

ANÁLISE COMPARATIVA DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS DE 2008, 2013 E 2022 NA ESTAÇÃO ECOLÓGICA DO TAIM PELA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES HÍDRICAS, CLIMÁTICAS E GEOMORFOLÓGICAS

Ananda Müller Postay de Lima

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Geografia – POSGEA, Porto Alegre, RS, Brasil, nandapostay@gmail.com

Tainã Costa Peres

Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Instituto de Ciências Humanas – Departamento de Geografia, Pelotas, RS, Brasil, tainacperes@gmail.com

Francisco Eliseu Aquino

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Geografia – POSGEA, Centro Polar e Climático – CPC, Porto Alegre, RS, Brasil, francisco.aquino@ufrgs.br

RESUMO

O objetivo deste artigo é apresentar uma análise comparativa dos principais registros de incêndios florestais ocorridos na ESEC Taim após sua definição como unidade de conservação. Para tanto, este trabalho propõe utilizar imagens de satélite para identificar as áreas de incêndios florestais, aplicar o método NDVI para avaliá-los, analisar as condições climáticas por meio da precipitação e identificar as anomalias de precipitação dos últimos 22 anos, considerando os meses e estações de ocorrência dos incêndios. Os resultados identificaram que, em 2008, 51,22% da área total queimada atingiu o Taim; em 2013, 65,47%; e em 2022, 98,52%. Quanto às anomalias de precipitação, todos os meses e estações em que ocorreram incêndios florestais registraram anomalias negativas de precipitação. Entre os meses em que ocorreram incêndios florestais, dezembro de 2022 registrou o maior valor negativo. Entre as estações, o verão de 2008 foi o que registrou a maior anomalia negativa de precipitação. Verificou-se que todos os fenômenos estavam ligados à La Niña e ao SAM positivo, fatores que possibilitaram a ocorrência de estiagem e o consequente favorecimento de incêndios florestais na região.

Palavras-chave: Merge. Banhado. Estiagem. Anomalia. Ramsar.

COMPARATIVE FOREST FIRE ANALYSIS OF THE 2008, 2013 AND 2022 AT THE TAIM ECOLOGICAL STATION BY EVALUATING WATER, CLIMATE AND GEOMORPHOLOGICAL CONDITIONS

ABSTRACT

This article aims to present a comparative analysis of the largest forest fires recorded in the ESEC Taim since its designation as a Conservation Unit. The work uses satellite images to identify areas affected by forest fires and applies the NDVI method to evaluate them. It also analyzes climatic conditions through precipitation, identifies precipitation anomalies over the last 22 years, considering the months, and seasons when fires occurred. The results showed that, in 2008, 51.22% of the total burned area was in Taim; in 2013, this figure was 65.47%; and in 2022, it was 98.52%. Regarding precipitation anomalies, all months and seasons in which forest fires occurred recorded negative anomalies. Among these months, December 2022 recorded the highest negative value. Regarding the seasons, summer 2008 recorded the greatest negative precipitation anomaly. It was found that all these phenomena were linked to La Niña and positive SAM, which made droughts possible and consequently encouraged burning in the region.

Keywords: Merge. Wetland. Drought. Anomaly. Ramsar.

INTRODUÇÃO

As áreas úmidas (AUs) são importantes ecossistemas com amplitude de distribuição global. Estão presentes em regiões com climas heterogêneos e condições geomorfológicas distintas (Cunha; Piedade; Junk, 2015). Diante de sua diversidade ambiental e de sua presença em várias regiões, as definições científicas se restringem a cada localidade em que se encontram. A variedade de conceituações científicas sobre suas

características resultou em uma complexidade de definição geral que poderia beneficiar a proteção dos ecossistemas. Diante dessa complexidade, apresenta-se a Convenção de Ramsar como um mecanismo internacional para a proteção das AUs. Trata-se de um tratado intergovernamental da Unesco que propõe a proteção ambiental de AUs em várias partes do globo. Segundo a convenção, "AU são áreas de diferentes tipos de pântanos, brejos, turfeiras ou de água rasa, tanto naturais quanto artificiais, permanentes ou temporárias, doces, salobras ou salinas, incluindo áreas marinhas até uma profundidade de seis metros durante a maré baixa" (UNESCO, 1971, p. 2).

O Brasil, país de extensão continental, possui diferentes tipos de AUs, com denominações e definições que esbarram em fatores regionais. Essas diferenciações tornam-se um fator complexo para garantir a proteção dessas áreas, principalmente conforme as definições da legislação ambiental nos níveis federal, estadual e municipal. De acordo com a Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012, Capítulo I, Art. 3º, Inciso XXV, a definição de AU é a seguinte: "Áreas úmidas: pantanais e superfícies terrestres cobertas de forma periódica por águas, originalmente cobertas por florestas ou outras formas de vegetação adaptadas à inundação". Além disso, Cunha, Piedade e Junk (2015) também definem AU como:

Áreas Úmidas (AUs) são ecossistemas na interface entre ambientes terrestres e aquáticos, continentais ou costeiros, naturais ou artificiais, permanentemente ou periodicamente inundados por águas rasas ou com solos encharcados, doces, salobras ou salgadas, com comunidades de plantas e animais à sua dinâmica hídrica (Cunha; Piedade; Junk, 2015, p. 37).

No Rio Grande do Sul (RS), Brasil, segundo dados de 2024 do Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC) do Ministério do Meio Ambiente (MMA), há 97 unidades de conservação. Dessas, 10 são de proteção federal, 29 de proteção estadual, 23 de proteção municipal e 35 são reservas particulares do patrimônio natural. Conhecidas regionalmente como banhados, as AUs do RS são ecossistemas de relevância ambiental protegidos por meio de UC.

Ao se dar enfoque ao aprofundamento do conhecimento acerca das AUs, destaca-se a necessidade de se compreender a influência dos fatores climáticos, atualmente diretamente associados à segurança de áreas ambientais sensíveis, como os banhados do RS. É necessário também entender a dinâmica dos banhados conforme a variabilidade climática e os eventos extremos. A mudança climática, que possivelmente potencializa fenômenos naturais, pode ocasionar impactos devastadores, como incêndios florestais causados por raios (Marchesan et al., 2020).

Os dados de precipitação disponíveis em bancos de dados, como os dados MERGE/GPM, são de fácil acesso para os pesquisadores, principalmente quando há limitações econômicas para a pesquisa científica em países do Hemisfério Sul (HS), como o Brasil, que carece de infraestrutura para o monitoramento hídrico e climático. Analisar o comportamento da precipitação pode auxiliar na compreensão de fenômenos naturais, como as anomalias de precipitação, que podem ocasionar estiagens.

Além disso, os modos de variabilidade climática são fenômenos característicos, como as tele conexões climáticas, que causam alterações na distribuição das chuvas em todo o globo e, conseqüentemente, podem modificar distintamente o volume de precipitação ao provocar aumentos ou diminuições significativas. No Rio Grande do Sul (RS), os fenômenos El Niño Oscilação Sul (ENSO) e Modo Anular do Hemisfério Sul/Oscilação Antártica (SAM/AAO) conseguem causar oscilações nos padrões médios de precipitação (Cai et al., 2020; Aquino, 2012; Silvestri; Vera, 2003). Portanto, incêndios florestais naturais e antrópicos podem ser potencializados por alterações anômalas nos padrões de precipitação. Essa situação pode ocorrer em todo o Brasil, principalmente na Amazônia e no Pantanal (Alves; Alvarado, 2020).

O Taim registrou incêndios florestais de grandes proporções territoriais, com diferentes intensidades e durações. Nascimento, Teixeira e Alonso (2021) e Braz et al. (2015) analisaram os eventos de 2008 e 2013 e observaram que houve uma tendência de focos de calor nos meses da primavera e do verão, principalmente em dezembro e em janeiro. A precipitação e as condições atmosféricas foram fatores significativos nessas análises, ao favorecerem a ocorrência de incêndios florestais. Entretanto, existem outros elementos que carecem de maior embasamento diante da abordagem elaborada pelos autores. Observa-se, portanto, a necessidade de avaliar fenômenos climáticos e de monitorar o meio ambiente, como um mecanismo de reflexão sobre possíveis ações por parte dos gestores e das universidades acerca da região de estudo.

Diante disso, o objetivo do estudo foi comparar os principais incêndios florestais registrados na Estação Ecológica do Taim (ESEC Taim) desde que se tornou uma unidade de conservação (UC). Para tanto, foram comparados os eventos de incêndios florestais em 2008, 2013 e 2022. Analisaram-se as condições hídricas por meio de anomalias de precipitação, a influência do ENSO e do SAM na Planície Costeira Sul, a área

