consistente e importante a ser considerado na preservação da sua saúde ecológica (Das e Basu, 2020; Ekumah et al., 2020; Singh e Sinha, 2021; Yang et al., 2021). Normalmente, índices de água são adotados apenas para delimitar as AUs (Paul e Pal, 2020; Singh e Sinha, 2021), e não para compreender o seu comportamento e como estes pulsos podem impactar a dinâmica das macrófitas, da matéria orgânica, da produtividade e de outros atributos funcionais.

No Parque Nacional da Lagoa do Peixe os pulsos de inundação são semelhantes aos processos hidrogeomorfológicos em ambientes fluviais. Cunha et al. (2015) propõem o uso desse termo em ambientes costeiros, adotado por Garcia et al. (2017) na Lagoa do Peixe. Sendo uma AU de zona costeira, os pulsos nesses ambientes são previsíveis e polimodais (Cunha et al., 2015). O Parque Nacional da Lagoa do Peixe, na porção central da planície costeira do Rio Grande do Sul, no extremo sul do Brasil, apresenta uma variedade de ecossistemas frágeis como campos de dunas, matas de restinga, e tipologias de Aus, como banhados, marismas, e lagoas de água doce e salobra (Knak, 1999), importantes para aves migratórias dos hemisférios norte e sul (BirdLife International, 2023; MMA, 2008).

Garcia et al. (2017) destacam a importância dos pulsos hidrológicos na Lagoa do Peixe, na conectividade trófica entre compartimentos marinho, estuarino e doce dos ecossistemas do Parque Nacional da Lagoa do Peixe. De acordo com Arejano (2006), Portz et al. (2011) e Schossler (2016), os pulsos de inundações nas AUs do Parque, condicionados, principalmente, ao regime de precipitação, podem sofrer influência de eventos associados à variabilidade climática, como El Niño Oscilação Sul (ENOS) e Modo Anular do Hemisfério Sul (SAM), alternando períodos com e sem água superficial.

Existe um canal que conecta a Lagoa do Peixe ao oceano de forma intermitente. Sua oclusão ocorre naturalmente devido à dinâmica de ventos, precipitação e deriva de

sedimentos e, quando fechado, armazena água doce sustentado pela precipitação (Garcia et al., 2017; Schossler, 2016). Altos índices pluviométricos, porém, podem impedir a sua oclusão, devido a forte vazão continental, não permitindo a deposição de sedimentos na foz da laguna (Sbruzzi et al., 2015), mantendo-a conectada ao oceano.

Neste contexto, como problema de pesquisa este trabalho propõe entender: quais são as características dos pulsos de inundação das AUs do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, frente às variabilidades climáticas e às características geológico-geomorfológicas? Desta forma, adota a hipótese de que é possível a partir de séries históricas de precipitação e de imagens de satélite estabelecer padrões espaciais de inundações das AUs.

Assim, este artigo tem como objetivo analisar a variação espaço-temporal dos pulsos de inundação das AUs do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, a partir da análise da variabilidade da precipitação e dados de sensoriamento remoto.

Materiais e métodos

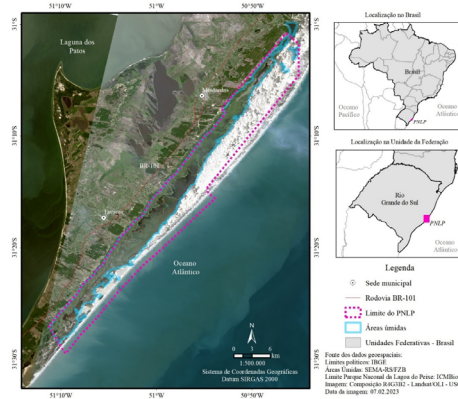
Área de estudo

O Parque Nacional da Lagoa do Peixe abrange os municípios de Tavares e Mostardas numa estreita faixa de terras que separa a Lagoa dos Patos do oceano Atlântico, conhecida como Restinga da Lagoa dos Patos. Possui uma área de 36.721,71 ha, 35 km de extensão, largura média de um quilômetro e profundidade aproximada de 30 cm, sem tributários, e com um canal intermitente junto ao oceano Atlântico. As AUs do parque estão representadas pelos banhados, marismas, e pelas Lagoas do Peixe, Pai João e Veiana (Figuras 1, 2). A Lagoa do Peixe é uma laguna de zona costeira, que se comunica com o oceano Atlântico através de um canal (Sbruzzi et al., 2015; Tomazelli e Villwock, 1991).

Foi criado através do Decreto 93.546 (Presidência da República, 1986), com objetivo de proteger ecossistemas litorâneos da região da Lagoa do Peixe, e particularmente, as AUs e as aves migratórias. É uma Unidade de Conservação de Proteção Integral e compõe a Rede Hemisférica de Reservas para Aves Limícolas como Sítio de Importância Internacional; é reconhecido como Sítio Ramsar desde 1993, e faz parte da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica no Rio Grande do Sul.

Análises de campo da geologia da Lagoa do Peixe revelam que sua lâmina d'água se manteve relativamente rasa,

Figura 1. Localização da área de estudo e composição R4G3B2 de imagem Landsat/OLI de 07/02/2023



Fonte: elaboração própria com base em SEMA-RS/FZB (2006), ICMBio (2023), IBGE (2022) e USGS (2023).

Figura 2. Vista aérea e características da vegetação das AUs no Parque Nacional da Lagoa do Peixe: (A) Lagoa do Peixe e trilha do Talhamar; (B) canal da Lagoa do Peixe; (C) desobstrução do canal da barra Lagoa do Peixe, julho de 2023; (D) transição entre a mata nativa (paleofalésia barreira III) e campos úmidos (terraço lagunar I) e pântano do trilha do Talhamar, e (E) vegetação de banhado (terraço lagunar II)

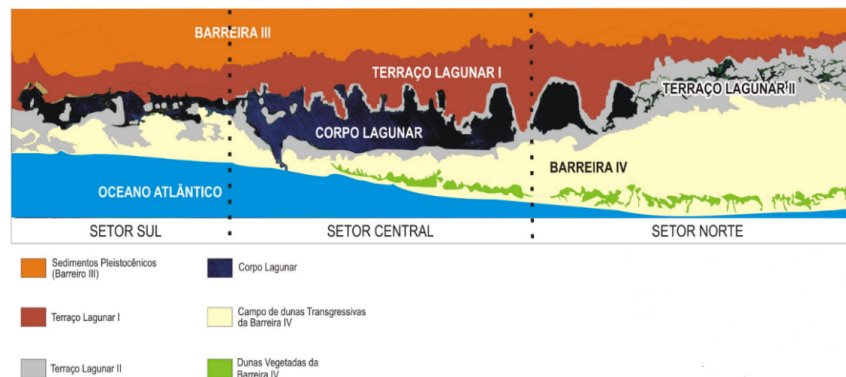


Fotos: Fanpage do Parque Nacional da Lagoa do Peixe (s.f.).

porém, bastante variável, na dependência de variações climáticas e/ou flutuações do nível do mar. Em determinados períodos a lagoa secou, total ou parcialmente, expondo seu fundo lagunar. A paisagem atual mostra o corpo lagunar praticamente restrito ao setor central do sistema, o que permite projetar, para o futuro, o desaparecimento total do sistema lagunar (Arejano, 2006).

