Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
GD Editora

EVENTOS DE INUNDAÇÃO EM ANOS EXTREMOS DE DIPOLO DO ATLÂNTICO E LA NIÑA NO ARQUIPÉLAGO DO MARAJÓ

Flood events in extreme Atlantic Dipole and La Niña years in Marajó archipelago

Eventos de inundaciones en el extremo Dipolo Atlántico y años de La Niña en el archipiélago de Marajó

Dênis José Cardoso Gomes
Universidade do Estado do Pará
deniss.feg@gmail.com

Norma Ely Santos Beltrão
Universidade do Estado do Pará
normaely@uepa.br

Yuri Alefh Saraiva Dias
Universidade do Estado do Pará
alefhyuri@gmail.com

Edite Torres Maia
Universidade Federal do Pará
dieh.maia@gmail.com

Resumo: As inundações sazonais em várzeas são processos naturais que ocorrem ao longo da bacia amazônica e são afetadas por eventos climáticos que favorecem o aumento da precipitação na Amazônia Setentrional. Neste trabalho, analisaram-se as diferenças espaciais das inundações em períodos afetados por esses extremos climáticos no arquipélago do Marajó (PA). Na metodologia, observou-se a precipitação em anos extremos com dados: índices climáticos, medidas de precipitação (estação pluviométrica) e estimadas (espacializados). Na detecção de inundação foram comparadas imagens antes e depois das cheias em cada período sazonal influência do DA$^-$ (2019) e influência de La Niña (2021/2022). Utilizaram-se dados do SAR Sentinel 1 de banda C processados por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Os resultados apontaram grandes volumes de chuva nos anos de 2019 (DA$^-$) e 2021-22 (La Niña), no caso do período de La Niña, o destaque com maior recarga pluvial foi na estação chuvosa do ano de 2022. A espacialização pluvial foi maior no ano de 2019 (DA$^-$). As maiores áreas inundadas ocorreram no período 2019, afetado pelo DA$^-$. A análise de tais eventuais

perigos naturais podem contribuir na prevenção e minimização dos impactos negativos nos aspectos socioeconômicos locais em anos extremos, como destruição da infraestrutura urbana e perdas humanas.

Palavras-chave: Interação oceano-atmosfera. Área alagada. Amazônia Setentrional.

Abstract: Seasonal floods in floodplains are natural process that occur along the Amazon basin and are affected bt climatic events that favor the increase of precipitation in North Amazon. This work, to analyze the spatial differences in flooding areas in periods influenced by these climatic extremes in the Marajó archipelago (PA). In the methodology, It was observed of precipitation in extreme years with data: climate indexes, rainfall measured (rainfall station) and estimated (spatialized). Flood detection was comparing images before and after the occurrence of floods in each seasonal period 2019 - influence of AD^{-} and 2021/2022 - influence of La Niña. Data from C-band SAR Sentinel 1 processed through the Google Earth Engine (GEE) platform were used. Results showed large volumes of rain in the years 2019 (AD^{-}) and 2021-22 (La Niña), in the case of the La Niña period, the highlight with the highest rainfall recharge was in the rainy season of the year 2022. Rainfall spatialization was higher in 2019 (AD^{-}). The largest flooded areas occurred in the period 2019, affected by AD^{-}. Analysis of such possible natural hazards can contribute to the prevention and minimization of negative impacts on local socioeconomic aspects in extreme years, such as destruction of urban infrastructure and human losses.

Keywords: Ocean-atmosphere interaction. Flooded area. North Amazon.

Resumen: Las inundaciones estacionales en llanuras aluviales son procesos naturales que ocurren a lo largo de la cuenca amazónica y se ven afectadas por eventos climáticos que favorecen el aumento de las precipitaciones en la Amazonía Norte. En este trabajo se analizaron las diferencias espaciales de inundaciones en períodos afectados por estos extremos climáticos en el archipiélago de Marajó (PA). En la metodología, la precipitación en años extremos se observó con datos: índices climáticos, mediciones de lluvias (temporada de lluvias), estimadas (espacializadas). En la detección de inundaciones se compararon imágenes antes y después de las inundaciones en cada periodo estacional 2019 -influencia de DA- y 2021/2022 -influencia de La Niña. Se utilizaron datos de SAR Sentinel 1 de banda C procesados a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE). Los resultados mostraron grandes volúmenes de lluvia en los años 2019 (DA-) y 2021-22 (La Niña), en el caso del periodo La Niña, el destaque con mayor recarga de lluvia fue en la temporada de lluvias del año 2022. la espacialización de las lluvias fue mayor en el año 2019 (DA-). Las mayores áreas inundadas ocurrieron en el periodo 2019, afectadas por DA-. El análisis de tales posibles peligros naturales puede contribuir a la prevención y minimización de los impactos negativos sobre los aspectos socioeconómicos locales en años extremos, como la destrucción de la infraestructura urbana y las pérdidas humanas.

Palabras clave: Interacción océano-atmósfera. Zona inundada. Amazonia del Norte.

Submetido em: 28/09/2023
Aceito para publicação em: 04/10/2024
Publicado em: 17/10/2024

1. INTRODUÇÃO

As inundações sazonais em sistemas de terras baixas (várzeas) têm sido objeto de muitos estudos que buscam compreender a dinâmica hidrológica e seus efeitos, seja localmente ou ao longo do tempo, tais como mudanças nos habitats (DRISCOLL; HAUER, 2019), efeitos na textura dos solos (WANG et al., 2018b), prevenção das inundações para o aumento da produção agrícola em áreas de várzea (VAN STAVEREN; VAN TATENHOVE; WARNER, 2018) e até mesmo como as inundações podem alterar, em uma perspectiva espaço-temporal, o acesso a serviços públicos básicos (MROZ, 2021).

Os efeitos das inundações sazonais podem ser potencializados pela ocorrência dos fenômenos El Niño Oscilação Sul (ENOS), compostos pelas fases quente (El Niño) e fria (La Niña) que favorecem a diminuição e aumento da precipitação na Amazônia respectivamente, e consequentemente o quantitativo de disponibilidade hídrica na região (TOWNER et al., 2020; 2021). Na fase do La Niña, as águas do setor do Pacífico tropical apresentam valores anômalos negativos de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), o que favorece a intensificação de movimentos subsidentes do ar nesta região, alterando os padrões de circulação do vento da célula de Walker e fortalecendo a atividade convectiva em grande parte da Amazônia (TOWNER et al., 2020; YUN et al., 2021). Neste contexto, os eventos de La Niña influenciam na variabilidade dos rios amazônicos (TOWNER et al., 2021), nos quais, mesmo com maior intensidade, os efeitos do La Niña no regime fluvial da Amazônia Setentrional são modestos para leste (FOLEY et al., 2002). Entretanto, foram observadas anomalias positivas de vazão na Amazônia Oriental (RONCHAIL et al., 2005). Assim, em anos extremos, podem aumentar as chances da ocorrência de inundações (COUTINHO et al., 2018).

Segundo Towner et al. (2020), existe outro fenômeno climático originado da interação oceano-atmosfera no Atlântico tropical chamado de Dipolo do Atlântico (DA), também constituído de fases positiva e negativa denominadas de Dipolo do Atlântico positivo (DA^+) e Dipolo do Atlântico negativo (DA^-). O DA^- é um evento climático formado pelo aquecimento das águas ao Sul do Atlântico tropical combinadas com o esfriamento das águas ao Norte do Atlântico tropical (NÓBREGA; SANTIAGO; SOARES, 2016). Towner et al. (2020) ainda ressaltaram que esta configuração térmica favorece o aumento da precipitação na região amazônica devido o fortalecimento da convecção do ar e o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) na direção Sul onde situa-se a Amazônia, uma vez que a

convecção do ar é um fator fundamental para formação de nuvens precipitantes, assim como a ZCIT é considerada o principal sistema atmosférico responsável pela recarga pluvial na Amazônia.

De acordo com Chaudhary e Piracha (2021), tais eventos naturais são classificados como desastres naturais quando há perdas humanas e de infraestrutura urbana, além disso os desastres naturais possuem suas respectivas categorias como climatológico (La Niña e DA^{-}), meteorológico (chuvas intensas) e hidrológico (cheias ou inundações). Para o melhor entendimento, é fundamental compreender as diferenças entre algumas definições de eventos hidrológicos. Cheias são o aumento da cota do rio sem o extravasamento do seu leito, quando o rio transborda até na área de várzea (zona de absorção da água pelo solo paralela ao rio) devido a uma grande quantidade de chuva denomina-se enchente (CASSOL; BOHNER, 2012; LICCO; MAC DOWELL, 2015). Contudo, esses mesmos autores reforçaram que se classifica como inundação quando o rio recebe grande volume de água pluvial ao ponto de transbordar e a área de várzea não absorver o excedente hídrico e a água invadir a zona urbana.