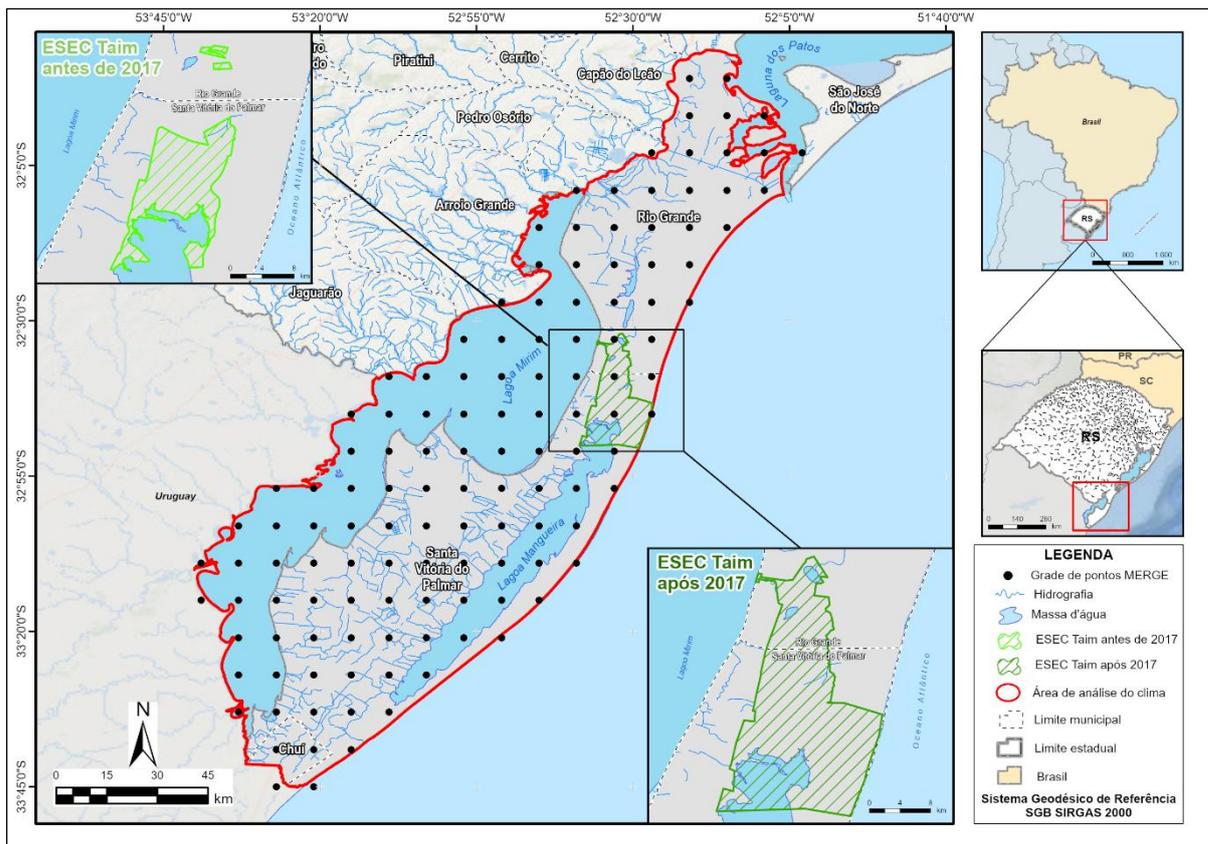
impactada pelo incêndio florestal estimada por meio de imagens de sensoriamento remoto (conhecidas popularmente como imagens de satélite) e a avaliação dessas imagens com o uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende a ESEC Taim (polígono verde hachurado no mapa da Figura 1) e está localizada nos limites da Costa Sul da PCRS. A UC de PI foi instituída pelo Decreto n.º 92.963, de 21 de julho de 1986, do governo federal. Ela está localizada entre Rio Grande e Santa Vitória do Palmar (RS, Brasil), e seus limites territoriais ficam entre a Lagoa Mangueira ao norte, a Lagoa Mirim a leste, o Oceano Atlântico a oeste e campos para pasto e agricultura ao sul. Inicialmente, a ESEC Taim foi instituída com uma área de 10.764,64 hectares, mas, após a publicação do Decreto s/n, de 5 de junho de 2017, sua área foi ampliada para 32.797 hectares.

Atualmente, é administrada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) e, desde 2017, enquadra-se como um Sítio Ramsar, devido à sua relevância ambiental em relação à fauna e à flora. De acordo com o Plano de Manejo da ESEC Taim, aprovado pela Portaria n.º 712, de 8 de novembro de 2021, no Diário Oficial da União, o Taim possui uma vasta área úmida, sendo um ecossistema de alto valor de diversidade biológica e de conservação do equilíbrio ecológico, ao abrigar um número considerável de espécies, como a avifauna, a ictiofauna, a herpetofauna e a mastofauna.

Figura 1 - Localização da área de estudo: Planície Costeira Sul e ESEC Taim, 2024



Fonte: Limites territoriais – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2021; Limite ESEC Taim – ICMBio, 2020; Hidrografia e massa d'água - Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul (SEMA-RS), 2018; Grade de pontos MERGE – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), 2023; Área de estudo – os autores, 2024. Elaboração: os autores, 2024.

A ESEC Taim é composta pelo Banhado do Taim e pela Ilha do Taquari e compreende um ambiente lacustre, fluvial e praiado. Por estar localizada entre ambientes sensíveis, de dinâmica ativa e inter-relacionados, abriga um ecossistema capaz de comportar habitat natural para diversas espécies de fauna.

Para o estudo das condições hídricas e da precipitação, a área de análise do clima da Costa Sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) (polígono vermelho no mapa da Figura 1) é a região de interesse. A PCRS está localizada entre os municípios de Rio Grande, Santa Vitória do Palmar e Chuí, sendo limitada, em sua total extensão, pela Lagoa Mirim, na divisa entre Brasil e Uruguai. Ela se estende por cerca de 243 km, com uma área de 11.950,54 km².

METODOLOGIA

A metodologia é apresentada conforme os tópicos identificados nesta seção. A partir de cada etapa de desenvolvimento do estudo, são informados os métodos, procedimentos e técnicas aplicados para atingir o objetivo principal.

Definição dos incêndios florestais na ESEC Taim por imagens de satélite

As extensões territoriais dos incêndios florestais ocorridos nos períodos analisados foram mencionadas nos estudos de Nascimento, Teixeira e Alonso (2021), Braz et al. (2015), bem como em jornais e noticiários do Grupo RBS. Entretanto, não foi possível encontrar dados ou recursos que especificassem a área de cada incêndio. O recurso disponibilizado por meio de imagem de satélite serviu como principal ferramenta para estimar as áreas afetadas espacialmente pelos incêndios florestais.

A definição dos incêndios florestais ocorridos nos períodos de 2008, 2013 e 2022 foi estabelecida por meio da aplicação de técnicas de geoprocessamento e com base em dados publicados pelo ICMBio. Os incêndios de 2008 e 2013 foram estimados por meio de imagens de satélite Landsat 5 TM (capturada em 6 de fevereiro de 2008) e Landsat 8 OLI (capturada em 24 de abril de 2013), com composições coloridas de falsa cor (canais 541 e 652), utilizando as bandas espectrais de infravermelho médio, infravermelho próximo e azul, com uma composição modificada a partir da aplicação de Pereira, Lohmann e Deppe (2017). O incêndio florestal de 2022 foi definido a partir da divulgação, no site da instituição, do mapa elaborado pelo ICMBio, com o suporte da imagem Sentinel 2A (capturada em 28 de dezembro de 2022), em composição colorida de verdadeira cor.

A partir dos polígonos estimados com as áreas de cicatriz dos incêndios florestais, calcularam-se as áreas em hectares. Também foi feito o cruzamento desses polígonos com os limites da UC em diferentes períodos para ser possível calcular, em hectares, as áreas atingidas dentro das imediações da ESEC Taim, bem como a proporção das áreas afetadas.

A coleção 8 MapBiomas foi utilizada para determinar o uso e a ocupação do solo, com o objetivo de caracterizar os elementos que compõem a área de estudo. Entender, relacionar e quantificar os elementos de uso do solo mais afetados pelos incêndios florestais pode direcionar a compreensão do tipo de ecossistema mais impactado. A comparação de dados foi realizada entre o uso do solo, a extensão da área do Taim e as áreas incendiadas dentro dos limites da ESEC Taim. A definição das proporções atingidas conforme o tipo de uso do solo foi estimado para a compreensão do comportamento dos incêndios florestais e para a visualização de semelhanças ou diferenças entre cada incêndio analisado.

Avaliação da dinâmica da regeneração da área afetada

A partir da compreensão da relação entre a extensão e a proporção da área afetada, tornou-se necessária a demanda por análises acerca da avaliação de impactos, da dinâmica de regeneração e da resiliência do banhado. Para realizar a avaliação do banhado antes, no momento e após cada incêndio florestal, foi aplicado o cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI, em inglês). A metodologia desenvolvida por Rouse et al. (1973) foi utilizada em diversos estudos científicos com o propósito de identificar a resiliência dos banhados (Buma, 2012; Telesca; Lasaponara, 2006; Tran et al., 2018; Guasselli, 2005; Simioni et al., 2022). Os recursos do NDVI para identificação dos estágios de crescimento da vegetação e da biomassa servem como método auxiliar na visualização e no entendimento da saúde dos componentes vegetais. Ele possibilita distinguir os estágios de vegetação, água, umidade e solo exposto (Rouse et al., 1973).

A construção da informação é realizada por meio dos valores de refletância das imagens de satélite nos canais de infravermelho próximo e vermelho das bandas multispectrais das imagens de satélite passivas. Os valores resultantes do NDVI variam entre -1,0 e 1,0. Valores negativos indicam a presença de água, neve, gelo, rocha e solo exposto, enquanto valores positivos indicam diferentes estágios de crescimento da vegetação. Quanto mais próximo de 1,0, mais saudável ou densa é a vegetação. A equação do NDVI (Eq. 1) corresponde a:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

O NDVI foi calculado para cada data analisada a partir das imagens de satélite Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI e Sentinel 2A. As datas de aquisição das imagens para as análises foram: 22/01/1991, 02/01/2007, 22/02/2008, 23/01/2009, 24/04/2013, 27/06/2013, 08/12/2022, 28/12/2022 e 26/02/2023. As datas foram escolhidas considerando a disponibilidade de imagens sem cobertura de nuvens nos dias seguintes ao evento, um ano antes e um ano depois do evento de incêndio florestal. Caso não fosse possível adquirir a imagem com este método de escolha, foi definido que a seleção da imagem seria feita no mesmo período do ano em que algum incêndio florestal tivesse ocorrido. Portanto, a seleção da imagem deveria ocorrer em um dos meses de ocorrência de incêndios florestais (janeiro, fevereiro, março, abril ou dezembro), desde que apresentasse as mesmas fases (positivo, negativo ou neutro) dos modos de variabilidade climática SAM e ENOS.

A cartografia dos mapas está estruturada sobre o sistema geodésico brasileiro de coordenadas SIRGAS2000. Todos os processamentos e mapeamentos temáticos foram executados no software ArcGIS PRO 3.1.0.