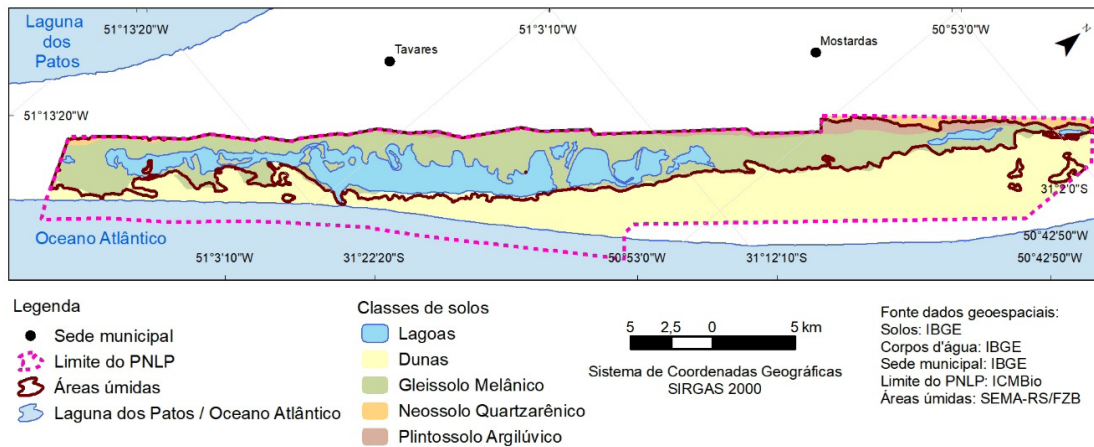
A formação geológica remonta aos episódios transgressivo-regressivos do Quaternário (Tomazelli e Villwock, 2000).

Figura 3. Formas geomorfológicas do Parque Nacional da Lagoa do Peixe



Fonte: Arejano (2006).

Figura 4. Classes de solo do Parque Nacional da Lagoa do Peixe



Fonte: elaboração própria com base em IBGE (2022).

Três formas geomorfológicas são encontradas no parque, além dos corpos lagunares: a paleofalésia da barreira III; o terraço lagunar I e o terraço lagunar II, onde se encontram os terrenos formados pelas AUs, sujeitos aos pulsos de inundação (Arejano, 2006) (Figura 3).

Ocorrem três classes de solos, Plintossolo Argilúvico, Neossolo Quartzarênico e, em maior expressão, Gleissolo Melânico (Figura 4). Os Gleissolos Melânicos são solos minerais, hidromórficos, desenvolvidos de sedimentos recentes não consolidados, de constituição argilosa, argilo-arenosa e arenosa, do período do Holoceno (Streck et al., 2008), na área do Parque Nacional da Lagoa do Peixe ocupam os terraços lagunares I e II.

O clima é subtropical II (Rossato, 2011), classificado como medianamente úmido, com temperatura média anual

entre 17° e 20° C e regime de chuvas entre 1.500 e 1.700 mm. O volume de chuvas na região está condicionado principalmente a chuvas frontais, originadas do encontro das massas de ar Tropical marítima (mT) e Polar marítima (mP). Ademais, sofre influência de anomalias de precipitação associadas a fenômenos de variabilidade climática El Niño Oscilação Sul (ENOS) e Modo Anular do Hemisfério Sul (SAM) que podem se correlacionar (Reboita et al., 2009; Schossler, 2016). Em anos de El Niño ocorrem chuvas acima da normal climatológica (NC), enquanto desvios negativos ocorrem em La Niña (Britto et al., 2008; Fontana e Berlato, 1997; Rodrigues, 2015; Sbruzzi et al., 2015). A atividade SAM produz forte modulação do sinal do ENOS, da precipitação, do aumento da temperatura do ar (Grimm, 2009; Grimm et al., 1998, 2000), e exerce maior influência nas anomalias de precipitação na primavera, incrementando as chuvas quando El Niño se encontra

ativo. A influência do SAM no verão reduz as chuvas e o El Niño não se mostra muito intenso, porém, intensifica La Niña (Schossler, 2016). Distintamente do período de El Niño, em condições de La Niña se observa a redução quase total da lâmina d'água da lagoa.

Dados e procedimentos

Para atingir o objetivo proposto foi utilizado o mapeamento das AUs elaborado por Ramos et al. (2015) da Fundação Zoobotânica do Rio Grande do Sul. Para a delimitação das Lagoas do Peixe, Veiana e Pai João foi adotada a Base Cartográfica do Rio Grande do Sul, na escala 1:25.000 - BCRS25, de 2018, da Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA-RS, 2006). Para o Modelo Digital de Elevação foi adotado o Forest And Buildings Removed Copernicus DEM (FABDEM) disponibilizado pela University of Bristol (2023).

Imagens de satélite e identificação dos pulsos de inundação

Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5 Thematic Mapper (TM) e Landsat 8 OLI disponibilizadas na plataforma Earth Explorer pela United States Geological Survey (USGS, 2023), órbita-ponto 221-81 e 221-82, que abrangem a área do Parque Nacional da Lagoa do Peixe.

Assim, foi analisado o período entre 01/01/1987 e 28/02/2023, para caracterizar a dinâmica dos pulsos de inundações e secas, em relação a eventos de El Niño, La Niña e ano Neutro do Centro de Previsão Climática da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2023a).

Para analisar a influência da variabilidade da precipitação sobre padrões de inundação e seca, foram utilizados dados médios mensais, anuais e sazonais. Devido a inexistência de uma série de dados completa nas estações próximas ao Parque Nacional da Lagoa do Peixe, foi adotada a série histórica de precipitação do produto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS), utilizando estruturas de códigos em linguagem Javascript na plataforma Code Editor do Google Earth Engine (GEE). O CHIRPS tem resolução espacial de 0,05°, ou aproximadamente 5 km, próximo ao Equador, cobertura geográfica de 50°S a 50°N, dados de 1981 até os dias atuais. Disponível em conjuntos de dados diários, em pântadas e dados mensais, em UCSB¹ em formato NetCDF, GeoTiff e Esri BIL.

Segundo Costa et al. (2019) os dados de precipitação do CHIRPS para o Brasil, apresentam correlação linear alta entre dados do Instituto Nacional de Meteorologia, o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INMET/CPTEC) e CHIRPS (95,4 %), com correlação linear média entre os dados de 97%.

Mapeamento das áreas de inundação

Dentre as diversas abordagens para o mapeamento e monitoramento das AUs, os índices espectrais são simples e podem ser amplamente aplicados (Govaerts e Verhulst, 2010). O índice Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), com uma modificação do NDWI proposta por Xu (2006), substitui a banda do infravermelho próximo pela banda do infravermelho médio. O MNDWI tem sido o índice de água mais utilizado em análises para extração de corpos d'água (Deng et al., 2020). A aplicação dos dados derivados do Landsat TM 5 está apresentada na equação 1) e dos dados do Landsat 8 OLI na equação 2.

Cálculo do MNDWI com imagens do satélite Landsat 5, Equação 1

$$\text{MNDWI} = \frac{(B2 - B4)}{(B2 + B4)}$$

Em que: B2 é a banda do verde; B4 do infravermelho próximo.

Cálculo do MNDWI com imagens do Satélite Landsat 8, Equação 2

$$\text{MNDWI} = \frac{(B3 - B6)}{(B3 + B6)}$$

Em que: B3 é a banda do verde; B6 do infravermelho médio.

O processamento e análises das imagens foram realizadas no software ArcGIS 10.3. O índice MNDWI, que varia entre -1 e +1, foi gerado por meio da álgebra de mapas, disponível na ferramenta Spatial Analyst Tools.

Os índices são apresentados em duas classes: Não água (inclui valores de -1 a 0) e Água (inclui valores de 0 a +1), classificados através do método de seleção manual, no ajuste de simbologias do Layer.