Entre os anos de 1991 e 2012, houve registros de aproximadamente 4.691 eventos de inundações no Brasil (ANDRADE et al., 2017). Os pesquisadores complementaram que, na região amazônica, existe uma elevada concentração de habitantes ao longo das margens dos rios, o que condiciona essas áreas expostas a perigos naturais e as torna vulneráveis a extremos hidroclimáticos (CHAUDHARY; PIRACHA, 2021). Esses processos naturais combinados às atividades antrópicas, como as dinâmicas inadequadas de ocupações da terra e mudanças no uso e cobertura do solo, podem estar causando alterações nos padrões hidrometeorológicos (MARENGO et al., 2018), intensificando a vulnerabilidade da população nos casos de inundações. Portanto, o mapeamento de inundações em áreas úmidas, tanto na duração quanto na extensão, apresenta-se como essencial ao monitoramento desses eventos. Para aumentar essa capacidade de monitoramento e visando subsidiar pesquisadores e tomadores de decisão com informações relevantes, tem-se utilizado o sensoriamento remoto por sensores de radar para mapear padrões de inundações sazonais (MANAVALAN et al., 2018).

Assim, tendo estabelecido que os extremos climáticos La Niña e DA^{-} contribuem para elevação da quantidade de chuvas e consequentemente para os eventos de inundações, é importante investigar a diferença dos efeitos desses fenômenos na precipitação e inundações

no arquipélago do Marajó. Moreira, Brito e Kobiyama (2021) sugeriram que não há estudos na literatura científica com esta abordagem, e isso fomenta pesquisas para elucidar esta lacuna. Além disto, sabe-se que o Marajó é marcado por inundações naturais (ALMEIDA; SPRANDEL, 2006; HENRIQUES, 2022). No entanto, Madashiru et al. (2021) relataram que há inundações fluviais provocadas pelo aumento natural do nível do rio, e também existem inundações pluviais influenciadas pelas chuvas. Então, como o Marajó é uma região marcada por inundações fluviais sazonais, é crucial para a gestão socioambiental entender a variabilidade espacial dessas inundações sob o efeito dos eventos de La Niña e DA^{-}.

Neste trabalho, é ressaltada a importância da análise temporal, principalmente em anos extremos onde a região amazônica é susceptível a influência de fenômenos climáticos. Neste sentido, objetivou-se analisar as diferenças de áreas de inundações em períodos influenciados por fenômenos climáticos indutores de chuva no arquipélago do Marajó.

2. METODOLOGIA

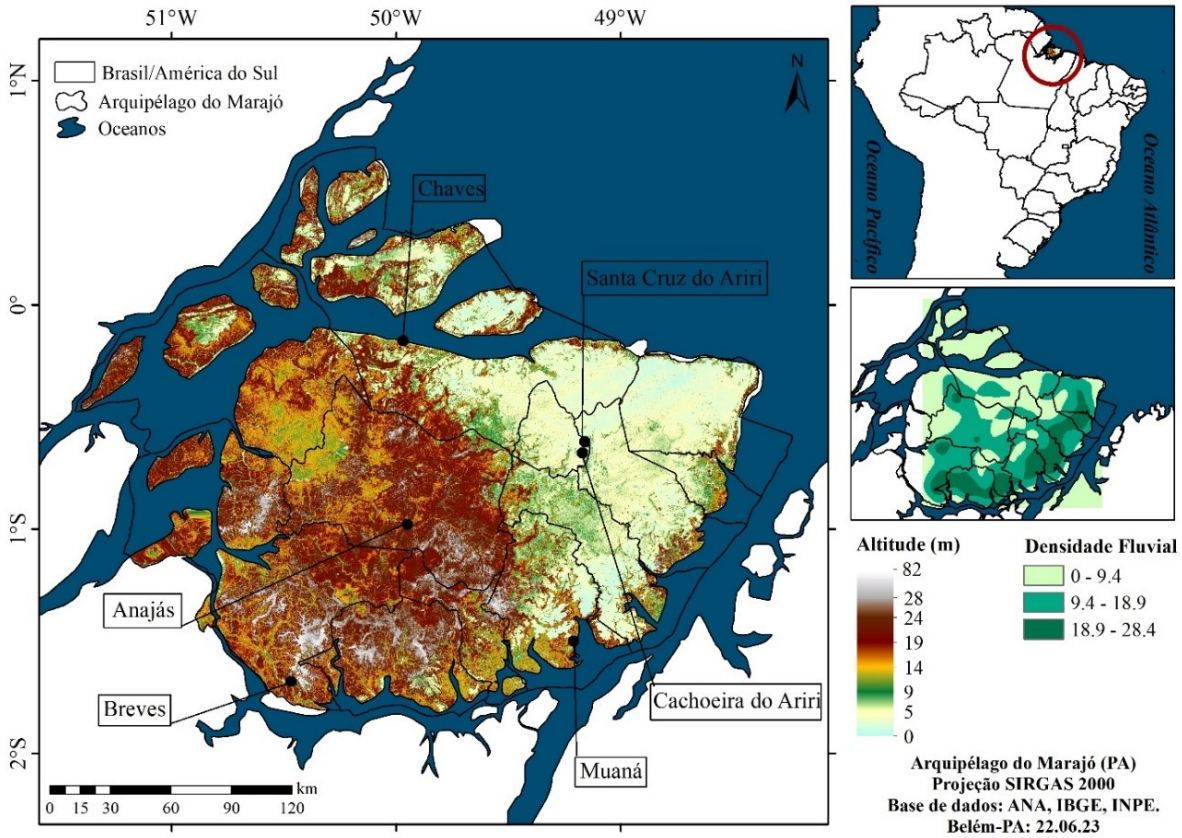
2.1. Área de estudo

O arquipélago do Marajó situa-se no estado do Pará, na Amazônia Setentrional (Fig. 1). A sua delimitação geográfica é o Oceano Atlântico (Norte) e o rio Pará (Leste e ao Sul), além de ser marcada por um sistema de drenagem com vários corpos d'água como rios e canais. Embora esses corpos d'água sejam de pequeno porte, a ilha do Marajó apresenta uma densidade fluvial elevada com os maiores valores (18,9 km/km^2 – 28,4 km/km^2) concentrando-se no setor Leste e Sul. A bacia do rio Arari tem vários cursos d'água conectados os quais são drenados em direção ao Atlântico e à Foz do Rio Amazonas. Por estarem localizados em áreas mais baixas, e também devido à baixa permeabilidade dos seus terrenos argilosos, a região do Marajó oriental é mais atingida com as cheias nos períodos chuvosos (LIMA et al., 2005).

O Marajó também é caracterizado pelas densas florestas amazônicas e extensos campos abertos (MAPBIOMAS, 2022), climatologia anual média (1991-2020) marcada por grandes volumes de precipitações (2.500 mm-4.000 mm), temperatura mínima e máxima do ar oscilando entre 24°C a 33 °C, evapotranspiração de 1.000-1.800 mm e velocidade do vento atingindo cerca de 2 m/s (LIMA et al., 2005; INMET, 2023).

A paisagem do arquipélago é composta por diversas variáveis geoambientais, no qual os terrenos mais elevados (19 m – 82 m) concentram-se no setor centro-leste do Marajó e as planícies (0 m – 14 m) predominam a parte Leste da ilha, local onde também está localizada a maior depressão do arquipélago, o lago Arari com cerca de 110 km^2 no seu menor nível.

Figura 1 – Localização da área de estudo: Arquipélago do Marajó.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Apesar de sua extensa área de 49.606 km² estar inserida no bioma amazônico, é muito clara a existência de uma subdivisão por características naturais incluindo vegetação, topografia e hidrografia. Para melhor compreensão deste trabalho, adotou-se a proposta de (LIMA et al., 2005) para a divisão das bacias hidrográficas do arquipélago, em duas regiões distintas: Marajó ocidental, com maior presença de florestas de terra firme e Marajó Oriental, em sua maioria formada por várzeas e campos naturais.

2.2. Aquisição de dados

A pesquisa estruturou-se em uma revisão bibliográfica para ratificar a lacuna na literatura científica sobre o tema mencionado. Deste modo, buscou-se reunir dados secundários referente a variáveis hidroclimáticas com a finalidade de destacar as forçantes naturais que potencializam os eventos de inundações e impactam a região do Marajó.