Médias mensais, sazonais e anomalias de precipitação

A definição da precipitação foi realizada com o banco de dados de precipitação observada/Global Precipitation Measurement (MERGE/GPM) (ROZANTE et al., 2020). Com resolução espacial de 0,1°C x 0,1°C, os dados MERGE/GPM apresentam a precipitação observada diariamente desde janeiro de 2001, e estão disponíveis no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados de precipitação estão na unidade de medida em milímetros (mm). A climatologia apresentada nos gráficos com as médias mensais é oriunda do banco de dados do Global Precipitation Climatology Centre/Deutscher Wetterdienst (GPCC/DWD).

Para a compreensão da precipitação, foram elaboradas médias mensais e sazonais de precipitação, além de suas respectivas anomalias para os mesmos intervalos. A sazonalidade foi definida da seguinte maneira: verão (dezembro, janeiro e fevereiro — DJF), outono (março, abril e maio — MAM), inverno (junho, julho e agosto — JJA) e primavera (setembro, outubro e novembro — SON). Os cálculos foram desenvolvidos considerando a série temporal disponível (2001-2022), abrangendo 264 meses e 88 estações.

A partir das médias mensais e sazonais de precipitação e das respectivas anomalias, foram gerados gráficos que apresentam os resultados da série temporal, destacando os meses e estações em que ocorreram os incêndios florestais. Os resultados relativos aos períodos de ocorrência dos eventos de incêndios florestais foram analisados e relacionados aos modos de variabilidade climática ENOS e SAM.

O ENOS é um fenômeno oceânico e atmosférico que ocorre no Oceano Pacífico e é categorizado em quatro intensidades: forte, moderado, fraco e muito fraco (Quinn et al., 1978). Já o SAM (Oscilação Antártica) é uma força climática de origem antropogênica que exerce forte influência sobre os polos e os subtrópicos. Essa força é caracterizada por uma dinâmica interna na atmosfera, decorrente de altas e baixas pressões, e apresenta duas fases: positiva e negativa (Gong e Wang, 1999; Turner e Marshall, 2011; Fogt et al., 2019).

A *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) disponibiliza os índices de classificação e definição das fases positivas, negativas e neutras do ENOS e do SAM. De acordo com os parâmetros da NOAA, o índice do ENOS é definido em escala anual e classificado entre valores positivos (El Niño), negativos (La Niña) e neutros. O índice do SAM possui definição mensal sendo definido por valores positivos e negativos, conforme seu deslocamento.

Para estabelecer uma análise estatisticamente significativa entre os resultados obtidos e os modos de variabilidade climática, adotaram-se a função discriminante e o teste t de Student (Hair et al., 2009). O cálculo atribui um nível de significância à correlação entre os resultados dos dados e os modos de variabilidade climática. As anomalias mensais e sazonais dos períodos de análise dos incêndios florestais

foram classificadas do menor ao maior e distribuídas em três intervalos: (1) acima, (-1) abaixo e (0) médio, sendo tercís. A mesma distribuição de tercís foi atribuída ao índice do SAM e ao índice do ENOS, cada um relacionado aos resultados de cada mês de incêndio florestal (janeiro, fevereiro, março, abril e dezembro) e a cada estação de incêndio florestal (verão e outono). O eixo diagonal principal de cada matriz identifica a significância estatística, ou seja, a correlação entre o dado da anomalia e o modo de variabilidade (Hair et al., 2009). A partir disso, aplicou-se a equação 2:

$$p = \frac{n}{N} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

p = percentual corretamente classificado

N = tamanho da amostra

n = número corretamente classificado

Os resultados do percentual corretamente classificado pela função discriminante também são utilizados para determinar o nível de significância de cada classificação (anomalias com índice SAM e anomalias com índice ENOS). O teste t de Student, apresentado na equação 3, informa que, quando o resultado é superior a 1,96, existe significância na classificação (Hair et al., 2009).

$$t = \frac{p - 0,33}{\sqrt{\frac{0,33(1 - 0,33)}{N}}} \quad (3)$$

Onde:

p = percentual corretamente classificado

t = teste t *Student*

N = tamanho da amostra

n = número corretamente classificado

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados por meio dos tópicos destacados nesta seção e exibidos por meio de mapas, tabelas e gráficos. Assim como, as discussões são abordadas conforme as análises resultantes.

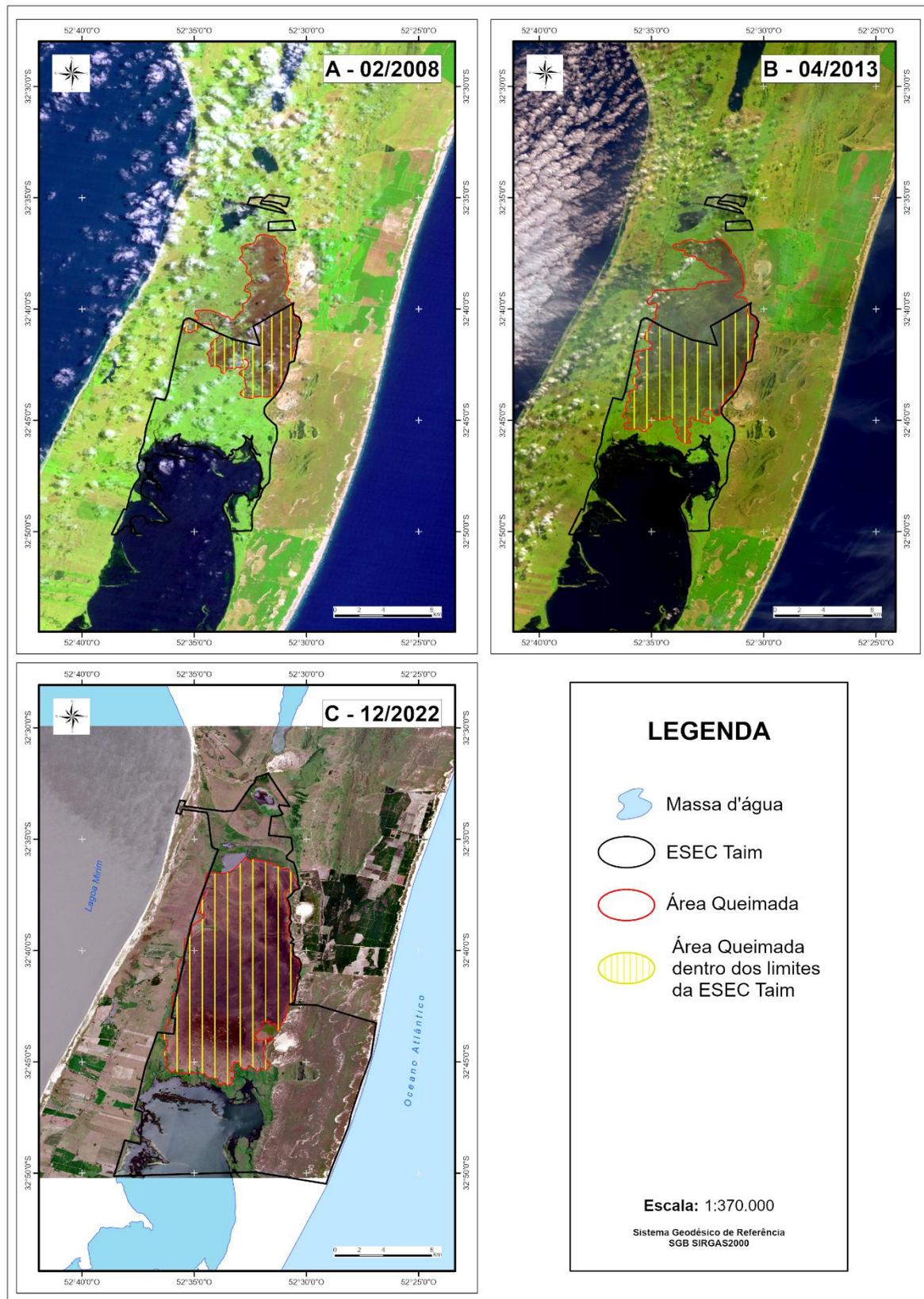
Definição dos incêndios florestais na ESEC Taim por imagens de satélite

Desde sua criação, em 1986, até 2017, a ESEC Taim possuía uma área de 10.764 hectares, conforme observado nas figuras 2A e 2B. A partir de junho de 2017, no entanto, a UC foi ampliada para 32.797 hectares, conforme observado na Figura 2 (C).

O incêndio florestal ocorrido em 2008 (Figura 2-A) teve duração de seis dias, entre 28 de janeiro e 2 de fevereiro de 2008, na estação do verão. A área total estimada do incêndio por meio de imagem de satélite foi de 5.174,46 hectares, sendo que a área de amplitude do incêndio nos limites da UC foi de 2.650,11 hectares. O incêndio florestal ocorrido em 2013 (Figura 2-B) teve duração de nove dias, entre 26 de março e 3 de abril de 2013, na estação outonal. A área total estimada do incêndio por meio de imagens de satélite foi de 8.873,89 hectares, e a área incendiada nos limites da ESEC Taim foi de 5.809,84 hectares. O incêndio florestal ocorrido em 2022 (Figura 2-C) teve duração de quatro dias, entre 12 e 16 de dezembro de 2022, na estação do verão. A área total estimada do incêndio por meio de imagens de satélite foi de 12.221,52 ha, e a área incendiada nos limites da ESEC Taim estendeu-se por 12.040,90 ha.