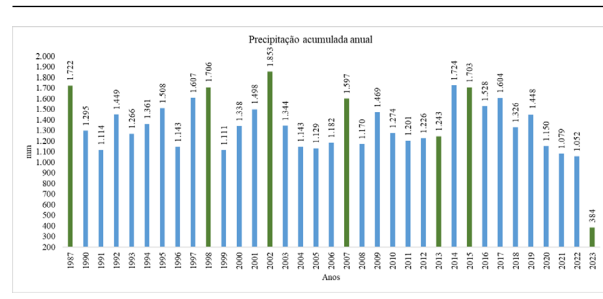
¹ <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>

Resultados

Os pulsos de inundação com influência de El Niño (+) / SAM (+ -) foram representados pelos anos com maior precipitação acumulada em 1987, 1998, 2007 e 2015, dentre os anos de influência do fenômeno. Os eventos de seca com influência de La Niña / SAM (+) pelo ano de menor precipitação acumulada foram em 2023 e os anos Neutros / SAM (+ -), em 2002 e 2013 (Figura 5). A Tabela 1 representa as estações da primavera e do verão, com registros de ocorrência de eventos anômalos no Parque Nacional da Lagoa do Peixe (Shossler, 2016).

As maiores áreas alagadas, relativas aos pulsos de inundação, ocorreram na estação da primavera, nos anos de 2013 Neutro / SAM (-); 2015 El Niño / SAM (+); 1998 El Niño / SAM (+); 1987 El Niño / SAM (-), respectivamente. Áreas de menor variação de inundação corresponderam às imagens de 2002 Neutro / SAM (+) e 2007 El Niño / SAM (-). As maiores diferenças na relação entre área alagada e precipitação acumulada nos três meses anteriores à

Figura 5. Precipitação acumulada anual entre 1987 e 2023



As barras em verde correspondem aos anos selecionados, e os dados de 2023 somente abarcam de janeiro a maio. Fonte: dados CHIRPS.

imagem (Figura 6) ocorreram em 29/09/1987 e 02/01/2007 em anos com influência El Niño, e 01/10/2013 em ano Neutro. Destacamos nesses três anos a influência de SAM (-). Entretanto, essa diferença também pode estar relacionada a abertura artificial da barra que pode interferir no padrão da relação entre áreas alagadas x precipitação acumulada.

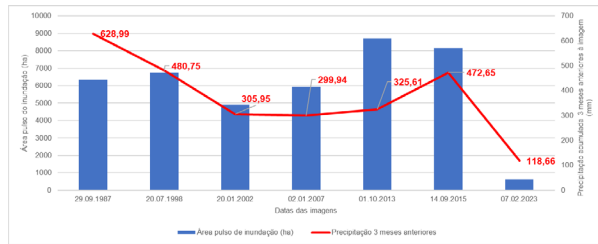
Tabela 1

Data das imagens, variabilidade da precipitação e classificação NOAA dos eventos

Data da imagem	Satélite Landsat/Sensor	Precipitação total acumulada (mm), mês da imagem	Precipitação total acumulada (mm), três meses anteriores à imagem	Precipitação total acumulada (mm), três anos anteriores à imagem	Influência NOAA/ENOS/SAM na imagem
24/09/1987	TM5	128,80	628,99	1.591 (9184) 1.347 (1985) 1.466 (1986)	El Niño (+) / SAM (-)
20/07/1998	TM5	154,43	480,75	1.508 (1995) 1.143 (1996) 1.607 (1997)	El Niño (+) / SAM (+)
20/01/2002	TM5	85,19	531,18	1.111 (1999) 1.338 (2000) 1.498 (2001)	Neutro / SAM (+)
02/01/2007	TM5	105,80	117,30	1.143 (2004) 1.129 (2005) 1.182 (2006)	El Niño (+) / SAM (-)
01/10/2013	OLI	120,67	325,61	1.274 (2010) 1.201 (2011) 1.226 (2012)	Neutro / SAM (-)
14/09/2015	OLI	207,15	472,65	1.226 (2012) 1.243 (2013) 1.724 (2014)	El Niño (+) / SAM (+)
07/02/2023	OLI	85,80	118,66	1.150 (2020) 1.079 (2021) 1.052 (2022)	La Niña (-) / SAM (+)

Fonte: elaboração própria. El Niño (-): aumento da temperatura da superfície do mar no Pacífico. La Niña (+): fase oposta ao El Niño. SAM (+): fase positiva do SM, anomalias de precipitação são negativas. SAM (-): fase negativa do SAM, anomalias de precipitação são positivas. Fonte: elaboração própria com base em USGS, CHIRPS e Centro de Previsão Climática da National Oceanic and Atmospheric Administration.

Figura 6. Relação entre área alagada x precipitação acumulada nos três meses anteriores à imagem, no Parque Nacional da Lagoa do Peixe



Fonte: elaboração própria com base nos dados de CHIRPS e imagens MNDWI.

Os mapeamentos de classes de MNDWI, no período entre 1987 e 2023, mostraram variação das áreas alagadas nas AUs do Parque Nacional da Lagoa do Peixe (Figura 7). Como resultado dos pulsos, observa-se conectividade entre duas tipologias de AUs, as lagoas e o banhado, situado ao norte, na região acima de dois metros de elevação, em área que corresponde ao terraço lagunar II. Nesses períodos, o Modelo Digital de Elevação (MDE) permite identificar que quando há ocorrência de pulsos, também inundam os compartimentos relativos aos terraços lagunares, em cotas de até sete metros.

As Figuras 8 e 9 representam os pulsos de inundação de 2013 e de 2015. Em ano de neutralidade de ENOS /

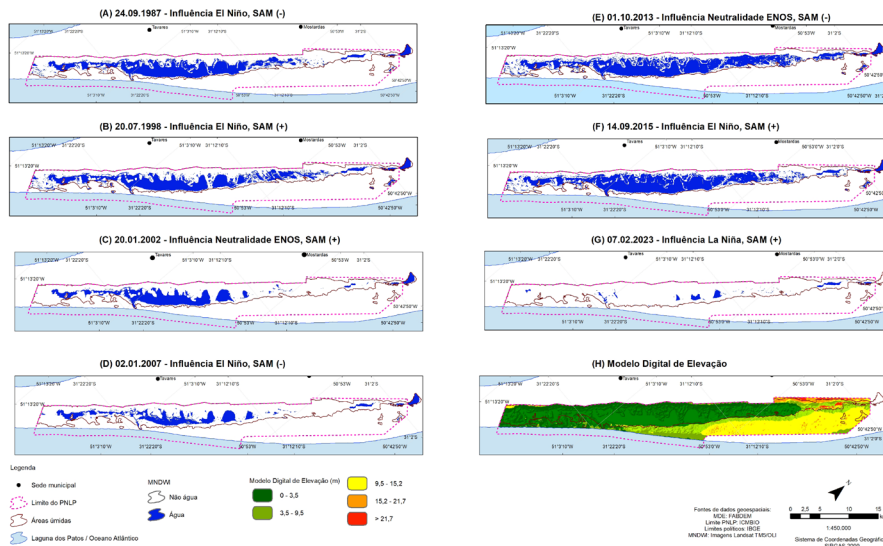
SAM (-) a área alagada em 2013 foi de 8.719,03 ha, ou 50,08% das AUs. Em 2015, El Niño / SAM (+), a área alagada foi de 8.154,45 ha, ou 46,84% da área de AUs.

Em período de estiagem, ano de 2023 (Figura 10), a área alagada foi reduzida para 118,66 ha, ou 0,68% das AUs. Verifica-se que poucas áreas permanecem com água, somente as áreas próximas do canal e parte das lagoas próximas ao banhado. O registro de estiagem mais recente, do ano 2023, faz parte de um longo período de La Niña, iniciado em 2021.