Obteve-se os índices climáticos (2010-2022) que representam as anomalias de TSM disponibilizados pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 2023). A Tab. 1 descreve os valores anômalos denominados de Atlântico Tropical Norte (ATN) e Atlântico Tropical Sul (ATS) usados para detectar o fenômeno climático DA^{-} e suas repectivas fases positivas e negativas. Também utilizou-se dados de indicadores climáticos do Pacífico tropical, o Índice Oceânico Niño (ION) para identificar a formação do La Niña no período de estudo descrito nas Tab. 2 e 3.

Tabela 1 – Anomalias mensais de TSM do At (ATN).

Atlântico Tropical Norte (ATN)												
Anos	**JAN**	**FEV**	**MAR**	**ABR**	**MAI**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SET**	**OUT**	**NOV**	**DEZ**
2010	0,80	1,07	1,27	1,40	1,35	1,11	1,01	0,97	0,75	0,77	0,70	0,96
2011	0,97	0,53	0,41	0,33	0,41	0,59	0,43	0,49	0,36	0,44	0,21	0,23
2012	0,16	-0,02	-0,26	-0,17	0,09	0,31	0,30	0,52	0,72	0,78	0,75	0,55
2013	0,44	0,40	0,70	0,53	0,64	0,32	0,34	0,56	0,61	0,66	0,32	0,27
2014	0,13	-0,08	-0,35	-0,21	-0,06	-0,05	0,14	0,23	0,51	0,56	0,35	0,34
2015	0,17	0,11	-0,11	-0,24	0,08	-0,07	0,16	0,43	0,72	0,93	0,49	0,42
2016	0,50	0,45	0,39	0,32	0,38	0,39	0,37	0,49	0,39	0,55	0,46	0,52
2017	0,49	0,23	0,13	0,47	0,58	0,60	0,60	0,67	0,52	0,45	0,53	0,54
2018	0,28	-0,09	0,02	-0,17	-0,40	-0,48	-0,21	0,01	0,33	0,29	-0,01	-0,04
2019	0,08	0,14	0,01	-0,02	0,12	0,30	0,37	0,42	0,57	0,44	0,19	0,22

Fonte: NOAA (2023a). Adaptado autores (2023).

Tabela 2 – Anomalias mensais de TSM do At (ATS).

Atlântico Tropical Sul (ATS)												
Anos	**JAN**	**FEV**	**MAR**	**ABR**	**MAI**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SET**	**OUT**	**NOV**	**DEZ**
2010	0,79	0,68	0,89	0,68	0,62	0,85	0,60	0,48	0,23	0,43	0,40	0,41
2011	0,45	0,59	0,72	0,49	0,30	0,20	0,27	0,20	0,24	0,28	-0,05	-0,48
2012	-0,32	-0,51	-0,08	-0,33	-0,04	0,04	-0,03	-0,08	0,02	0,03	0,03	0,18
2013	0,39	0,25	0,26	0,35	0,48	0,28	0,23	0,25	0,03	0,04	-0,07	0,11
2014	0,11	0,22	0,22	0,23	0,48	0,47	0,17	0,24	0,26	0,16	-0,32	-0,12
2015	0,43	0,42	0,23	0,36	0,46	0,38	0,07	-0,11	-0,04	0,28	0,37	0,70
2016	0,81	0,59	0,60	0,39	0,35	0,68	0,63	0,52	0,26	0,46	0,28	0,67
2017	0,58	0,09	0,29	0,40	0,47	0,57	0,35	0,59	0,27	0,42	0,20	0,17
2018	0,62	-0,01	0,17	0,28	0,28	0,46	0,38	0,41	0,36	0,53	0,39	0,66
2019	0,75	0,68	1,02	0,65	0,65	0,58	0,50	0,41	0,48	0,47	0,78	1,03

Fonte: NOAA (2023a). Adaptado autores (2023).

Tabela 3 – Indicador climático dos anos extremos: Pacífico tropical.

Índice Oceânico Niño (ION)												
Anos	**DJF**	**JFM**	**FMA**	**MAM**	**AMJ**	**MJJ**	**JJA**	**JAS**	**ASO**	**SON**	**OND**	**NDJ**
2014	-0,4	-0,5	-0,3	0,0	0,2	0,2	0,0	0,1	0,2	0,5	0,6	0,7
2015	0,5	0,5	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	1,9	2,2	2,4	2,6	2,6
2016	2,5	2,1	1,6	0,9	0,4	-0,1	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,6
2017	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	-0,1	-0,4	-0,7	-0,8	-1,0
2018	-0,9	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0,0	0,1	0,2	0,5	0,8	0,9	0,8
2019	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5
2020	0,5	0,5	0,4	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,6	-0,9	-1,2	-1,3	-1,2
2021	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,7	-0,8	-1,0	-1,0
2022	-1,0	-0,9	-1,0	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,9	-1,0	-1,0	-0,9	-0,8

Fonte: NOAA (2023a). Adaptado autores (2023).

As anomalias indicadas pelo ION representam a TSM da média de três meses contínua (Março, Abril e Maio), as quais sinalizam as variações térmicas (aquecimento/resfriamento) da superfície aquática de uma região do Pacífico tropical (NOAA, 2023a). Os fenômenos da interação oceano-atmosfera El Niño (fase quente) e La Niña (fase fria) são detectados quando há aumento ($\leq$ +0,5 °C: El Niño) ou diminuição ($\geq$-0,5 °C: La Niña) dos valores anômalos de ION permanecendo por 5 meses contínuos ou mais (GLANTZ; RAMIREZ, 2020; GONZALES; INGOL, 2021). Para identificar o fenômeno DA com suas fases positivas (DA^+) e negativas (DA^-), é preciso observar nas anomalias se existe uma diferença de TSM entre o ANT e o AST. Quando o ATN indicar aquecimento com a diferença de valores para o ATS iguais/superiores a 0,2 °C continuamente por quatro meses seguidos ou mais, é classificado como DA^+. Contudo, se houver resfriamento com a diferença entre o AST e ATN for igual/inferior a -0,2 °C por

quatro meses consecutivos ou mais, é denominado como DA^{-} (SOUZA; KAYANO; AMBRIZZI, 2005).

Para analisar a recarga pluviométrica da área de estudo, adquiriu-se dados de precipitação de estações pluviais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2023) levando em consideração o menor número de falhas nos registros em anos sob efeito de fenômenos climáticos conforme a Tab. 4.

Tabela 4 – Informações sobre as estações meteorológicas.

	Anajás	***Breves***	***Cachoeira do Ariri***	***Chaves***	***Muaná***	***Santa Cruz do Ariri***
				DA^{-} (2019)		
Medições	Estação 1a	Estação 2a	Estação 3a	Estação 4a	Estação 5a	Estação 6a
				La Niña (2021-2022)		
Medições	Estação 1b	Estação 2b	Estação 3b	Estação 4b	Estação 5b	Estação 6b

Fonte: ANA (2023). Adaptado autores (2023).

A espacialização pluviométrica foi obtida do produto *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS, 2023) com resolução espacial de 0,05° (~ 5 km).

2.3 Procedimentos

Obteve-se também produtos geoespacializados da TSM do Atlântico tropical e Pacífico tropical, os quais representam o período de atuação dos fenômenos climáticos em estudo para observar a configuração espacial e intensidade dos eventos (NOAA, 2023b). Analisou-se os anos extremos por meio dos seus indicadores e a variabilidade mensal da precipitação do mesmo período de atuação desses fenômenos climáticos para verificar seus efeitos. No caso dos eventos do ENOS, como são fenômenos que atuam na escala interanual e sua origem é relativamente distante da área de estudo, seus efeitos geralmente são observados até meses depois do seu término, especialmente na estação chuvosa amazônica do ano posterior ao seu início (SOUSA et al., 2015). Portanto, foram selecionados os anos de 2021 e 2022 para investigar o regime de chuvas sob a influência do La Niña de mesmo período. No caso do DA, como é um evento que ocorre geralmente na escala anual e oriundo no Atlântico tropical (próximo do Marajó), analisou-se somente o ano de 2019 (DA^{-}) (ÁVILA; SOUSA; PINHEIRO, 2013).