Na Figura 2, destaca-se a simbologia em vermelho para a representação da área total do incêndio florestal e a simbologia em amarelo com hachura para a área atingida dentro das imediações da ESEC Taim. Ao observar os três eventos de incêndios florestais e os valores das áreas estimadas, percebe-se que o incêndio de 2022 foi o maior já registrado. Além disso, estima-se que a intensidade do fogo e das condições ambientais do solo, como a presença de maior quantidade de material orgânico, a escassez de umidade e

Figura 2 - ESEC Taim: Incêndios Florestais em 2008, 2013 e 2022



Fonte: Limites territoriais – IBGE, 2021; Limite ESEC Taim – ICMBio, 2020; Hidrografia e massa d'água - SEMARS, 2018; Área de queimada - os autores, 2024; Imagem de satélite Landsat – Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, sigla em inglês) 2008; Imagem de satélite Landsat – USGS, 2013; Imagem de satélite Sentinel – Programa Copernicus, 2022. Elaboração: os autores, 2024.

as altas temperaturas, tenham contribuído para esse resultado. Dois dias antes do fenômeno de 2022, foram observados em campo fatores que possivelmente viabilizaram o desenvolvimento do incêndio florestal e a consequente extensão de seus efeitos, visto que sua duração ocorreu no decorrer de quatro dias. Os demais incêndios florestais, em 2008 e 2013, ocorreram, respectivamente, em seis e nove dias, mas com extensões menores que as de 2022.

Na Figura 3, é possível observar diferentes localidades do Banhado do Taim. A Figura 3-A, registrada em 32°46'15.5"S, 52°31'22.6"O, apresenta uma perspectiva dos campos característicos de áreas úmidas em condição de vegetação seca e com pouca umidade. A Figura 3-B, registrada em 32°45'32.7"S, 52°31'05.5"O, evidencia a Base Caçapava, que é uma das bases de apoio existentes dentro dos limites da UC. A Figura 3-C, registrada em 32°45'31.4"S, 52°31'06.9"O, apresenta um conjunto de árvores próximo à Base Caçapava sobre um relevo mais elevado e seco. A Figura 3-D foi registrada em 32°44'59,7"S, 52°30'11,9"O, e mostra uma área alagada do banhado observada durante a realização do trabalho de campo. Em todos os registros, foi constatado o predomínio de características da ESEC Taim relacionadas à escassez de água, o que é contrário ao que geralmente se encontra em um ambiente de banhado.

Os corpos d'água apresentaram lâmina d'água reduzida em várias localidades. As gramíneas dos campos estavam amareladas, com aspecto de ressecamento pelo sol, e o solo, rachado nas partes mais altas do relevo. As condições descritas foram observadas em campo e validadas por meio de imagens de satélite anteriores à data do evento, além de serem observadas na análise da precipitação nos meses anteriores. Ao comparar os eventos de 2008 e 2013 com os registros da Figura 3 em 2022, foi possível avaliar somente a precipitação. Os resultados das médias e anomalias de precipitação nos meses anteriores aos eventos de incêndio florestal apresentaram valores inferiores e superiores à climatologia. Isso difere do que foi observado nos meses anteriores ao evento de 2022.

Para a compreensão dos efeitos provocados e das dimensões afetadas pelos incêndios florestais nos períodos analisados, a Tabela 1 apresenta a área total afetada e a área total impactada na ESEC Taim. A apresentação das informações relaciona as áreas em hectares e expõe principalmente os percentuais de maneira comparativa. Dessa forma, é possível observar proporcionalmente como o Taim foi afetado diante dos eventos ocorridos no entorno da região.

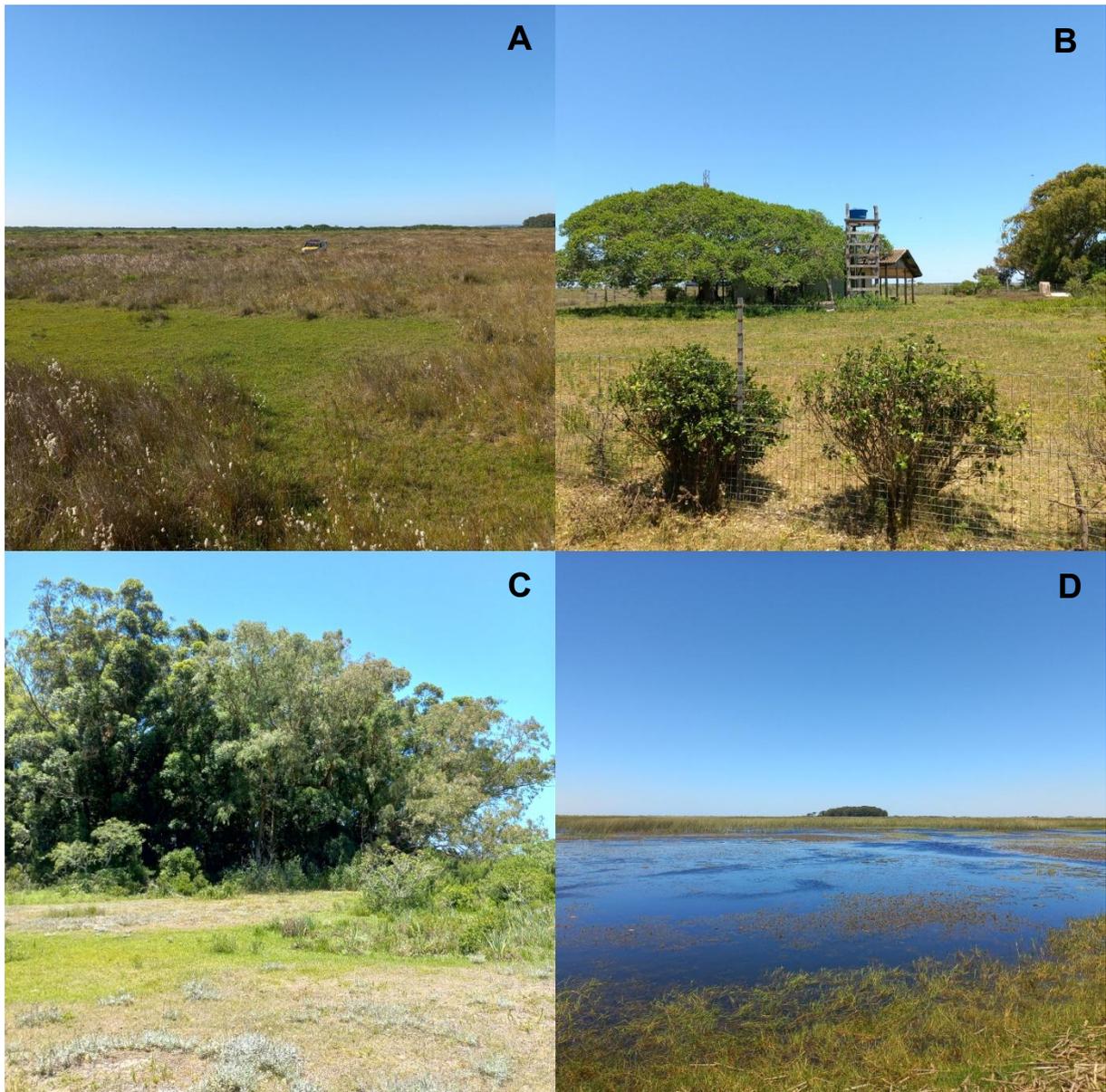
No incêndio florestal de 2008, 25,21% da ESEC Taim foram atingidos, porém 51,22% da área total incendiada estava dentro de seus limites. No incêndio de 2013, 55,26% da área da UC foram afetados, e 65,47% da área total incendiada estava dentro do Taim. No incêndio de 2022, 36,70% do Taim foram impactados e 98,52% da área total mapeada estava dentro da unidade de conservação. Os resultados indicam, portanto, um aumento da área impactada nas imediações do Taim. Ou seja, a cada incêndio florestal, o fenômeno se torna mais intenso na região afetada e mais significativo na área protegida do Taim.

Tabela 1 - ESEC Taim: Quantitativos em hectares e percentuais das áreas afetadas pelos incêndios florestais, 2008, 2013 e 2022

Definições	Área (ha)	Percentual de área incendiada da ESEC Taim	Percentual de área afetada da ESEC Taim, a partir do total de área incendiada
Extensão da ESEC Taim antes do decreto federal s/n de 05/07/2017	10514,21	-	-
Extensão atual da ESEC Taim	32806,31	-	-
Área Total do Incêndio em 2008	5174,46	-	-
Área Total do Incêndio em 2013	8873,89	-	-
Área Total do Incêndio em 2022	12221,52	-	-
Área Incendiada em 2008 - Dentro da ESEC Taim	2650,11	25,21	51,22
Área Incendiada em 2013 - Dentro da ESEC Taim	5809,84	55,26	65,47
Área Incendiada em 2022 - Dentro da ESEC Taim	12040,90	36,70	98,52

Fonte: Os autores, 2024.

Figura 3 - Registros do Banhado do Taim em saída de campo, dezembro de 2022



Fonte: Os autores, 2022.

A análise dos dados evidenciou que a intensidade dos incêndios florestais aumenta progressivamente a cada nova ocorrência. Além disso, foi identificada uma área de recorrência entre os três períodos analisados. Com a interseção das áreas afetadas nos limites da ESEC Taim, compreendeu-se uma área de 2.424,84 ha. Essa área será ilustrada e avaliada na análise do NDVI.

Para compreender o impacto no ecossistema e nos diferentes tipos de recursos físicos e ambientais característicos da área da ESEC Taim, o uso do solo MapBiomas (2023) é um elemento diagnóstico dessas condições, que precisam ser preservadas. Para cada ano em que ocorreu um incêndio florestal, foi realizada uma análise cruzando os dados com os tipos de uso do solo MapBiomas (2023) identificados nos limites da ESEC Taim e nas áreas por ela abrangidas, que foram afetadas pelos incêndios.

A Tabela 2 exibe a análise aplicada ao ano de 2008: foram identificados os tipos de uso em toda a extensão da ESEC Taim e nas áreas afetadas pelo incêndio florestal, bem como o percentual de área impactada. O elemento definido como "Campo Alagado e Área Pantanosa" possui a maior distribuição por extensão: 8.755,11 ha. Esse tipo de uso do solo também foi o mais impactado pelo incêndio florestal, com 2.617,65 ha, o que indica que aproximadamente 30% de sua extensão foi incendiada. Podemos considerar que o tipo Campo Alagado e Área Pantanosa é o Banhado do Taim. A formação campestre identificada na área

de estudo teve 26,48% de sua área total impactada pelo incêndio florestal. As formações vegetais características do bioma pampa costeiro também sofrem os impactos de fenômenos extremos, como os incêndios florestais.