A conectividade entre as AUs, banhado ao norte e lagoas Pai João, Veiana e do Peixe, observada nos anos de 2013 Neutro / SAM (-); 2015 El Niño / SAM (+); 1998 El Niño / SAM (+); 1987 El Niño / SAM (-) ocorre devido à pequena amplitude da variação altimétrica nas áreas dos terraços lagunares. Essas áreas estão confinadas entre as barreiras III e IV. As áreas no centro-sul do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, próximas ao canal, correspondem as menores altitudes. Quando os níveis de precipitação se acentuam, ocorrem os pulsos de inundação dos banhados sobre o terraço lagunar II e sobre os campos marginais à Lagoa do Peixe, no terraço lagunar I.

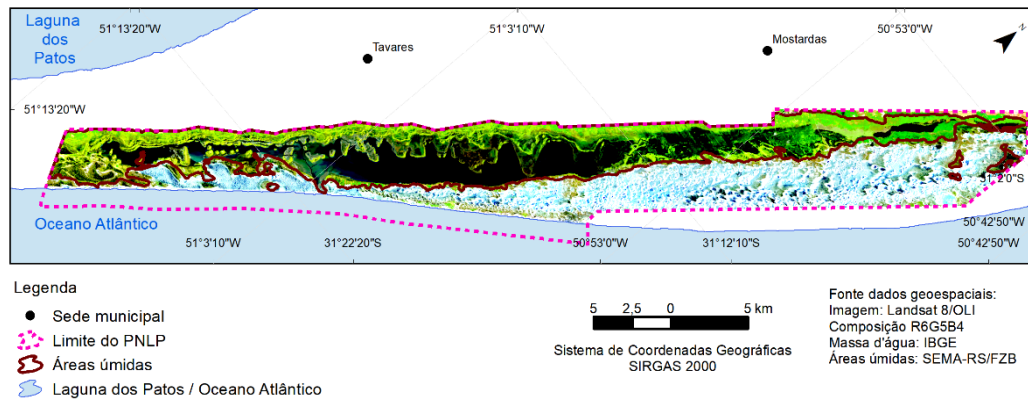
Nos períodos de menor precipitação de 2002 Neutro / SAM (+) e 2007 El Niño / SAM (-), a água acumulada não é suficiente para que ocorra o transbordamento e conectividade entre as AUs.

Figura 7. Imagens MNDWI, em períodos de El Niño, La Niña e anos Neutros, SAM (+ ou -) entre 1987 e 2023, e Modelo Digital de Elevação, no Parque Nacional da Lagoa do Peixe



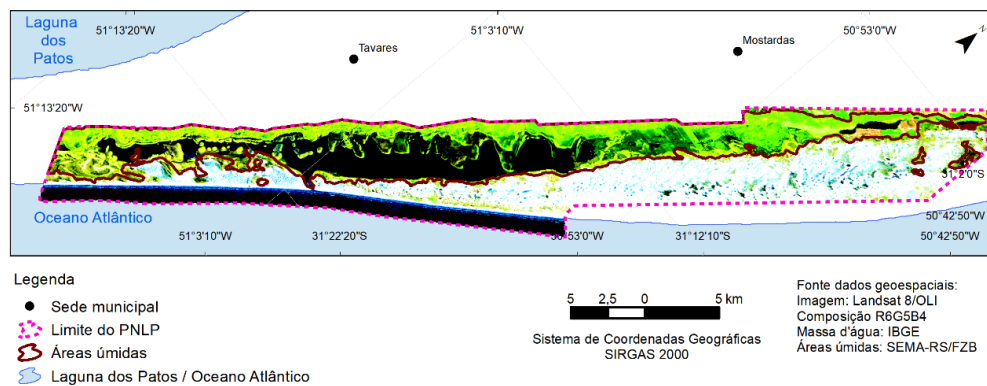
Fonte: elaboração própria com base em imagens Landsat TM5/OLI e MDE/USGS.

Figura 8. Pulso de inundação em período de neutralidade de ENOS / SAM (-), outubro de 2013



Fonte: elaboração própria com base em imagens LANDSAT 8 (OLI)/USGS.

Figura 9. Pulso de inundação em período de El Niño de ENOS / SAM (+), setembro de 2015



Fonte: elaboração própria com base em imagens LANDSAT 8 OLI/USGS.

Discussões

Influência da variabilidade climática

Os pulsos de inundação são fortemente controlados pelo regime de precipitação, uma vez que as AUs do Parque não estão associadas a uma rede de drenagem (Truccolo, 1993). A variabilidade associada ao SAM (+ ou -) na circulação atmosférica na primavera intensifica o sinal do El Niño (Silvestri e Vera, 2003) e modula a dinâmica das chuvas frontais em anos Neutros (Shossler, 2016). Desta influência, resultam maiores acumulados de chuva e consequente maiores áreas alagadas nas AUs na primavera, como se observa nas imagens de MNDWI.

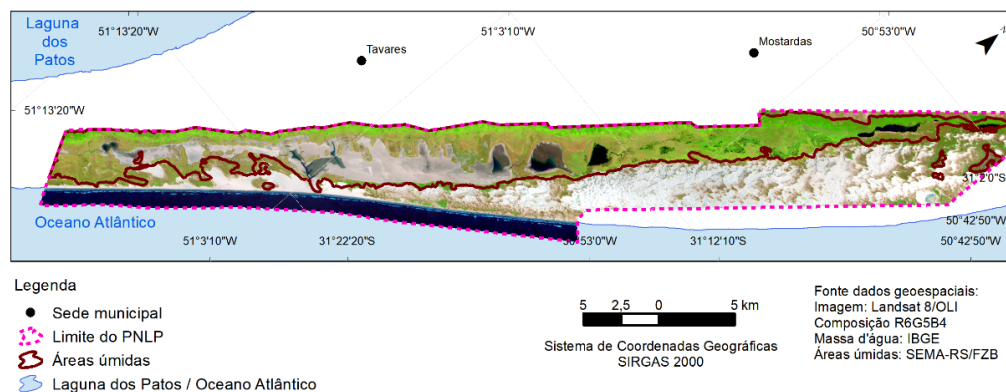
No verão ocorre o oposto: o SAM (+ ou -) intensifica La Niña, modula o sinal de El Niño e a dinâmica das massas de ar (polar e marítima) no ano de neutralidade

do ENOS (Shossler, 2016). Dados do Climate Prediction Center, da NOAA (2023b), registraram forte influência de La Niña entre julho de 2020 e fevereiro de 2023. Esses eventos extremos causaram a redução drástica dos acumulados de chuva e, conseqüentemente, das áreas alagadas. Os efeitos do evento de extremo de seca provocaram a redução quase total da lâmina de água no sistema lagunar, e podem ser observados na imagem MNDWI de 2023.

Em condição de seca extrema na Lagoa do Peixe, no mês de abril de 2023 (Figura 11A), no ano anterior (2022) o ICMBio estimou 1,5 toneladas de peixes mortos na lagoa (Figura 11B).

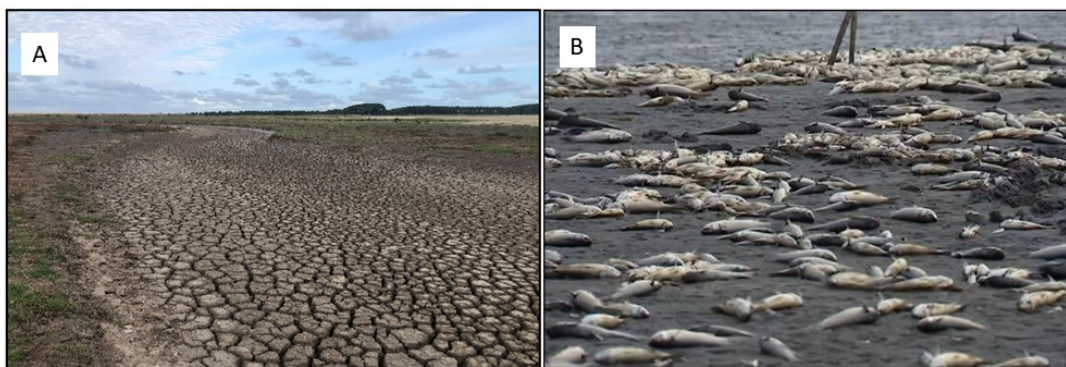
Esses eventos extremos podem ser uma ameaça às áreas úmidas (Salimi et al., 2021). Distúrbios decorrentes de eventos climáticos extremos resultam em pulsos de

Figura 10. Diminuição de área alagada em condição de seca com influência de La Niña / SAM (+), abril de 2023



Fonte: elaboração própria, com base em imagens LANDSAT 8 OLI/USGS.