Para a observação temporal da precipitação nos anos extremos construiu-se figuras que representam a variabilidade ao longo dos meses. Entretanto, produziu-se mapas de chuva com a finalidade de mostrar a distribuição espacial da precipitação e se há mudanças em cada ano sob efeito dos fenômenos climáticos (GOMES et al., 2022; RODRIGUES, 2020). A espacialização pluviométrica foi feita com o mapeamento baseado no produto de Funk et al. (2015) através do Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Sensores SAR (Radar de Abertura Sintética) são sensíveis à variação ambiental e podem ser usados para monitoramento de áreas úmidas, especialmente quando não há disponibilidade de imagens de sensores ópticos em função da grande cobertura de nuvens na estação chuvosa. Este trabalho utilizou dados de séries temporais do SAR Sentinel 1 de banda C de dupla polarização a 5,405 GHz processados através da plataforma *Google Earth Engine* (GEE). A plataforma GEE disponibiliza cenas S1 *Ground Range Detected* (GRD), processadas usando o Sentinel-1 Toolbox para gerar um produto calibrado e orto-corrigido (SAR Sentinel 1, 2022). O *Earth Engine* usa as seguintes etapas de pré-processamento (conforme implementadas pelo Sentinel-1 Toolbox) para derivar o coeficiente de retrodifusão em cada pixel: remoção de ruído de baixa intensidade e dados inválidos nas bordas da cena, remoção de ruído térmico e aplicação de valores de calibração radiométrica. A abordagem do script fornecido por (UN-SPIDER, 2019) foi de detecção de mudanças comparando uma imagem antes e depois da ocorrência das cheias em cada período sazonal e em cada período selecionado para esse estudo (DA: 2019 – efeitos do DA^{-}; ENOS: 2021/2022 – efeitos de La Niña). Após levantamento de informações observacionais junto a moradores da região, foi selecionada a segunda quinzena de fevereiro como o ápice do período chuvoso.

Após o processamento pelo GEE, o script disponibiliza as imagens com uma estimativa das áreas inundadas para efeito de comparação antes e depois das cheias. Essas imagens depois foram exportadas para produzir os mapas das áreas de inundações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 2 ilustra a espacialização térmica das águas oceânicas nos períodos em que ocorreram as fases do DA^{-} e La Niña. No Atlântico tropical (Fig. 2a), observa-se no ano de 2019 (Fig. 2b) uma configuração térmica das águas diferente, a região Sul do Atlântico tropical

apresentou anomalias positivas de TSM (0° - 2,0°C), enquanto que a parte Norte do Atlântico tropical houve predominância de águas termicamente neutras, cenário de presença do fenômeno DA$^-$, fator favorável para a intensificação da convecção e aumento das chuvas na região. Embora a parte Norte do Atlântico tropical possua maior relação com o regime pluviométrico da bacia amazônica, registros científicos apontaram que o aquecimento do setor Sul do Atlântico tropical também contribui para a precipitação na Amazônia Setentrional, porém de maneira que favoreça o aumento das chuvas (YOON; ZENG, 2010), devido a incursão de umidade para o continente proveniente do mar (WANG et al., 2018a). Pesquisadores também observaram esta configuração térmica do DA$^-$ e comentaram que a diferença barométrica entre o Norte (maior pressão) e o Sul (menor pressão) do Atlântico tropical provoca fortalecimento dos ventos alísios de Nordeste e a atenuação dos ventos alísios de Sudeste, o que contribui para o deslocamento da ZCIT para o Sul (CABOS; VARA; KOSEKI, 2019) e consequentemente intensifica a convecção do ar e precipitação na região amazônica (WANG et al., 2018a; TOWNER et al., 2020).

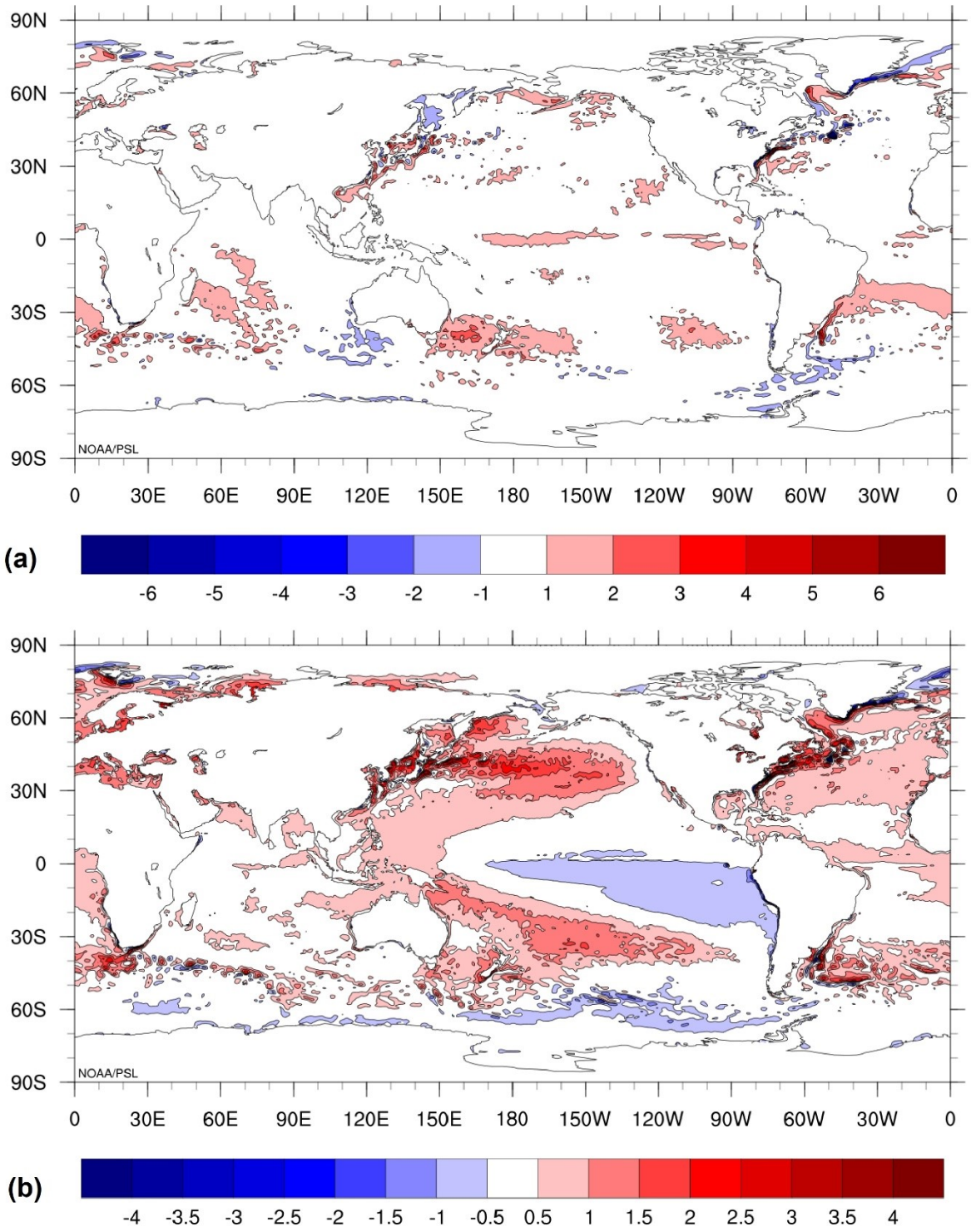
A variabilidade espacial térmica do oceano Pacífico tropical foi observada nos anos extremos de 2021 e 2022 (Fig. 2b). Observa-se na zona tropical do Pacífico as águas anomalamente frias (-0,5°C até -1,0°C) da região tropical do Pacífico (Fig. 2b) que ilustram a configuração térmica do fenômeno La Niña. Deste modo, os movimentos descendentes do ar neste setor contribuem para a alteração da circulação dos ventos e a intensificação das atividades convectivas do ar na região do Marajó. Este cenário favoreceu para um maior transporte da água para a atmosfera e formação de nuvens, consequentemente aumentando o regime pluviométrico no Marajó.

Gao et al. (2022) estudaram sobre o La Niña (2020-21) que antecedeu ao observado na Fig. 2b e suas descobertas sugeriram que forçantes remotas como o aquecimento da TSM do Pacífico tropical do Oeste não foram o suficiente para atenuar o resfriamento do Pacífico tropical do Leste. Este cenário possivelmente favoreceu a persistência desta condição térmica para a formação do La Niña (2021-22) seguinte. Hasan, Chikamoto e McPhaden (2022) também observaram e estudaram os eventos de La Niña seguidos de 2020-21 e 2021-22, nos quais atribuíram a sustentação e ocorrência consecutiva deste fenômeno climático a outros processos remotos como a interação oceano-atmosfera entre bacias oceânicas, ou seja,

influência remota de oscilações do oceano Atlântico e Índico na persistência de águas frias na região do Pacífico tropical.