Tabela 2 - ESEC Taim: Uso do solo em quantitativos e percentuais de áreas incendiadas, 2008

Uso do solo - MapBiomas coleção 8	Área (ha)	Área incendiada (ha)	Percentual de área incendiada
2.1. Campo Alagado e Área Pantanosa	8755,11	2617,65	29,90
2.2. Formação Campestre	99,31	26,30	26,48
3.4. Mosaico de Usos	11,82	0,89	7,49
2.5. Restinga Herbácea	58,51	4,26	7,29
4.4. Outras Áreas não Vegetadas	29,75	1,00	3,37
4.1. Praia, Duna e Areal	2,72	0,01	0,22
5.1 Rio, Lago e Oceano	1457,07	-	-
3.2.1.3. Arroz	32,15	-	-
1.5. Restinga Arbórea	0,78	-	-
3.3. Silvicultura	59,65	-	-
3.2.1.5. Outras Lavouras Temporárias	7,34	-	-
Área total - ESEC Taim	10514,21	2650,11	25,21

Fonte: Os autores, 2024.

Em continuidade à análise de cada ano registrado com incêndio florestal na ESEC Taim, a Tabela 3 evidencia que, em 2013, também foram identificados os tipos de uso, relacionados com as áreas afetadas pelo incêndio florestal e o percentual de área impactada. Campo Alagado e Área Pantanosa tiveram 5.801,29 ha incendiados, indicando 65,35% de área afetada do Banhado do Taim. Novamente, a mesma região de banhado foi afetada pelo incêndio florestal, porém de maneira mais extensa. Tanto pelas informações em tabelas, como na Figura 2, pode-se observar uma localização em comum dos focos de incêndio.

Tabela 3 - ESEC Taim: Uso do solo em quantitativos e percentuais de áreas incendiadas, 2013

Uso do solo - MapBiomas coleção 8	Área (ha)	Área incendiada (ha)	Percentual de área incendiadas
2.1. Campo Alagado e Área Pantanosa	8877,69	5801,29	65,35
2.2. Formação Campestre	92,07	3,01	3,27
3.4. Mosaico de Usos	7,08	2,11	29,71
2.5. Restinga Herbácea	77,12	3,43	4,45
4.4. Outras Áreas não Vegetadas	10,67	-	-
4.1. Praia, Duna e Areal	3,07	-	-
5.1 Rio, Lago e Oceano	1335,34	-	-
3.2.1.3. Arroz	2,06	-	-

1.5. Restinga Arbórea	1,01	-	-
3.3. Silvicultura	102,68	-	-
3.2.1.5. Outras Lavouras Temporárias	5,43	-	-
Área total - ESEC Taim	10514,21	5809,84	55,26

Fonte: Os autores, 2024.

A Tabela 4 apresenta a análise de 2022, ano do maior incêndio florestal e com impactos significativos na área de estudo. Entre os diferentes tipos de uso do solo identificados na área de 32 mil hectares, o campo alagado e a área pantanosa, bem como a formação campestre, destacaram-se como os mais afetados pelo maior incêndio florestal já registrado. Enquanto 77,95% da área do Campo Alagado e Área Pantanosa foram afetados, 20,39% da área da Formação Campestre foram incendiados. Ao agrupar a proporção desses ambientes afetados, percebe-se que aproximadamente 98% da área incendiada é composta por eles. Outros ambientes relativos à caracterização da região também foram afetados, mas não apresentaram relevância significativa na área afetada pelo incêndio florestal.

Tabela 4 - ESEC Taim: Uso do solo em quantitativos e percentuais de áreas incendiadas, 2022

Uso do solo - MapBiomias coleção 8	Área (ha)	Área incendiada (ha)	Percentual de área incendiada
2.1. Campo Alagado e Área Pantanosa	15121,53	11786,84	77,95
2.2. Formação Campestre	696,26	141,98	20,39
3.4. Mosaico de Usos	604,97	32,96	5,45
2.5. Restinga Herbácea	6837,54	18,17	0,27
4.4. Outras Áreas não Vegetadas	679,01	2,65	0,39
4.1. Praia, Duna e Areal	486,14	0,87	0,18
5.1 Rio, Lago e Oceano	7323,57	48,71	0,67
3.2.1.3. Arroz	91,44	8,72	9,53
1.5. Restinga Arbórea	25,33	-	-
3.3. Silvicultura	224,34	-	-
3.2.1.5. Outras Lavouras Temporárias	11,18	-	-
Área total - ESEC Taim	32101,32	12040,90	37,51

Fonte: Os autores, 2024.

Análise da área afetada por NDVI

É preciso estabelecer as áreas impactadas pelos incêndios florestais e suas extensões reais e proporcionais no Taim. É necessário avaliar as condições ambientais e geomorfológicas do banhado e seu comportamento. Isso é ainda mais importante em situações de desequilíbrio do ecossistema, como o efeito de um incêndio florestal. Considerar sua capacidade de regeneração é uma forma de analisar a ESEC Taim e seus aspectos. Visualizar as condições ambientais do Taim antes, durante e depois do evento de incêndio florestal promove a compreensão do objeto de estudo aplicado à área.

A Figura 4 apresenta o resultado comparativo realizado com a técnica de NDVI nas três ocorrências de incêndios florestais. Valores negativos de NDVI (de -1,0 a -0,4) estão associados à presença de água ou umidade; valores entre -0,4 e -0,2 referem-se à umidade ou água com presença de material orgânico e vegetação; valores entre -0,2 e 0,2 representam solo exposto; valores entre 0,2 e 0,4 identificam

vegetação em estágio de envelhecimento; e valores entre 0,4 e 1,0 definem vegetação sadia ou densa (Simioni et al., 2022; Buma, 2012; Guasselli, 2005).

As imagens da ESEC Taim obtidas no momento de cada episódio destacam a área incendiada, da mesma forma que a Figura 2. Além disso, elas apresentam uma área de recorrência de incêndio nos limites da UC. Inicialmente, no momento do evento, é apresentada a informação de que a extensão total da ESEC Taim se encontrava sob condições de escassez hídrica. As três imagens dos incêndios florestais, conforme a Figura 4, identificam que os resultados associados à coloração vermelho-alaranjada, atribuída à presença de água, umidade ou água com matérias orgânicas e vegetação (-1,0 a -0,2), estão pouco evidentes se comparados aos demais períodos. No evento de 2008, houve predominância de 48% de solo exposto e 29% de vegetação em processo de envelhecimento. No incêndio florestal de 2013, predominou o solo exposto, com 80% da área afetada, e 19%, umidade ou água com presença de matérias orgânicas e vegetação. Por fim, no evento de 2022, foi identificado envelhecimento da vegetação em 38% da área e solo exposto em 18%.

Quanto à avaliação das imagens do Taim, que expõem os resultados do NDVI antes do incêndio, observa-se, na Figura 4, que, apesar de serem de períodos distintos e estarem sob condições diferentes, existe uma heterogeneidade na resposta espectral no ambiente de banhado. Essa heterogeneidade é mais evidente no centro do Taim e na ligação com a Lagoa Mangueira, ao sul. Isso ocorre até mesmo nas áreas afetadas pelos incêndios florestais. Essa variedade na coloração da simbologia e dos valores de NDVI expõe uma diversidade de vegetação pela clorofila dos elementos vegetais (Simioni et al., 2022; Guasselli, 2018; Guasselli, 2005).

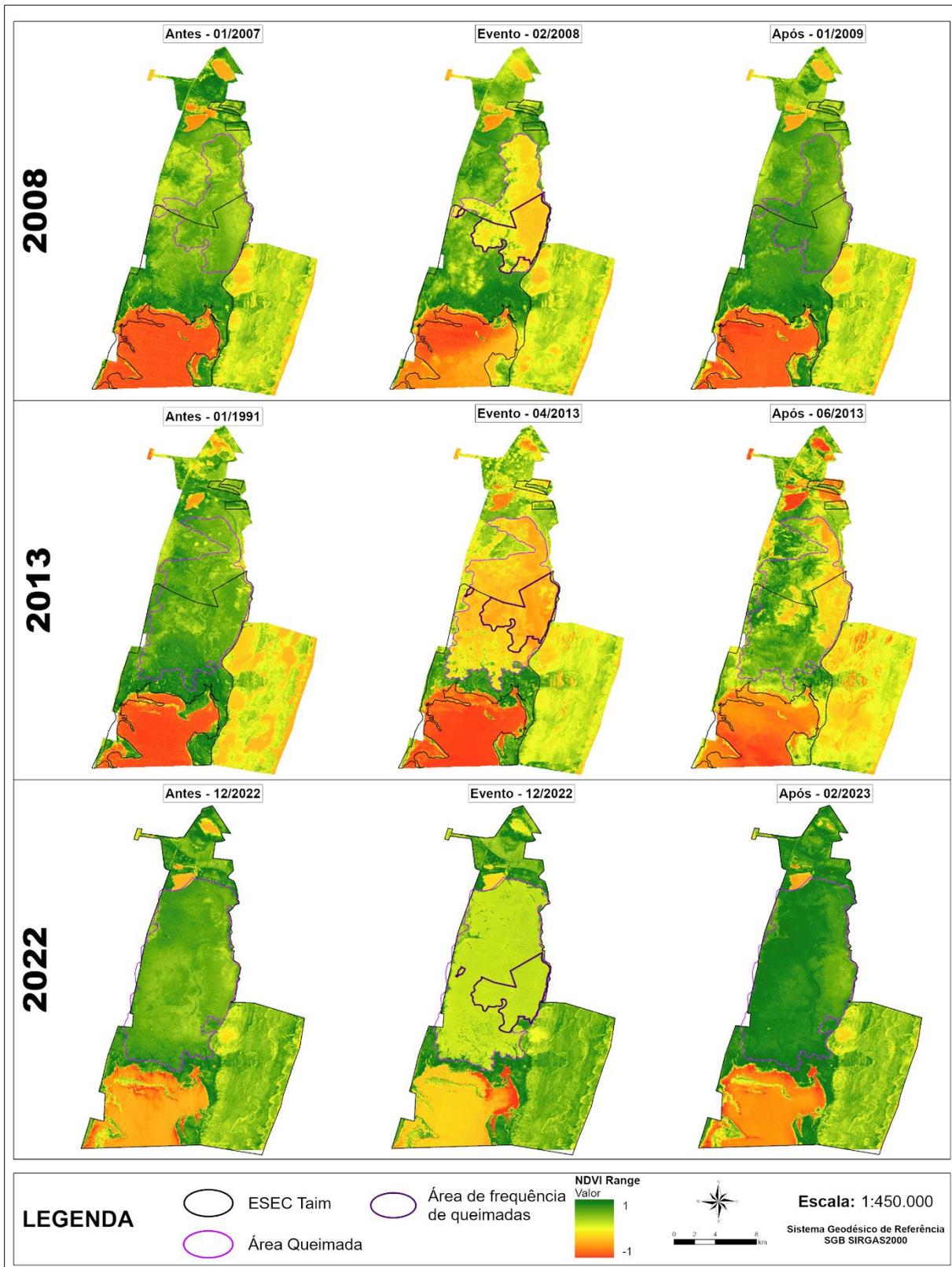
Da mesma forma, ao avaliar as imagens posteriores aos incêndios, percebeu-se a capacidade do banhado de se regenerar de maneira rápida em um período de até um ano. Entretanto, a diversidade de clorofila na vegetação das imagens posteriores é menor que a das imagens anteriores. A Tabela 5 apresenta a comparação dos resultados do NDVI entre os períodos anteriores e posteriores aos incêndios, corroborando o que é visualizado na Figura 4.