Figura 11. Condição de seca com influência de La Niña, em abril de 2023, na Lagoa do Peixe: (A) redução da lâmina d'água e exposição do fundo lagunar e (B) mortandade de peixes



Fotos: dos autores e Fanpage G1 Globo (Campos, 2022).

inundação e elevação do nível do mar, e podem alterar a estrutura, a hidrologia e as suas funções ecológicas (He et al., 2023).

Aplicação do MNDWI

A partir dos mapeamentos de MNDWI foi possível evidenciar a variação das áreas alagadas nas AUs em decorrência dos pulsos de inundação. Além disso, permitiu comparar a influência dos eventos extremos na abrangência espacial dos pulsos.

As imagens de MNDWI mostram que as áreas que correspondem ao terraço lagunar I inundaram apenas quando da ocorrência de eventos extremos mais significativos na primavera, em 2013 e 2015. Nessas áreas, como a vegetação predominante é de campos úmidos, é facilmente coberta pela lâmina de água. E no período de extrema seca, em

2023, no terraço lagunar II predominou a influência da resposta dos solos hidromórficos, e apenas as lagoas Veiana e Pai João apresentaram ocorrência de água.

Entretanto, no banhado não foram eficientes para evidenciar as áreas de inundação. Segundo Perennou et al. (2018) isso pode ocorrer mesmo usando séries temporais de imagens óticas, devido à densidade de cobertura vegetal, que se sobrepõe a lâmina de água, o que pode representar grandes desvantagens e precisão de mapeamento.

O uso do índice espectral MNDWI tem mostrado resultados satisfatórios para o mapeamento de AUs, de áreas inundadas e de corpos d'água. Singh et al. (2015) sugerem que o MNDWI pode ser usado para melhor delinear as características da água misturada com a vegetação, se comparado ao Índice da Diferença Normalizada da Água (NDWI), enquanto Ferral et al. (2019) utilizaram o MNDWI

para analisar o comportamento de áreas inundadas em AUs, e comprovaram que este índice permite o delineamento preciso das margens de lagos e a determinação de pixels mistos. Gil et al. (2019), por sua parte, compararam o NDWI e o MNDWI no mapeamento de áreas inundáveis, e o MNDWI possibilitou um mapeamento mais adequado dos corpos d'água inundados na planície, pois o fatiamento das classes de pixels permitiu isolar as águas do rio das demais planícies inundadas.

Conectividade

Os eventos extremos de precipitação, a constituição arenosa dos terraços lagunares I e II, a baixa profundidade (+-1 m) do lençol freático (Arejano, 2006), a baixa variabilidade altimétrica e os solos hidromórficos (Gleissolos) são fatores que contribuem para o transbordamento das águas e consequente conectividade banhado-lagoas.

Em condições naturais os solos hidromórficos se encontram saturados por água, permanentemente ou em determinado período do ano, independentemente de sua drenagem atual. São mal a muito mal drenados e possuem características resultantes da influência do excesso de umidade permanente ou temporário, devido a presença do lençol freático próximo à superfície, durante um determinado período do ano (Embrapa, 2006).

Conforme Tockner et al. (1999) as oscilações das inundações sob a forma de pulsos propiciam a expansão, contração e fragmentação dos ecossistemas de AUs, interferindo no grau de conectividade entre as tipologias. Tem influência importante sob os processos de dispersão, migração, reprodução, disponibilidade de recursos e transferência de matéria e nutrientes.

O canal que conecta a Lagoa do Peixe ao oceano é intermitente. Sua oclusão ou abertura ocorre naturalmente como resultado da dinâmica costeira — ventos, marés, deriva de sedimentos — (Schossler et al., 2017). Garcia et al. (2017) destacam a importância dos pulsos hidrológicos na Lagoa do Peixe, na conectividade trófica entre compartimentos marinho, estuarino e doce dos ecossistemas do Parque Nacional da Lagoa do Peixe. Verificaram que pulsos induziram maior conectividade entre habitats e um fluxo líquido de biomassa da zona estuarina quando a conexão da lagoa com o oceano está fechada; e pulsos de inundação derivados das chuvas induziram a conectividade entre habitats e também fluxo de biomassa da zona de água doce para a estuarina. Após sessenta dias da abertura mecânica da barra, constatou cessação das condições de inundação e conectividade hidrológica entre a Lagoa do Peixe e áreas

úmidas do entorno, e redução do fornecimento de água doce para a zona estuarina.

Apesar da ocorrência natural da abertura do canal que conecta a Lagoa do Peixe, o mesmo pode ser desobstruído artificialmente pelo ICMBio e Prefeitura Municipal de Tavares, por pressão dos pecuaristas para evitar a inundação das pastagens, o que favorece também os pescadores na pesca do camarão.

No período entre 1987 e 2023, o canal abriu naturalmente apenas em 17/07/1998, permanecendo aberto até março de 1999. No ano de 1998, o total de precipitação pluviométrica ficou acima da média da região do parque (Schossler et al., 2017). A imagem de 20/07/1998 evidencia a área inundada sob a influência de El Niño / SAM (+).

Destacamos que em todas as imagens do período analisado, seja em eventos de El Niño, La Niña ou de neutralidade, que a embocadura da barra se encontrava aberta, conectando a Lagoa do Peixe ao oceano. Registros de Antunes (2007), Sbruzzi et al. (2015) e Shossler et al. (2016) apontam que não há relatos de que o canal tenha permanecido fechado durante um ano inteiro. Provavelmente devido a sua abertura mecânica, sempre que a lagoa principal enche.

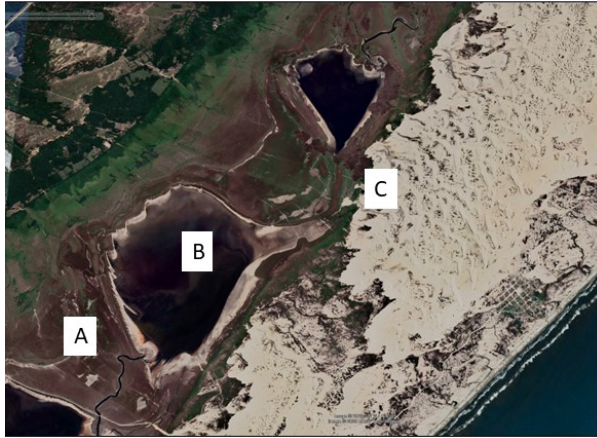
A desobstrução ocorre entre o inverno e a primavera, período de maior precipitação. Nos meses posteriores, a lagoa volta a ficar obstruída pelo assoreamento morfodinâmico. Quando fechada e em situações de regime pluviométrico excessivo, a lagoa enche a ponto de inundar as planícies lagunares e o canal pode abrir naturalmente (Schossler et al., 2017). A desobstrução mecânica altera o volume de água, reduz os nutrientes necessários à flora e fauna local, e diminui a umidade no entorno do corpo de água principal, ou seja, das outras tipologias de AUs do parque (Haines, 2008; Schossler, 2016).