Alguns trabalhos detectaram a formação de outros eventos de La Niña e seus efeitos no excedente de precipitação na região amazônica (SOUSA et al., 2015; GOMES et al., 2021), inclusive quebrando recordes de cheias extremas associadas ao La Niña (BARICHIVICH et al., 2018). Os impactos hidrometeorológicos do La Niña na Amazônia sempre foram pautas de relatos científicos de modo recorrente e geralmente obtiveram resultados semelhantes aos observados na ilha do Marajó, como por exemplo o aumento do volume de precipitação (SOUSA et al., 2015; GOMES et al., 2021; TOWNER et al., 2021).

Figura 2 – Configuração espacial das anomalias de TSM dos Oceanos Atlântico e Pacífico tropical: (a) DA$^-$ (2019) e (b) La Niña (2021-22).

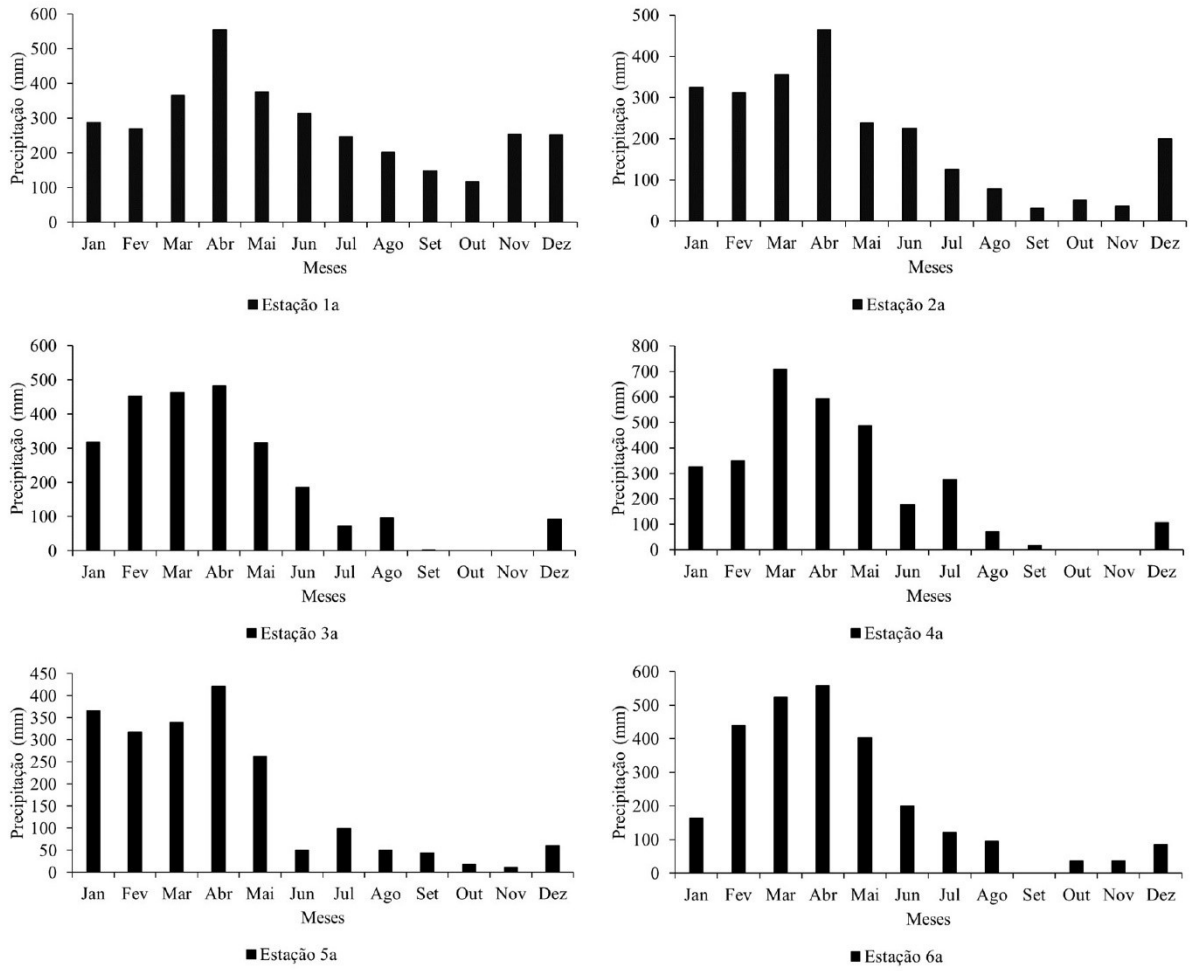


Fonte: Autor (2023).

A Fig. 3 ilustra o regime pluviométrico mensal do ano extremo relacionado ao DA$^-$. No ano de 2019, sob condições do acoplamento oceano-atmosfera que favoreceram a convecção regional, o volume de precipitação foi maior com o trimestre mais chuvoso nos meses de

Fevereiro, Março, Abril na estação 3a (452,0 mm; 464,0 mm; 482,6 mm), estação 6a (440,3 mm; 523,7 mm; 558,8 mm). Outro trimestre chuvoso em destaque foi nos meses de Março, Abril e Maio na estação 4a (707,0 mm; 593,1 mm; 488,0 mm). Entretanto, no ano de maior recarga pluvial o trimestre menos chuvoso ocorreu nos meses de Setembro, Outubro e Novembro na estação 3a (1,1 mm; 0,0 mm; 0,0 mm), estação 4a (17,7 mm; 0,0 mm; 0,0 mm), 5a (45,5 mm; 18,2 mm; 11,4 mm).

Figura 3 – Variabilidade mensal pluviométrica sob efeito do DA^{-} (2019): Arquipélago do Marajó.

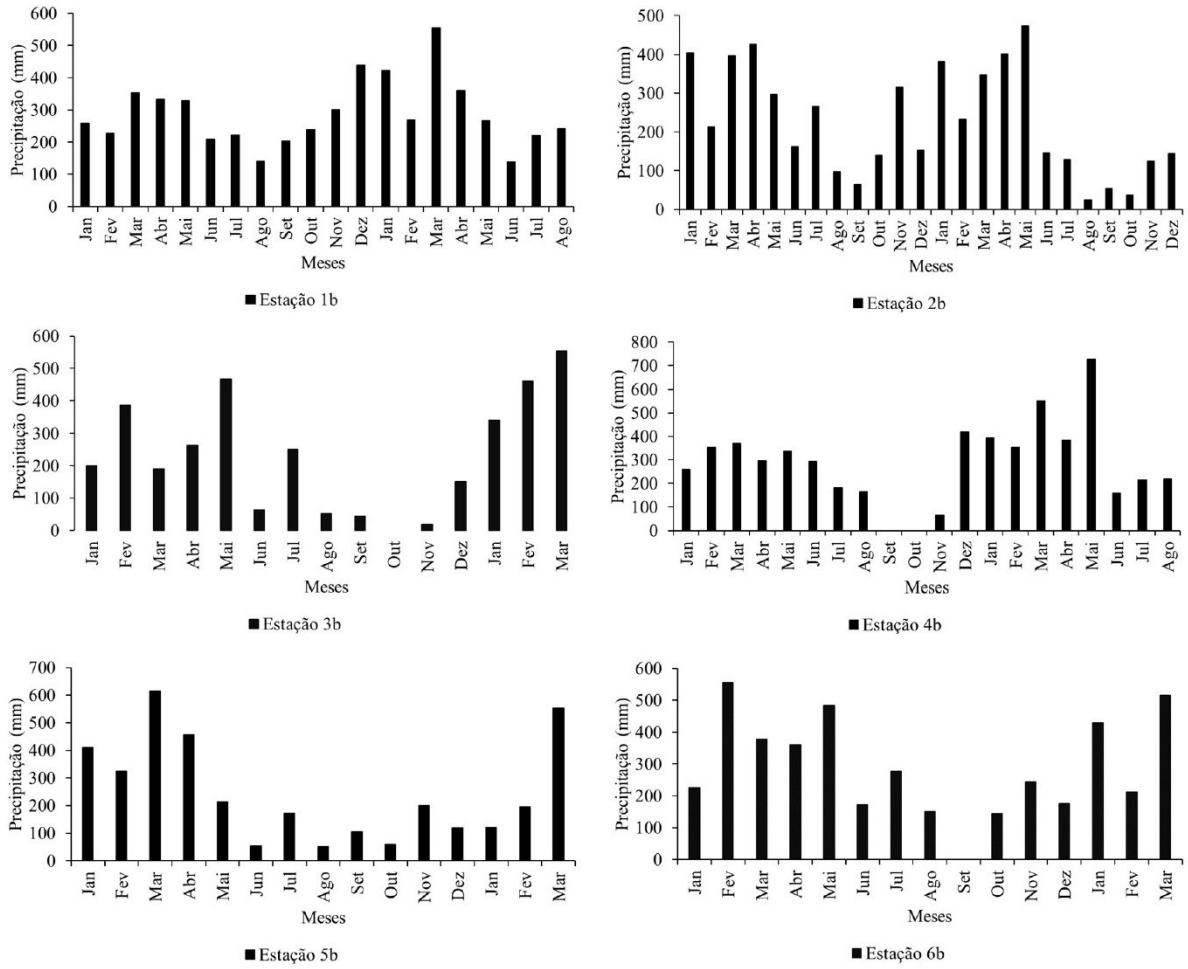


Fonte: Autor (2023). *Estação a = precipitação (DA^{-}).