Observa-se que, pelos resultados do NDVI em cada data anterior à queimada, a ESEC Taim apresentava condição de diversidade ambiental. Entretanto, estima-se que, nas datas posteriores ao incêndio, a capacidade de regeneração da diversidade da vegetação existente tenha sido impactada. A diminuição da vegetação sadia ou densa é evidenciada no período de 2013. A presença de umidade, água e vegetação está equilibrada entre todos os períodos; somente em 2022 houve oscilação dos valores. Em 2008, 2013 e 2022, houve diminuição das extensões das classes que predominaram como efeito dos incêndios florestais.

Ao comparar os três incêndios florestais considerando a área de frequência entre eles e os resultados obtidos por meio do NDVI, os impactos estão possivelmente associados ao tempo de duração dos eventos. Em 2022, o impacto da queima na vegetação foi maior, e a classe (0,2 a 0,4) foi identificada como senescência da vegetação. Em 2008 e 2013, houve impacto de exposição do solo devido ao tempo maior de duração de cada incêndio.

Entende-se que o monitoramento de 2008 apresentou resultados mais satisfatórios que os demais, pois o intervalo entre as datas adquiridas foi de um ano, o que indicou melhor resultados para a identificação da resiliência do banhado. Nos demais períodos de monitoramento, houve limitação de disponibilidade de imagens de satélite. Apesar das limitações, o monitoramento ambiental pode identificar a dinâmica de comportamento do ambiente da ESEC Taim em situações de desequilíbrio e estresse ambiental.

Figura 4 - ESEC Taim: Monitoramento e avaliação dos incêndios florestais por NDVI em 2008, 2013 e 2022



Fonte: Imagem de satélite Landsat 5 TM – USGS, 2008; Imagem de satélite Landsat 8 OLI - USGS, 2013; Imagem de satélite Sentinel 2A – Programa Copernicus, 2022; Imagem de satélite Sentinel 2A – Programa Copernicus, 2023; Limite ESEC Taim – ICMBio, 2020; Áreas de queimadas – Os autores, 2024. Elaboração: os autores, 2024.

Tabela 5 - ESEC Taim: Valores do NDVI para o monitoramento em 2008, 2013 e 2022

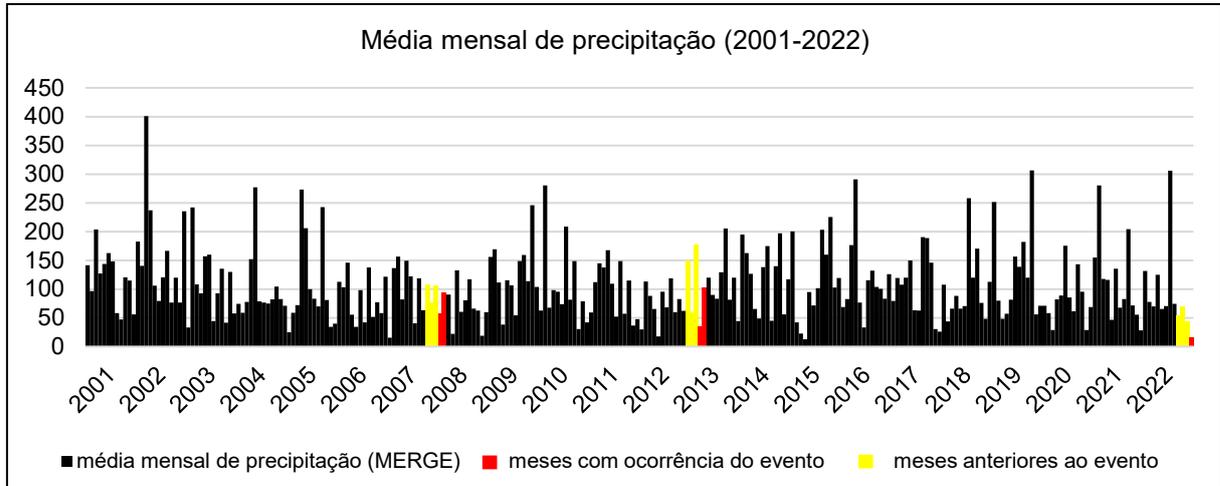
NDVI		2008 (percentual)		
Valores	Classes	Antes	Incêndio	Após
(-1) - (-0,4)	Água	6,865	0,041	1,647
(-0,4) - (-0,2)	Água com matéria orgânica ou vegetação (banhado)	11,361	10,760	13,953
(-0,2) - (0)	Solo exposto	4,760	18,243	5,839
(0) - (0,2)		13,119	29,949	15,440
(0,2) - (0,4)	Senescência - fim do desenvolvimento da planta e envelhecimento ou queda das folhas	36,831	29,381	27,435
(0,4) - (1)	Vegetação sadia ou densa	27,064	11,626	35,685
NDVI		2013 (percentual)		
Valores	Classes	Antes	Incêndio	Após
(-1) - (-0,4)	Água	5,783	-	-
(-0,4) - (-0,2)	Água com matéria orgânica ou vegetação (banhado)	7,867	18,268	19,097
(-0,2) - (0)	Solo exposto.	12,733	60,887	76,845
(0) - (0,2)		13,859	20,618	4,058
(0,2) - (0,4)	Senescência - fim do desenvolvimento da planta e envelhecimento ou queda das folhas	25,866	0,227	-
(0,4) - (1)	Vegetação sadia ou densa	33,892	-	-
NDVI		2022 (percentual)		
Valores	Classes	Antes	Incêndio	Após
(-1) - (-0,4)	Água	0,966	2,059	0,489
(-0,4) - (-0,2)	Água com matéria orgânica ou vegetação (banhado)	3,094	1,670	3,979
(-0,2) - (0)	Solo exposto	12,507	12,534	10,697
(0) - (0,2)		2,534	5,569	2,643
(0,2) - (0,4)	Senescência - fim do desenvolvimento da planta e envelhecimento ou queda das folhas	5,893	38,597	5,444
(0,4) - (1)	Vegetação sadia ou densa	75,005	39,572	76,748

Fonte: Os autores, 2024.

Médias mensais de precipitação

Ao observarmos o comportamento da precipitação ao longo de cada ano de incêndio, pudemos notar que as condições hídricas da região de estudo já apresentavam um processo de escassez de chuvas maior do que o esperado para cada mês. A Figura 5 expõe as condições ocorridas nos meses em que os incêndios florestais ocorreram e evidencia como elas se comportaram anteriormente. O destaque em amarelo ressalta os três meses anteriores aos eventos analisados.

Figura 5 - Planície Costeira Sul: Médias mensais de precipitação nos anos de ocorrência dos incêndios florestais, 2008, 2013 e 2022



Fonte: MERGE/GPM, 2023. Elaboração: Os autores, 2024.

Em 2008, apenas um mês registrou chuva acima do esperado. Janeiro e fevereiro, períodos de incêndio, ficaram com as médias mensais abaixo do esperado: 58,2 mm e 93,61 mm, respectivamente. Em 2008, ano de La Niña e de predominância de meses com SAM positivo — fatores de variabilidade climática favoráveis a secas ou estiagens (Fernandes et al., 2021; Cardozo; Reboita; Garcia, 2015; Vasconcelos, 2012) —, foi analisado que, nos meses anteriores ao incêndio, a partir de julho de 2007, a La Niña já estava atuante, com predominância da posição do SAM negativo. Essas condições também são propícias à diminuição de chuvas. Entre julho e dezembro de 2007, a precipitação ficou abaixo da climatologia; apenas em agosto e dezembro de 2007 ela ficou acima. Além disso, nos três meses anteriores a janeiro de 2008, destacam-se dezembro de 2007 (com 105,94 mm de precipitação, contra 86,82 mm de climatologia), novembro de 2007 (com 77 mm de precipitação, contra 80,14 mm de climatologia) e outubro de 2007 (com 107,51 mm de precipitação, contra 112,58 mm de climatologia). Apesar de a precipitação registrada ter ficado próxima à climatologia, acredita-se que essas circunstâncias poderiam favorecer a escassez hídrica no ambiente de banhado.