Impactos nas AUs do Parque Nacional da Lagoa do Peixe

Concomitante ao decréscimo de chuvas, sobretudo na fase de La Niña, a dinâmica dos ventos contribui para o acúmulo de areia sobre as AUs (Hahn, 2016; Signori, 2018), em especial sobre a lagoa principal, e influencia na redução da superfície alagada. A Figura 12 ilustra esta dinâmica sobre as AUs próximas às lagoas Veiana e Pai João.

O aumento do transporte eólico de areia a partir da movimentação do campo de dunas sobre as AUs causa deposições anômalas. Neste cenário, grandes quantidades de areia são transportadas em períodos de forte pluviosidade ao corpo lagunar, acelerando o assoreamento natural da

Figura 12. Imagem em período de extrema seca, em 24.02.2022, mostra: (A) seca nas áreas do terraço lagunar II; (B) lagoas Veiana e Pai João com permanência de água, e (C) movimentação do campo de dunas sobre as AUs do Parque Nacional da Lagoa do Peixe



Fonte: Google Earth, 24/02/2022.

Lagoa do Peixe. A redução da disponibilidade hídrica no solo acelera os processos de drenagem de AUs (Burgueño et al., 2013). Segundo Arejano (2006) esses processos podem causar a progressiva colmatação dos corpos lagunares e a diminuição das AUs.

Apesar de a abertura artificial da barra não alterar a riqueza de espécies de macrófitas nas AUs do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, a abertura afeta a dinâmica da composição de espécies de macrófitas aquáticas. Para Rolon (2011) a variação hidrológica relacionada a esse manejo pode ser o fator responsável pela mudança contínua na composição de espécies das AUs. Segundo Garcia et al. (2017) a abertura artificial da barra da Lagoa do Peixe afeta a dinâmica da cadeia alimentar, encerra os pulsos de inundação e reduz o fornecimento de água doce para a zona estuarina.

O Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2008) ressalta que, no que diz respeito à conservação, a desobstrução mecânica da embocadura da barra é uma interferência que causa impactos, principalmente, se realizada sem planejamento e estudo do período adequado.

Sendo o Parque Nacional da Lagoa do Peixe um Sítio Ramsar com reconhecimento global e sua proteção está amparada pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação, Lei 9.985 de 2000. A Convenção de Ramsar sugere considerável importância à realização de inventários e monitoramento destes territórios, sobretudo por estarem suscetíveis aos eventos extremos.

Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram entender quais são as características dos pulsos de inundação das AUs do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, frente às variabilidades climáticas e às características geológico-geomorfológicas. E evidenciamos que é possível a partir de séries históricas de precipitação e de imagens de satélite estabelecer padrões espaciais de inundações das AUs.

O entendimento da relação entre os eventos extremos e a dinâmica espaço-temporal de inundações no Parque Nacional da Lagoa do Peixe, obtido por meio do MNDWI, permitiu as seguintes conclusões:

1. Os pulsos de inundação são dependentes do regime de precipitação; os dados demonstram que as AUs do Parque Nacional da Lagoa do Peixe estão suscetíveis aos eventos de variabilidade climática (ENOS e SAM).
2. A série temporal de imagens 1987-2023 permitiu analisar o comportamento dos pulsos e da estiagem, indicadores primários do estado funcional das AUs.
3. Os pulsos ocorreram na primavera, e a estiagem, no verão. A estiagem se mostrou severa em fase de La Niña.
4. A abertura mecânica da desembocadura pode estar interferindo diretamente no padrão de inundação, visto que altera o tempo de permanência da água nas AUs.

Podemos concluir então que no Parque Nacional da Lagoa do Peixe, os eventos extremos de precipitação, a constituição arenosa dos terraços lagunares I e II, a baixa profundidade (+1 m) do lençol freático, a baixa variabilidade altimétrica e os solos hidromórficos (Gleissolos) são fatores que contribuem para o transbordamento das águas, da variação da extensão das áreas inundadas e consequente conectividade banhado-lagoas.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (processo nº 88887.645451/2021-00 e nº 88887.488339/2020-00), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS, Programa Pesquisador Gaúcho, Edital FAPERGS 07/2021) e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela bolsa de pesquisa e auxílio financeiro.

Referências

- Amoros, C. e Roux, A. L. (1988). Interaction between water bodies within the floodplains of large rivers: function and development of connectivity. *Münstersche Geographische Arbeiten*, 29(1), 125-130.
- Antunes, M.L.F. (2007). A pesca do camarão-rosa *Farfantepenaeus paulensis* na Lagoa do Peixe (RS): análise quantitativa de recrutamento, crescimento e mortalidade com vistas ao gerenciamento pesqueiro – fase juvenil [Tese de doutorado]. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- Arejano, T.B. (2006). *Geologia e evolução holocênica do sistema lagunar da Lagoa do Peixe, litoral médio do Rio Grande do Sul, Brasil* [Tese de doutorado]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Barros, D.F e Albernaz, A.L.M. (2014). Possíveis impactos das mudanças climáticas em áreas úmidas e sua biota na Amazônia Brasileira. *Brazilian Journal of Biology*, 74(4), 810-820. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.04013>
- BirdLife International. (2023). Important Bird Area Factsheet: *Parque Nacional da Lagoa do Peixe*. BirdLife International. Recuperado em 31 de julho de 2023 em <http://datazone.birdlife.org/site/factsheet/parque-nacional-da-lagoa-do-peixe-iba-brazil>.
- Brinson, M.M. (1993). *A Hydrogeomorphic Classification for Wetlands. Wetlands Research Programm Technical Report WRP-DE-4*. Washington. US Army Corps of Engineers. Recuperado em 3 de dezembro de 2023 em <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a270053.pdf>
- Britto, F.P., Barletta, R. e Mendonça, M. (2008). Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial no Rio Grande do Sul: influência do fenômeno El Niño Oscilação Sul. *Revista Brasileira de Climatologia*, 3, 37-48. <https://doi.org/10.5380/abclima.v3i0.25408>
- Burgueño, L.E.T., Quadro, M.S, Barcelos, A.A., Saldo, P.A., Weber, F.S., Junior, M.K. e Souza, L.H. (2013). Impactos ambientais de plantios de *Pinus* sp. Em áreas úmidas: o caso do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, RS, Brasil. *Biodiversidade Brasileira*, 3(2), 192-206. <https://revistaelectronica.icmbio.gov.br/BioBR/article/view/355>
- Campos, J. (2022). ICMBio estima 1,5 tonelada de peixes mortos em lagoa no RS: ‘é devastador’, diz ambientalista. G1 o Globo. Publicado em 04 de fevereiro de 2022. <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2022/02/04/icmbio-estima-15-tonelada-de-peixes-mortos-em-lagoa-no-rs-e-devastador-diz-ambientalista.ghtml>
- Costa, J.C., Pereira, G., Siqueira, M.E, Cardozo, F.S. e Silva, V.V. (2019). Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 24, 228-243. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v24i0.60237>
- Cunha, C.N., Piedade, M.T.F. e Junk, W.J. (Eds.). (2015). *Classificação e delineamento das áreas úmidas brasileiras e de seus macrohabitats*. EdUFMT.
- Das, A. e Basu, T. (2020). Assessment of Peri-Urban Wetland Ecological Degradation through Importance-performance Analysis (IPA): A Study on Chatra Wetland, India. *Ecological Indicators*, 114, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106274>
- Deng, Z., Sun, Y., Zhang, K., Qiu, Q. y Sun, W. (2020). A Water Identification Method Basing on Grayscale Landsat 8 OLI Images. *Geocarto International*, 35(7), 700-710. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1552324>
- Ekumah, B., Armah, F.A., Afrifa, E.K., Aheto, D.W., Odoi, J.O. e Afitiri A. R. (2020). Geospatial Assessment of Ecosystem Health of Coastal Urban Wetlands in Ghana. *Ocean & Coastal Management*, 193, 105226. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105226>
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária [Embrapa]. (2006). *Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos* (2a. ed.). Embrapa Solos.
- Ferral, A., Luccini, E., Aleksinkó, A. e Scavuzzo, C.M. (2019). Flooded-area Satellite Monitoring within a Ramsar Wetland Nature Reserve in Argentina. Remote Sensing Applications: *Society and Environment*, 15, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.04.003>
- Fontana, D.C. e Berlato, M.A. (1997). Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5(1), 127-132. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v3i0.25408>