A Fig. 4 apresenta a variabilidade interanual pluviométrica do ano extremo de 2021 e 2022, no qual observa-se a sazonalidade da precipitação bem definida em todos os pontos de observação. Os efeitos do La Niña intensificaram o aumento da precipitação em todos os postos pluviométricos, especialmente na época das chuvas quando se observa os trimestres mais chuvosos que ocorreram no ano 2022 no verão austral (Jan-Fev-Mar), como registrado

pela estação 3b (41,1 mm-460,3 mm-555,0 mm). Neste mesmo ano, o outono austral (Mar-Abr-Mai) foi marcado pelos maiores picos de chuva medidos pela estação 4b (551,1 mm-384,5 mm-727,5 mm). Vale destacar também que no ano de 2021, o trimestre mais chuvoso (Fev-Mar-Abr) foi observado na estação 5b (324,1 mm-614,4 mm-455,5 mm).

Figura 4 – Variabilidade interanual pluviométrica sob efeito do La Niña (2021-2022): Arquipélago do Marajó.

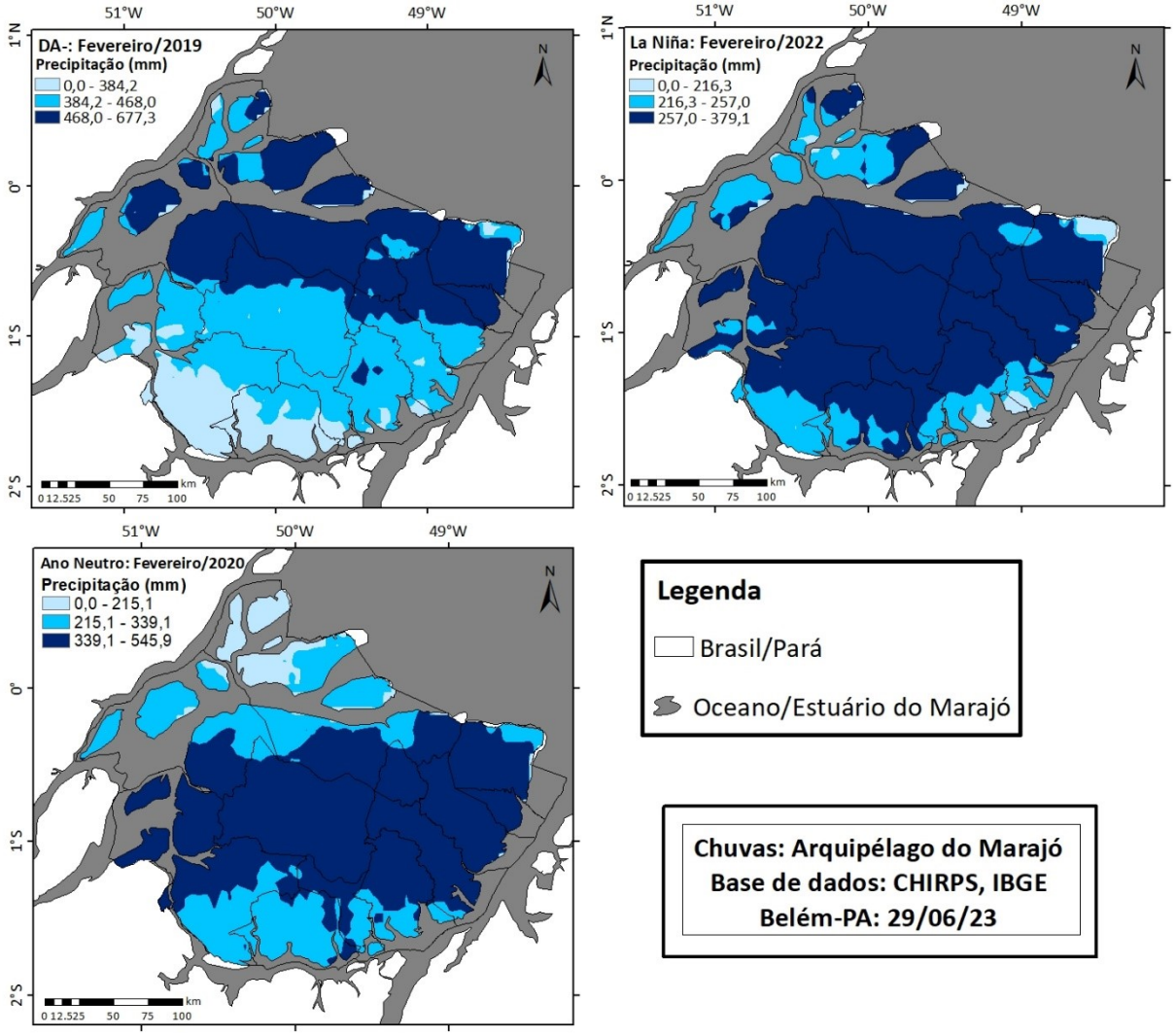


Fonte: Autor (2023). Estação a = precipitação (La Niña).

A variabilidade da precipitação nos anos extremos apresentou diferença espacial e temporal (Fig. 5). No período sob os efeitos do DA^{-} (2019), observou-se os menores volumes de chuva (0,0 mm-384,2 mm) na maior parte das áreas dos extremos Sul do arquipélago do Marajó como a região estuarina. A região do Marajó também foi marcada na faixa central e pontos à Noroeste pelo predomínio de um zoneamento pluviométrico mais elevado (384,2 mm-468,0 mm) neste ano de La Niña. Contudo, destaca-se a identificação de precipitação máxima (468,0 mm-677,3 mm) concentrada ao Norte.

A precipitação influenciada pelo La Niña (2021-2022) foi caracterizada pelos menores valores de chuva (0,0 mm-216,3 mm) pontuais no extremo Nordeste e Sudeste. O litoral Noroeste e Sul foram os setores marcados com uma maior recarga hídrica (216,3 mm-257,0 mm) no Marajó. Entretanto, observou-se a precipitação máxima (257,0 mm-379,1 mm) predominando na maior parte da ilha do Marajó.

Figura 5 – Precipitação espacial mensal em anos extremos: Arquipélago do Marajó.