Em 2013, cinco dos 12 meses do ano apresentaram precipitação acima da esperada. Março teve média mensal de 34,69 mm (99,47 mm segundo a climatologia), e abril, de 103,38 mm (116,98 mm segundo a climatologia). Principalmente em março, quando começou o incêndio, foram registrados seis dos dez dias com incêndio. O ano caracterizou-se como um ano de ENOS neutro e SAM positivo no período de ocorrência do incêndio, mas com SAM negativo em outros meses. Quando ocorre essa relação de indicadores climáticos, o SAM predomina sobre o ENOS. Quando o SAM está positivo, há tendência de escassez de chuvas (Hu et al., 2022). Os meses anteriores ao incêndio de 2013 apresentaram variação de precipitação, porém com predomínio de registros abaixo da climatologia, inferiores a 100 mm. fevereiro de 2013 registrou 176,69 mm, enquanto a climatologia registrou 119,14 mm. janeiro de 2013 registrou 58,74 mm, enquanto a climatologia registrou 102,17 mm. Dezembro de 2012 registrou 150,12 mm, enquanto a climatologia registrou 86,82 mm.

Em 2022, apenas três meses apresentaram chuva acima da climatologia; em julho, ocorreu um evento extremo (Figura 5). Além disso, os três meses anteriores ao evento registraram precipitação abaixo da climatologia, com valores significativos. Em setembro de 2022, foram registrados 53,87 mm, enquanto a climatologia registrou 115,07 mm. Em outubro de 2022, foram registrados 69,88 mm, contra 112,58 mm da climatologia. Em novembro de 2022, foram registrados 43,2 mm, contra 80,14 mm da climatologia. Em dezembro, foram registrados 15,56 mm (86,82 mm segundo a climatologia). Foi um incêndio em um período curto, mas extremamente intenso, pois a área atingida, de 12.040,9 ha, foi a maior já registrada desde que a ESEC Taim se tornou uma UC e passou a monitorar incêndios. A ocorrência da La Niña em 2022 já se seguia a um período de três anos consecutivos. Além disso, foi um ano de forte crescimento do SAM positivo, o que se refletiu na situação hídrica do ano, conforme os resultados das médias mensais. De acordo com o relatório "Estado do Clima", da NOAA (2023), 2022 foi um ano quente, com temperaturas mais

elevadas do que as registradas em 2021. Diante da análise da influência do ENOS e do SAM na região de estudo, a combinação desses fatores favoreceu os resultados mensais obtidos.

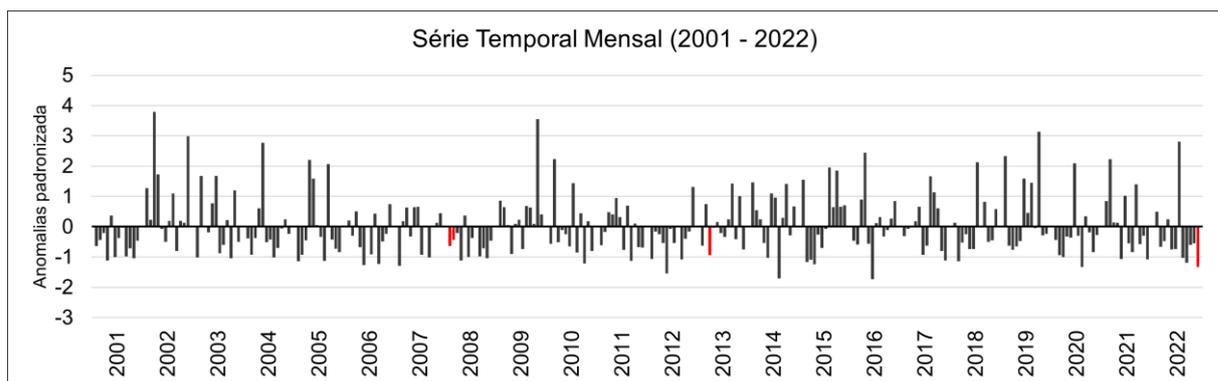
As médias mensais de precipitação serviram para introduzir a compreensão do comportamento hídrico. É necessário compreender estatisticamente os valores observados para entender se, nos períodos de ocorrência de incêndios, foram evidenciados fenômenos anômalos de precipitação. Também é preciso entender se os modos de variabilidade climática estão estatisticamente correlacionados com os resultados das anomalias.

Anomalia de precipitação mensal

Os incêndios ocorreram em períodos distintos dentro da série temporal. Para observar a existência de anomalias associadas à escassez de chuvas, relacionadas a um fator climático, entre outras condicionantes, apresenta-se a Figura 6. Após compreender as médias mensais de precipitação na Costa Sul da PCRS, onde a ESEC Taim está localizada, é possível identificar as anomalias de precipitação mensal da série temporal (2001-2022). O gráfico comprova as anomalias de precipitação de todos os meses (264), destacando em vermelho os meses de janeiro e fevereiro de 2008, março e abril de 2013 e dezembro de 2022 — meses dos incêndios analisados.

Do total de 264 meses da série temporal analisada, 57,95% foram meses com anomalia negativa, e 42,05%, com anomalia positiva de precipitação. Julho e outubro são os meses mais secos, com 68,19% de predomínio de anomalias negativas. Março, maio e junho são os meses mais úmidos, com 45,45% de predomínio de anomalias positivas. O destaque das anomalias de precipitação no gráfico da Figura 6 mostra que todos os meses destacados apresentaram anomalias negativas de precipitação, ou seja, escassez de chuvas. Esses meses foram: janeiro de 2008 (-0,631 desvios padrão), fevereiro de 2008 (-0,432 desvios padrão), março de 2013 (-0,932 desvios padrão), abril de 2013 (-0,038 desvios padrão) e dezembro de 2022 (-1,321 desvios padrão). Apesar dos incêndios, as principais anomalias negativas foram registradas em outros meses e anos da série temporal. Março de 2002 registrou a maior anomalia positiva, de +3,787 desvios padrão, e junho de 2016, a maior negativa, de -1,735. Ambos os meses, com ENOS neutro, março com SAM negativo e junho com SAM positivo, foram afetados pela predominância do SAM sobre o ENOS, e as fases do SAM correlacionaram-se com as anomalias: quando o SAM é negativo, ocorrem chuvas; quando é positivo, há escassez de chuvas (Hu et al., 2022; Vasconcelos et al., 2019; Reboita et al., 2009).

Figura 6 - Planície Costeira Sul: Anomalias de precipitação mensal, 2001 a 2022



Fonte: MERGE/GPM, 2023. Elaboração: Os autores, 2024.

Como abordado na análise das médias mensais de precipitação, a influência das fases do ENOS e do SAM na variabilidade climática da região Sul do Brasil é evidente (Reboita et al., 2009). Para associar os modos de variabilidade aos resultados de anomalias negativas de precipitação dos incêndios, foi aplicada uma avaliação estatística entre os elementos por meio de tabelas de contingência e do test t de Student (Hair et al., 2009). O objetivo foi verificar o nível de significância desses fatores climáticos na mudança da precipitação.

Ao aplicar análises estatísticas entre anomalias e modos de variabilidade climática, observou-se que apenas as anomalias da série temporal do mês de março possuem significância na classificação com o SAM (test t

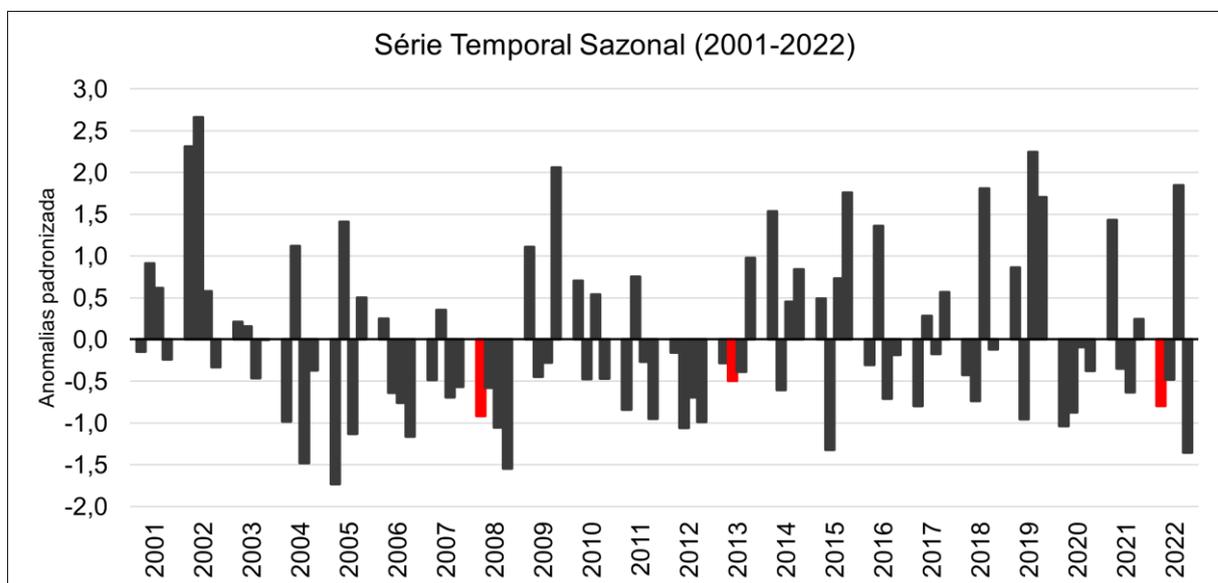
= 2,60). Da mesma forma, as anomalias dos meses de dezembro apresentaram significância na classificação com o ENOS (test $t = 2,60$). Os meses de janeiro (test $t \text{ SAM} = -1,47$ e test $t \text{ ENOS} = -0,57$), fevereiro (test $t \text{ SAM} = -0,57$ e test $t \text{ ENOS} = -0,12$) e abril (test $t \text{ SAM} = -0,57$ e test $t \text{ ENOS} = 1,69$) não atingiram o nível de significância de 1,96 com o SAM e o ENOS. Além disso, as anomalias dos meses de março não atingiram significância com o ENOS (test $t = -1,02$), nem as de dezembro com o SAM (test $t = 0,33$). Contudo, o SAM positivo pode ter exercido grande influência na diminuição das chuvas em março de 2013, assim como a La Niña pode ter potencializado o efeito da escassez de chuvas em dezembro de 2022 (Fernandes et al., 2021; Cardozo; Reboita; Garcia, 2015; Vasconcelos, 2012).