- Garcia, A.M., Winemiller, K.O., Hoeninghaus, D.J., Claudino, M.C., Bastos, R., Correa, F., Huckembeck, S., Vieira, J., Loebmann, D., Abreu, P. e Ducatti, C. (2017). Hydrologic Pulsing Promotes Spatial Connectivity and Food Web Subsidies in a Subtropical Coastal Ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*, 567, 17-28. <http://dx.doi.org/10.3354/meps12060>
- Gil, A.P., Padovani, C.R. e Coelho, A.L. (14 ao 17 de abril 2019). Comparação entre NDWI e MNDWI para o Mapeamento de Áreas Inundadas do Pantanal do Taquari. Em *XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* (pp. 2152-2155). Santos, Brasil.
- Goerl, R.F., Kobiyama, M. e Santos, I. (2012). Hidrogeomorfologia: princípios, conceitos, processos e aplicações. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 13(2), 103-111. <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i2.166>
- Govaerts, B. e Verhulst, N. (2010). *The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) GreenSeekerTM Handheld Sensor: Toward the Integrated Evaluation of Crop Management. Part A: Concepts and Case Studies*. CIMMYT.
- Grimm, A.M. (2009). Variabilidade interanual do clima no Brasil. Em Cavalcanti, I.F.A., Ferreira, N.J., Silva, M.G.A.J. e Silva Dias, M.A.F. (Orgs.). *Tempo e Clima no Brasil* (pp. 353-374). Oficina de Textos.
- Grimm, A.M., Barros, V.R. e Doyle, M.E. (2000). Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. *Journal of Climate*, 13(1), 35-58. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2)
- Grimm, A.M., Ferraz, S.E. e Gomes, J (1998). Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 11(11), 2863-2880. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<2863:PAISBA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<2863:PAISBA>2.0.CO;2)
- Hahn, A.R.O. (2016). *Evolução do campo de dunas transgressivo da margem leste da Lagoa do Peixe, Litoral Médio do Rio Grande Do Sul, de 1948 a 2010* [Dissertação para título de mestre]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Haines, P.E. (2008). *ICOLL Management - Strategies for a Sustainable Future*. BMT WBM Pty Ltd., Broadmeadow, NSW.
- He, K., Li, W., Zhang, Y., Sun, G., McNulty, S.G., Flanagan, N.E. e Richardson, C.J. (2023). Identifying Driving Hydrogeomorphic Factors of Coastal Wetland Downgrading Using Random Forest Classification Models. *Science of the Total Environment*, 894, 164995. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164995>
- Ilyas, S., Xu, X., Jia, G. e Zhang, A. (2019). Interannual Variability of Global Wetlands in Response to El Niño Southern Oscillations (ENSO) and Land-Use. *Frontiers in Earth Science*, 7, 289. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00289>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE]. (2022). *Banco de Dados e Informações Ambientais (BDiA) – Mapeamento de Recurso Naturais (MRN) – Escala 1:250.000 – Malhas municipais, Versão 2022*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Recuperado em 3 de dezembro de 2023 em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE]. (2023). *Banco de Dados e Informações Ambientais (BDiA) – Mapeamento de Recurso Naturais (MRN) – Escala 1:250.000 – Versão 2023*. Recuperado em 3 de dezembro de 2023 em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>
- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade [ICMBio]. (12 de dezembro de 2023). *Limites de Unidades de Conservação Federais*. Ministério do Meio Ambiente. https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/dados_geoespaciais/mapa-tematico-e-dados-geoestatisticos-das-unidades-de-conservacao-federais
- Kervalt, M. e Favero, M. (20 de julho de 2019). *Por que a Lagoa do Peixe está no centro de disputa no Ministério do Meio Ambiente*. GZH Política. <https://gauchazh.clicrbs.com.br/politica/noticia/2019/07/por-que-a-lagoa-do-peixe-esta-no-centro-de-disputa-no-ministerio-do-meio-ambiente-cjyae5hiq03ad01msxhok4i15.html>
- Knak, R.B. (1999). *Plano de Manejo do Parque Nacional da Lagoa do Peixe – Fase 2*. Fundação Universidade Federal do Rio Grande.
- Lisenby, P.E., Tooth, S. e Ralph, T.J. (2019). Product vs. Process? The Role of Geomorphology in Wetland Characterization. *Science of the Total Environment*, 663, 980-991. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.399>

- Lu, Y., Wang, R., Zhang, Y., Su, H., Wang, P., Jenkins, A., Rober, C.F., Bailey, M. e Squire, G. (2015). Ecosystem Health Towards Sustainability. *Ecosystem Health and Sustainability*, 1(1), 1-15. <https://doi.org/10.1890/EHS14-0013.1>
- Ministério do Meio Ambiente [MMA]. (2008). Sítio Ramsar. *Parque Nacional da Lagoa do Peixe. Planejamento para o Sucesso de Conservação*. Ministério do Meio Ambiente.
- Moomaw, W.R., Chmura, G.L., Davies, G.T., Finlayson, C.M., Middleton, B.A., Natali, S.M., Perry, J.E., Roulet, N. e Sutton-Grier A.E. (2018). Wetlands in a Changing Climate: Science, Policy and Management. *Wetlands*, 38(2), 183-205. <https://doi.org/10.1007/s13157-018-1023-8>
- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (2023a). *Cold and Warm Episodes by Season*. National Weather Service Climate Prediction Center. Recuperado em 13 de dezembro de 2023 em http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml
- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (2023b). *National Weather Service*. National Weather Service Climate Prediction Center. Recuperado em 13 de dezembro de 2023 em <http://www.nws.noaa.gov/>
- Nicholls, R.J. (2004). Coastal Flooding and Wetland Loss in the 21st Century: Changes under the SRES Climate and Socio-economic Scenarios. *Global Environmental Change*, 14, 69-86. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2003.10.007>
- Oliveira, D.A. (2021). “Wetland” como unidade hidrogeomorfológica no contexto de transição entre o cerrado e o semiárido mineiro: análise da dinâmica do Pantanal da bacia de drenagem do rio Pandeiros – MG [Tese de doutorado]. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Parque Nacional da Lagoa do Peixe [@parnalagoadopeixe]. (s.f.). *Parque Nacional da Lagoa do Peixe*. Instagram. <https://www.instagram.com/parnalagoadopeixe/>
- Parque Nacional da Lagoa do Peixe. (2023). Blog Parque Nacional da Lagoa do Peixe. https://parnalagoadopeixe.blogspot.com/p/blog-page_30.html.
- Paul, S. e Pal, S. (2020). Predicting Wetland Area and Water Depth of Ganges Moribund Deltaic Parts of India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100338. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100338>
- Perennou, C. et al. (2018). Mapping Mediterranean Wetlands with Remote Sensing: A Good-looking Map is not Always a Good Map. *Advances in Ecological Research*, 58, 243-277. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2017.12.002>
- Portz, L., Guasselli, L.A. e Corrêa I.C.S. (2011). Variação espacial e temporal de NDVI na Lagoa do Peixe, RS. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 5, 897-908. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v4i5.232706>
- Presidência da República. (6 de novembro de 1983). *Decreto Federal Nº 93.546/1986. Cria o Parque Nacional da Lagoa do Peixe*. Presidência da República Casa Civil. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/1985-1987/d93546.htm
- Pringle, C.M. (2003). What is Hydrologic Connectivity and Why is it Ecologically Important. *Hydrological Processes*, 17(13), 2685-2689. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.5145>
- Ramos, R. A., Pasqualetto, A. I., Balbuena, R. A., Agra, R., Quadros, E. L. L. e Neves, D. D. (2015). Mapeamento e diagnóstico de áreas úmidas no Rio Grande do Sul com o uso de ferramentas de geoprocessamento. Base cartográfica digital do RS 1:250.000. Fepam.
- Rapinel, S., Panhelleux, L., Gayet, G., Vanacker, R., Lemercier, B., Laroche, B., Chambaud, F., Guelmami, A. e Hubert-Moy, L. (2023). National Wetland Mapping Using Remote-Sensing-Derived Environmental Variables, Archive Field Data, and Artificial Intelligence. *Heliyon*, 9(2), E13482, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13482>
- Rapport, D.J., Regier, H. e Hutchinson, T. (1985). Ecosystem Behavior under Stress. *The American Naturalist*, 125, 617-640. <https://doi.org/10.1086/284368>
- Reboita, M.S., Ambrizzi, T. e Rocha, R.P.D. (2009). Relationship between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere Atmospheric Systems. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24(1), 48-55. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000100005>