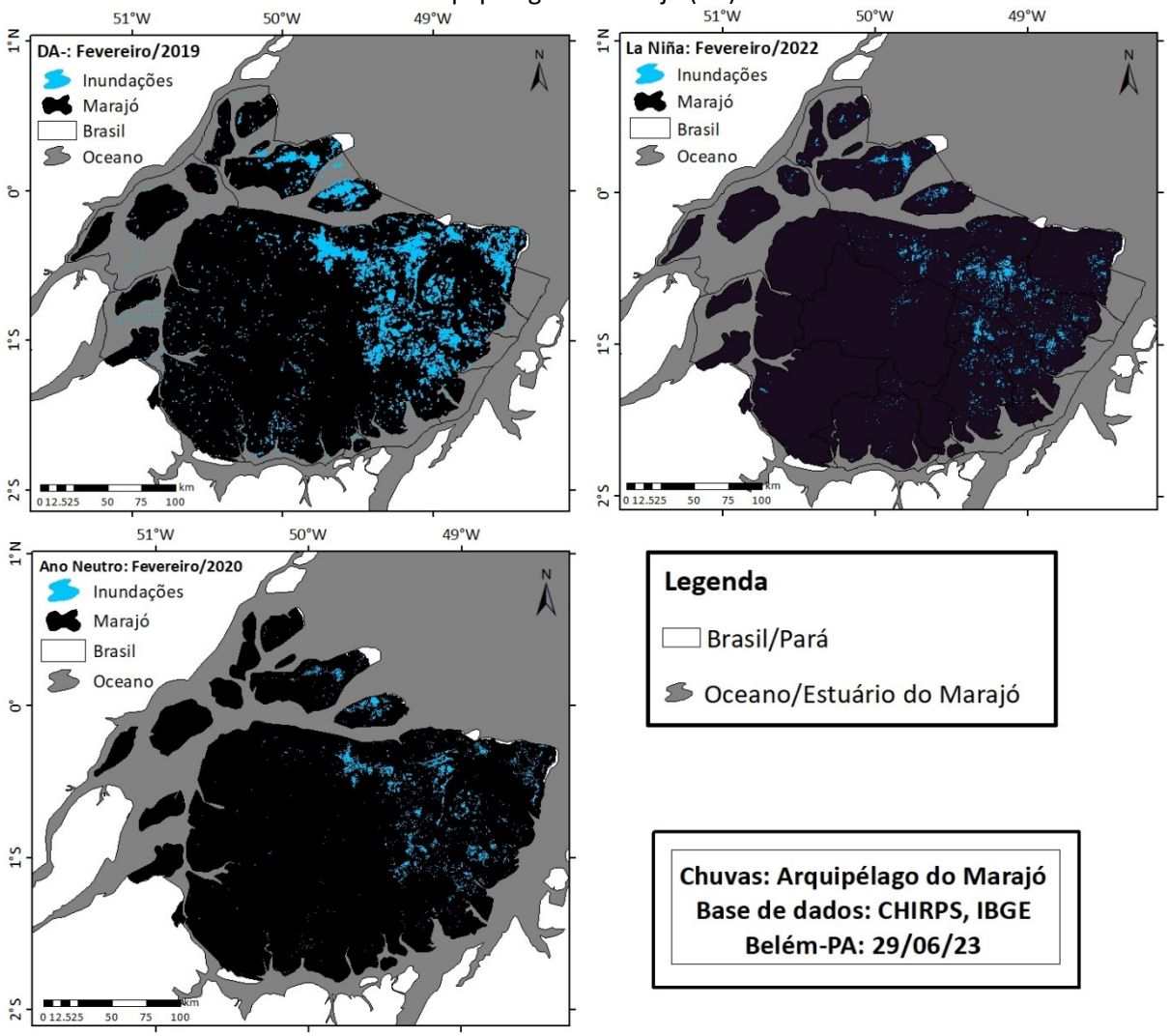


Fonte: Autor (2023).

A Fig. 6 apresenta o mapeamento de inundações em cenários distintos. No ano de 2019 influenciado pelo DA$^-$, observou-se áreas de inundações com aproximadamente 1.434,9 km^2. No entanto, o período (2021-22) afetado pelo fenômeno La Niña foi detectado com maiores áreas de inundações que atingiram em torno de 278,2 km^2. Todos os municípios do Arquipélago sofreram com alguma ocorrência de áreas inundadas nos distintos cenários

hidroclimáticos, porém, em São Sebastião da Boa Vista somente foi observado maiores áreas de inundações no período do La Niña.

Figura 5 – Mapeamento das cheias em períodos de eventos DA$^-$ (2019) e La Niña (2021-2022) no arquipélago do Marajó (PA).



Fonte: Autor (2023).

Mansur et al. (2016) avaliaram a vulnerabilidade à inundação de uma região do Marajó considerando a sua exposição e indicaram que 27 % da população do município de Ponta Pedras (Nordeste do Marajó) apresentou alto grau de vulnerabilidade, o que corrobora com os resultados da Fig. 6 na qual mostra o setor Sudeste da ilha do Marajó com grandes áreas inundadas, inclusive em Ponta de Pedras com grandes áreas inundadas sob efeito do La Niña e especialmente no ano de DA$^-$. Em Santarém, as inundações sazonais também são recorrentes com índices de vulnerabilidade (moderado e alto) preocupantes, porém, medidas de atenuação dos impactos da inundação como a criação de estruturas físicas adaptadas a

essas condições ambientais, assim como preparar melhor a população local para esses eventos naturais (ANDRADE; SZLAFSZTEIN, 2018).

As mudanças climáticas podem estar relacionadas à intensificação de eventos extremos como a inundação. Inundações históricas ocorreram no rio Amazonas em 2021 e tais eventos estão relacionados ao La Niña (ESPINOZA et al., 2022), assim como ilustra a Fig. 6. No ano de 2021 (La Niña) houve registros pelo Sistema Integrado de Informações sobre Desastres Naturais (S_2iD, 2022) de inundações no município de Salvaterra (Nordeste do Marajó) com danificações habitacionais, fato ratificado pelas áreas inundadas como mostra o mapeamento deste trabalho. Vale ressaltar o quanto a região do Marajó é susceptível a extremos hidroclimáticos, uma vez que entre os anos de 2018 e 2020 foram identificados pelo S_2iD (2022) 8 episódios de inundações nos municípios de Cachoeira do Ariri, Chaves, Soure, Santa Cruz do Ariri. De acordo com os mapas, todas essas localidades tiveram áreas inundadas, com destaque para o ano de 2019, quando o DA^- contribuiu significativamente para a ocorrência desses desastres naturais.

Nos anos analisados, embora as maiores precipitações em Fevereiro de 2019 (DA^-) tenha uma distribuição espacial menor em relação ao observado no mesmo mês em 2022 (La Niña), o mapeamento pluviométrico mostrou que as chuvas afetadas pelo DA^- foram muito maiores, o que possivelmente contribuiu para o aumento de áreas inundadas neste período. Assim, os riscos climáticos na região do Marajó são evidentes, como foram estudados por Lima et al. (2020), fatos que corroboraram com os resultados observados no mapa, especialmente no período sob efeito do La Niña, período em que as inundações estão mais propícias a ocorrer com maior intensidade. Os pesquisadores ainda destacaram a respeito da vulnerabilidade socioambiental da região do Delta Amazônico frente a variabilidade climática, onde alegaram que a população de Ponta de Pedras (Sudeste do Marajó) está exposta a inundações devido a ocupação inadequada em terras baixas, além da carência de investimentos e serviços voltados a infraestrutura no setor de saneamento básico.

Tais evidências são preocupantes quando comparadas com os resultados obtidos neste trabalho, pois no período afetado pelo La Niña, há inundações em vários pontos no município de Ponta de Pedras, especialmente ao Norte. O uso e cobertura da terra desta região de áreas inundadas estão sob o domínio do pasto natural (MAPBIOMAS, 2022). Contudo, de acordo com a delimitação da rede de drenagem do Marajó (LIMA et al., 2005),

muitos rios estão associados a essas áreas inundadas no período impactado pelo La Niña observadas neste trabalho, além de situarem em regiões com alta disponibilidade hídrica de acordo com os autores.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do processamento SAR foi satisfatório na detecção de áreas inundadas na região do Marajó. As maiores extensões de áreas inundadas ocorreram no setor Leste do Marajó, cenário alarmante para os municípios desta região, uma vez que é a parte da ilha onde há a maior concentração de habitantes.

O arquipélago do Marajó apresentou indícios de suscetibilidade aos extremos climático DA^- e La Niña, com destaque para o DA^-, possivelmente devido a maior proximidade do Atlântico tropical com a área de estudo. Embora os fenômenos climáticos possam impactar de diferentes maneiras sob a perspectiva de área afetada, o DA^- apresentou-se como ameaça natural potencialmente mais perigosa, pois o tamanho da área inundada é pelo menos cinco vezes maior em relação ao período influenciado pelo La Niña.

Este cenário de maior inundação no ano de 2019 (DA^-), especialmente na parte Oriental, está muito relacionado com a maior recarga pluvial neste período combinado com as condições ambientais presentes na região como planícies marcadas por área de várzea em campos abertos e maior densidade fluvial.

O mapeamento de inundação mostrou a influência do DA^- e La Niña em uma região naturalmente úmida associados a exposição dos habitantes, especialmente os locais ribeirinhos, o que levanta questionamentos sobre o quanto a população regional está sob risco climático. A análise de tais eventuais perigos naturais podem contribuir na prevenção e minimização dos impactos negativos nos aspectos socioeconômicos locais em anos extremos, como destruição da infraestrutura urbana e perdas humanas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. W. B.; SPRANDEL, M. A. Palafitas do Jenipapo na ilha de Marajó: a construção da terra, o uso comum das águas e o conflito. **Novos Cadernos NAEA**, v. 9, n. 1, p. 25-76, 2006.

ANDRADE, M. M. N. et al. **Flood risk mapping in the Amazon**. London: InTechOpen, 2017. E-book.

ANDRADE, M. M. N.; SZLAFSZTEIN, C. F. Vulnerability assessment including tangible and intangible componentes in the index composition: An Amazon case study of flooding and flash flooding. **Science of the Total Environmental**, v. 630, p. 903-912, 2018.

ÁVILA, P. L. R.; SOUZA, E. B.; PINHEIRO, A. N. Simulação da precipitação sazonal com o Regcm4 sobre o estado do Pará para anos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 5, p. 1316-1335, 2013.

BARICHIVICH, J. et al. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. **Science Advances**, v. 4, n. 9, p. 1-7, 2018.

CABOS, W.; VARA, A.; KOSEKI, S. Tropical Atlantic variability: observations and modeling. **Atmosphere**, v. 10, n. 9, p. 1-25, 2019.

CASSOL, P. B.; BOHNER, T. O. L. Cheia, enchente, inundação e a minimização dos seus impactos sob o olhar da educação ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 5, n. 5, p. 648-652, 2012.

CHAUDHARY, M.; PIRACHA, A. Natural disaster – Origins, impacts, management. **Encyclopedia**, v. 1, n. 4, p. 1101-1131, 2021.

CHIRPS. *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations*. **Climate Hazard Center – UC Santa Bárbara**. Disponível: https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_annual/tifs/. Acesso: 11/04/2023.

COUTINHO, E. C. et al. Variabilidade climática da precipitação na bacia Amazônica brasileira entre 1982-2021, **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 476-500, 2018.

DRISCOLL, K. P.; HAUER, F. R. Seasonal flooding affects habitat and landscape dynamics of a gravel-bed river floodplain. **Freshwater Science**, v. 38, n. 3, p. 510-526, 2019.

ESPINOZA, J. C. et al. The new historical flood in the Amazon River compared to major floods of the 21st century: atmospheric features in the contexto of the intensification of floods. **Weather and Climate Extremes**, v. 35, p. 1-12, 2022.

FOLEY, J. A. et al. M. H. El Niño-Southern Oscillation and climate, ecosystems and rivers of Amazonia, **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, n. 4, p. 1-17, 2002.

FUNK, C. et al. J. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 150066, 2015.

GAO, C. et al. The 2020-2021 prolonged La Niña Evolution in the tropical Pacific. **Science China Earth Sciences**, v. 65, p. 2248-2266, 2022.

GLANTZ, M. H.; RAMIREZ, I. J. Reviewing the Oceanic Niño Index (ONI) to Enhance societal readiness for El Niño's impacts. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 11, p. 394-403, 2020.

GOMES, D. J. C. et al. Estimativa de precipitação dos dados CHIRPS e GPCC em anos de extremos climáticos, bacia hidrográfica do rio Guamá-PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 3, p. 1583-1598, 2022.

GONZALES, E.; INGOL, E. Determination of a new coastal ENSO oceanic index for Northern Peru. **Climate**, v. 9, n. 5, p. 1-23, 2021.

HASAN, N. A.; CHIKAMOTO, Y.; MCPHADEN, M. J. The influence of tropical basin interactions on the 2020-2022 double-dip La Niña. **Frontiers in Climate**, v. 4, 1-13, 2022.

HENRIQUES, R. J. **Geoambientais, geoarqueologia e cenários de mudanças climáticas na ilha de Marajó, Amazônia Brasileira**. 2022. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais-MG, 2022. Disponível: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/53904. Acesso: 08/01/23.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia - **Normais Climatológicas**. Disponível: https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/19611990/precipitacao_acumulada_mensal_anual. Acesso: 19/05/2023.

LICCO, E. A.; MAC DOWELL, S. F. Alagamentos, Enchentes, Enxurradas e Inundações: Digressões sobre seus impactos sócio econômicos e governança. **Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística**, v. 5, n. 3, p. 159-174, 2015.

LIMA, A. C. B. et al. Climate hazards in small and medium cities in the Amazon Delta and Estuary: challenges for resilience, **Environmental and Urbanization**, v. 32, n. 1, p. 195-212, 2020.

LIMA, A. M. M. et al. Ilha do Marajó: revisão histórica, hidroclimatologia, bacias hidrográficas e propostas de gestão, **HOLOS Envionmental**, v. 5, n. 1, p. 65-80, 2005.

MAPBIOMAS. **Coleção 8 da série anual de uso e cobertura do solo do Brasil**. Disponível: https://mapbiomas.org/. Acesso: 11/10/2022.

MANAVALAN, R. Review of synthetic aperture radar frequency, polarization, and incidence angle data for mapping the inundated regions. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 12, n. 2, p. 1-15, 2018.

MANSUR, A. V. et al. An assessment of urban vulnerability in the Amazon Delta and Estuary: a multi-criterion index of flood exposure, socio-economic conditions and infrastructure. **Sustainability Science**, v. 11, p. 625-643, 2016.

MARENGO, J. A. et al. Changes climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends, **Frontiers in Earth Science**, v. 6, n. 228, p. 1-21, 2018.

MOREIRA, L. L.; BRITO, M. M.; KOBIYAMA, M. Review article: A systematic review and future prospects of flood vulnerability indices. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 21, n. 5, p. 1513-1530, 2021.

MROZ, E. J. **Incorporating seasonal flooding into frameworks modelling geographical access to health services. Doctoral dissertation** - Faculty of Environment, University of Leeds, 2021. Disponível: https://etheses.whiterose.ac.uk/29785/. Acesso: 17/02/2023.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **El Niño Southern Oscillation (ENSO) – Cold & Warm Episodes by Season**. Dispoível: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php Acesso: 10/05/2023a.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Gridded Climate - OI SST V2 High Resolution Dataset**. Disponível: https://psl.noaa.gov/mddb2/makePlot.html?variableID=4113. Acesso: 15/04/2023b.

NÓBREGA, R. S.; SANTIAGO, G. A. C. F.; SOARES, D. B. Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 276-292, 2016.

RODRIGUES, J. M. Espacialização das chuvas em uma bacia hidrográfica no semiárido da Paraíba. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 6, n. 1, p. 28-35, 2020.

RONCHAIL, J. et al. Discharge variability within the Amazon basin. **Regional Hydrological Impacts of Climate Changes-Hidroclimatic Variability**, v. 296, p. 21-30, 2005.

SAR. Sentinel-1 SAR. **Technical Guide**. Disponível online: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar. Acesso: 11/10/2022.

Sistema Integrado de Informações sobre Desastres Naturais (S_2iD). **Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil**. Disponível: https://s2id.mi.gov.br/paginas/series/. Acesso: 11/10/2022.

SOUSA, A. M. L. et al. Variabilidade espaço-temporal da precipitação na Amazônia durante eventos ENOS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 1, p. 13-24, 2015.

SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; AMBRIZZI, T. Intraseasonal and submonthly variability over the eastern Amazon and northeast Brazil during the autumn rainy season. **Theorical and Applied Climatology**, v. 81, n. 3/4, p. 177-191, 2005.

UN-SPIDER 2019: United Nations - Space based information for Disaster Management and Emergency Response (UN-SPIDER). **n.d.** ***Recommended Practice for Flood Mapping***. Disponível: https://www.un-spider.org/advisory-support/recommended practices/recommended-practice-flood-mapping/in-detail. Acesso: 17/01/2023.

TOWNER, J. et al. Attribution of Amazon floods to modes of climate variability: a review. **Meteorological Applications**, v. 27, n. 5, p. 1-36, 2020.

TOWNER, J. et al. Influence of ENSO and tropical Atlantic climate variability on flood characteristics in the Amazon basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, p. 3875-3895, 2021.

VAN STAVEREN, M. F.; VAN TATENHOVE, J. P. M.; WARNER, J. F. The tenth dragon: controlled seasonal flooding in long-term policy plans for the Vietnamese Mekong delta. **Journal of Environmental Policy & Planning**, v. 20, n. 3, p. 267-281, 2018.

WANG, X. et al. The strengthening of Amazonian precipitation during the wet season driven by tropical sea surface temperature forcing. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 9, p. 1-11, 2018a.

WANG, Y. et al. The effects of the reverse seasonal flooding on soil texture within the hydro-fluctuation belt in the Three Gorges reservoir, China. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, n. 1, p. 109-115, 2018b.

YOON, J.; ZENG, N. An Atlantic influence on Amazon rainfall. **Climate of Dynamic**, v. 34, p. 249-264, 2010.

YUN, K.; TIMMERMANN, A.; STUECKER, M. F. Synchronized spatial shifts of Hadley and Walker circulations. **Earth System Dynamics**, v. 12, p. 121-132, 2021.