- Ricaurte, L.F. et al. (2019). A Classification System for Colombian Wetlands: An Essential Step Forward in Open Environmental Policy-Making. *Wetlands*, 39, 971-990. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01149-8>
- Rocha, R.R.A. e Rocha, P.C. (2007). Sistemas Rio-Planície de Inundação: geomorfologia e conectividade hidrodinâmica. *Tópos*, 1(6), 81-112.
- Rodrigues, B.D. (2015). *Comportamento dos sistemas frontais no estado do Rio Grande do Sul durante os episódios ENOS* [Dissertação para título de mestre]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Rolon, A. S. (2011). *Diversidade de macrófitas aquáticas em áreas úmidas do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, Rio Grande do Sul* [Tese de doutorado]. Universidade Federal de São Carlos.
- Rossato, M. S. (2011). *Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia* [Tese de doutorado]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Rossi, S. e Soares, M. D. O. (2017). Effects of el niño on the coastal ecosystems and their related services. *Mercator*, 16(12), 1-16. <https://doi.org/10.4215/rm2017.e16030>.
- Salimi, S., Almutkar, S.A. e Scholz, M. (2021). Impacto das alterações climáticas nos ecossistemas de zonas húmidas: uma revisão crítica das zonas húmidas experimentais. *Journal of Environmental Management*, 286, 112160. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112160>
- Sbruzzi, J.B., Fonseca, E.L. e Saldanha D.L. (2015). Avaliação espaço-temporal da Lagoa do Peixe frente aos eventos climáticos ENOS. Em *XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* (pp. 1129-1136). João Pessoa, Brasil.
- Schossler, V. (2016). *Influência das mudanças climáticas em geoindicadores na costa sul do Brasil* [Tese de doutorado]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Schossler, V., Toldo Junior, E.E. e Dani, N. (2017). Morfodinâmica da desembocadura da Lagoa do Peixe, litoral sul do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 44(1), 25-39. DOI: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78251>
- Secretaria Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul [SEMA-RS]. (2006). *Arquivos digitais para uso em SIG – base cartográfica digital do RS 1:250.000 – Áreas Úmidas do Estado do Rio Grande do Sul*. Fepam. Recuperado em 3 de dezembro de 2023 de https://ww3.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp
- Semeniuk, C.A. e Semeniuk, V. (1995). A Geomorphic Approach to Global Classification for Inland Wetlands. *Vegetatio*, 118, 103-124. <https://doi.org/10.1007/BF00045193>
- Sheldon, F., Bunn, S.E., Hughes, J.M., Arthington, A.H., Balcombe, S.R. e Fellows, C.S. (2010). Ecological Roles and Threats to Aquatic Refugia in Arid Landscapes: Dryland River Waterholes. *Marine and Freshwater Research*, 61(8), 885-895. <https://doi.org/10.1071/MF09239>
- Signori, L.M. (2018). *Mapeamento por Sensoriamento Remoto de Área de Pinus Spp no Parque Nacional da Lagoa do Peixe* [Dissertação para título de mestre]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Silvestri, G. e Vera, C.S. (2003). Antarctic Oscillation Signal on Precipitation Anomalies over Southeastern South America. *Geophysical Research Letters*, 30(21), 3-4. <https://doi.org/10.1029/2003GL018277>
- Simioni, J.P.D. (2017). *Pulsos de inundação e conectividade em áreas úmidas, Área de Proteção Ambiental do Banhado Grande-RS* [Dissertação para título de mestre]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Simioni, J.P.D., Guasselli, L.A. e Etchelar, C.B. (2017). Connectivity among Wetlands of EPA of Banhado Grande, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 22. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716096>
- Singh, K.V., Setia, R., Sahoo, S., Prasad, A. e Pateriya, B. (2015). Evaluation of NDWI and MNDWI for Assessment of Waterlogging by Integrating Digital Elevation Model and Groundwater Level. *Geocarto International*, 30(6), 650-661. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.965757>
- Singh, M. e Sinha, R. (2021). Hydrogeomorphic Indicators of Wetland Health Inferred from Multi-Temporal Remote Sensing Data for a New Ramsar Site (Kaabar Tal), India. *Ecological Indicators*, 127, 107739. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107739>

- Sun, R., Yao, P., Wang, W., Yue, B. e Liu, G. (2017). Assessment of Wetland Ecosystem Health in the Yangtze and Amazon River Basins. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(3), 81. <http://dx.doi.org/10.3390/ijgi6030081>
- Tockner, K., Pennetzdorfer, D., Reiner, N., Schiemer, F. e Ward, J.V. (1999). Hydrological Connectivity, and the Exchange of Organic Matter and Nutrients in a Dynamic River-Floodplain System (Danube, Austria). *Freshwater Biology*, 41(3), 521-535. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.00399.x>
- Tomazelli, L. e Villwock, J. A. (1991). Geologia do sistema lagunar holocênico do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 18(1), 13-24. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.21358>
- Tomazelli, L.J. e Villwock, J.A. (2000). O Cenozóico no Rio Grande do Sul: geologia da planície costeira. Em Holz, M. e De Ros, L.F. (Eds.), *Geologia do Rio Grande do Sul* (pp. 375-406). CIGO/UFRGS.
- Truccolo, E.C. (1993). *Caracterização química da Lagoa do Peixe*. [Trabalho para obtenção de título]. Universidade Federal do Rio Grande.
- University of Bristol. (18 de janeiro de 2023). *Dados do Modelo Digital de Elevação FABDEM (Forest And Buildings Removed Copernicus DEM)*. University of Bristol. <https://data.bris.ac.uk/data/dataset/s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn>
- University of California. (20 de julho de 2023). *Dados CHIRPS*. University of California. <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>
- United States Geological Survey [USGS]. (2023). United States Geological Survey. *EarthExplorer*. <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Ward, J.V. e Stanford, J.A. (1995). Ecological Connectivity in Aluvial River Ecosystems and its Disruption by Flow Regulation. *Regulated Rivers: Research and Management*, 11(1), 105-119. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450110109>
- 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>
- Yang, Z., Bai, J. e Zhang, W. (2021). Mapping and Assessment of Wetland Conditions by Using Remote Sensing Images and POI Data. *Ecological Indicators*, 127, 107485. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107485>
- Zhu, Q., et al. (2017). Interannual Variation in Methane Emissions from Tropical Wetlands Triggered by Repeated El Niño Southern Oscillation. *Global Change Biology*, 23(11), 4706-4716. <https://doi.org/10.1111/gcb.13726>