Anomalia de precipitação sazonal

Para complementar a compreensão do comportamento hídrico mensal no período analisado, são apresentadas as anomalias de precipitação sazonais. Apesar de haver um entendimento das unidades climáticas do Taim e de um perfil do clima do Rio Grande do Sul (Wollmann; Simioni; lensse, 2015; Rossato, 2011), diante dos incêndios ocorridos nas últimas décadas na região da ESEC Taim, pondera-se a necessidade de avaliar a sazonalidade com o SAM e o ENOS.

As anomalias de precipitação sazonal destacadas no gráfico da Figura 7 evidenciam que todas as estações registraram anomalias negativas de precipitação. Mais uma vez, a escassez de chuvas surge como um fator que pode ter facilitado os incêndios em escala sazonal. O verão de 2008 apresentou uma anomalia de -0,917 desvios padrão; o outono de 2013, uma anomalia de -0,494 desvios padrão; e o verão de 2022, uma anomalia de -0,793 desvios padrão. Das três estações, apenas o verão de 2022 apresentou o verão anterior com anomalia positiva de precipitação. Na série temporal, os verões e os outonos apresentam predominância de anomalias negativas, com 59,09% (13 registros) cada. O inverno e a primavera também apresentam predominância de anomalias negativas, com 63,64% (14 registros) cada. Quanto ao acumulado do ano, 2008, 2013 e 2022 apresentaram anomalias negativas. Destaca-se 2008, com uma anomalia de -1,793 desvios padrão, como o ano de maior anomalia negativa da série de 2001 a 2022.

Figura 7 - Planície Costeira Sul: Anomalias de precipitação sazonal, 2001 a 2022



Fonte: MERGE/GPM, 2023. Elaboração: Os autores, 2024.

Ao relacionar os modos de variabilidade climática e a sazonalidade, observa-se que tanto o verão de 2008 quanto o de 2022 apresentaram SAM positivo e La Niña. A combinação dessas condições climáticas favorece a escassez de chuvas (Hu et al., 2022). O outono de 2013, por sua vez, registrou SAM positivo e ENSO neutro, o que também favorece a escassez de chuvas, pois o SAM positivo predomina quando o ENSO está em sua fase neutra (Hu et al., 2022).

Em todos os registros citados, as fases do SAM e do ENSO foram muito expressivas. Entre os verões da série temporal, o SAM positivo de 2008 (+1,183) foi o terceiro mais forte, e o de 2022 (+1,056), o sexto. O ano de 2021 (+1,515) registrou o índice mais positivo da série. Quanto às fases negativas do ENSO nos verões da série, 2008 (-1,267) registrou a mais forte, e 2022 (-0,9), a quarta mais forte. Ambos foram fases com a La Niña bastante marcante, sendo que, em 2022, foi o terceiro ano consecutivo de La Niña atuante. Entre os outonos, o SAM positivo de 2013 (+0,782) foi o mais forte da série temporal. Isso reforça a influência que o SAM, como variabilidade climática de origem antrópica, exerce na área analisada e no sul do Brasil (Fogt et al., 2019; Vasconcelos et al., 2019; Reboita et al., 2009).

A análise estatística entre as anomalias sazonais e os modos de variabilidade climática, foram obtidos os seguintes resultados: as anomalias do verão e do outono não atingiram o nível de significância de 1,96 com o SAM e o ENOS. Verão (*test t* SAM= 0,33) e (*test t* ENOS= 1,69). Outono (*test t* SAM= 1,69) e (*test t* ENOS= 1,69). Apesar de os valores não terem atingido a significância estatística, sem a correlação matemática entre as fases positivas e negativas dos modos de variabilidade climática ENOS e SAM com as estações. Considera-se, o teste serviu como uma aplicação estatística que validou o quanto ocorre uma influência dos fatores atmosféricos aplicados na escala sazonal. Como também, a atuação isolada ou em conjunto do ENOS e SAM não deixou de provocar alterações nos regimes de precipitação, conforme exposto nos resultados das anomalias de precipitação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa dos incêndios florestais em 2008, 2013 e 2022 na ESEC Taim proporcionou uma compreensão da extensão e da proporção do fenômeno sobre os elementos do ambiente de AU. Também foram identificadas as condições pluviométricas associadas aos fatores climáticos que possivelmente favoreceram uma escassez hídrica no ambiente de AU. Por meio da metodologia aplicada, os principais resultados observados indicaram impactos distintos motivados pelos efeitos dos incêndios, mas com condicionantes semelhantes.

Como resultado do método utilizado para identificar as áreas afetadas pelos incêndios florestais, constatou-se que, a cada incêndio, uma área maior foi impactada. Em 2008, foram 5.174,46 ha; em 2013, 8.873,89 ha; e em 2022, 12.040,90 ha, com uma área de recorrência dos três incêndios florestais de 2.424,84 ha. Portanto, há uma ampliação da amplitude dos incêndios florestais à medida que ocorrem na região. A cada década, a dimensão das áreas incendiadas aumenta e afeta mais o Taim, principalmente na área de banhado, conforme verificado pelo MapBiomass (2023) no tipo de uso do solo definido como campo alagado e área pantanosa.

Os resultados do NDVI identificaram as condições de escassez de água e umidade no ambiente da UC no momento da ocorrência dos eventos. A avaliação do NDVI mostrou como cada incêndio afetou o ambiente da ESEC Taim. Os incêndios florestais de 2008 e 2013 apresentaram condições semelhantes, como o impacto do solo exposto e a senescência das plantas, possivelmente decorrentes dos impactos causados por esses incêndios. A área incendiada em 2022 ocasionou a perda da vegetação e a senescência das plantas. O efeito dos impactos pode estar associado aos períodos de duração dos eventos. No último evento, o mais severo, a menor duração e a maior área atingida evidenciaram uma quantidade maior de material orgânico suscetível à combustão. Isso porque a escassez de precipitação era persistente nos meses anteriores ao incêndio de 2022.

A capacidade de resiliência do banhado foi confirmada por meio de imagens posteriores ao incêndio, que mostraram que, em um período de um mês a um ano após os incêndios florestais, a área afetada se regenerou. Porém, houve possível perda da biodiversidade da vegetação nesse período. Acredita-se que a vegetação predominante se regenera em um curto período, mas que o retorno às condições de diversidade da vegetação anteriores ao incêndio necessite de mais tempo. Portanto, foi possível observar que o banhado tem grande capacidade de recuperar sua vegetação em um curto período de tempo.

Entre os 264 meses analisados da série temporal (2001-2022), destacou-se a predominância de anomalias negativas mensais de precipitação: 57,95%. Das 88 estações avaliadas, 61,37% resultaram em anomalias negativas de precipitação. Em todos os períodos de incêndio, houve anomalias negativas, com destaque para dezembro de 2022, o mês com a maior anomalia. Nos três registros de incêndios, o SAM positivo foi identificado, e a La Niña, em 2008 e 2022. Já em 2013, o ENOS foi neutro. Dessa forma, a interação entre a variabilidade climática do SAM e do ENOS nas fases mencionadas exerceu forte influência no comportamento da precipitação, resultando em escassez de chuvas. A avaliação estatística de significância revelou que o SAM e o ENOS atingiram valor estatístico acima de 1,96 nos meses de março e dezembro.

Apesar de os demais meses e estações não terem atingido o valor de significância, os modos de variabilidade climática aplicados exercem uma influência expressiva no clima da área de estudo.

Conforme o objetivo do artigo, que é compreender os incêndios utilizando a proposta metodológica, conclui-se que a ESEC Taim é uma UC que requer constante monitoramento e atenção. Isso porque é um ambiente sensível a situações de estresse hídrico, como a escassez de chuvas, e a impactos em seu espaço, como incêndios florestais. A ESEC Taim possui uma vasta área de banhado, sendo diretamente afetada por esses fatores, colocando-a em risco.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) pela autorização de trabalho de campo na ESEC Taim em dezembro de 2022. Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior —Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo por meio do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX).

REFERÊNCIAS

- ALVES, D. B.; ALVARADO, S. T. Variação espaço-temporal da ocorrência de fogo nos biomas brasileiros com base na análise de produtos de sensoriamento remoto. *Geografia*, v. 44, n. 2, 321-345. 2019. <https://doi.org/10.5016/geografia.v44i2.15119>.
- AQUINO, F. E. Conexão climática entre o Modo Anular do Hemisfério Sul com a Península Antártica e o sul do Brasil. **Tese** (Doutorado em Ciências) – Porto Alegre: UFRGS. 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/62016>. Acesso em: 30 de ago. 2024.
- BRAZ, N. G. S.; CASCAIS, L. B.; SILVA, L. H. G.; MIURA, A. K. Detecção de áreas queimadas na Estação Ecológica do Taim (RS), causada pelos incêndios de 2008 e 2013. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa-PB. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2015. p. 6735-6742. <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1476.pdf>. Acesso em: 20 de mar. 2024.
- BUMA, B. Evaluating the utility and seasonality of NDVI values for assessing post-disturbance recovery in a subalpine forest. **Environmental Monitoring and Assessment**, 184(6), 2012. p. 3849–3860. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2228-y>.
- CAI, W.; McPHADEN, M. J.; GRIMM, A. M.; RODRIGUES, R. R.; TASCHETTO, A. S.; GARREAU, R. D.; DEWITTE, B.; POVEDA, G.; HAM, Y. G.; SANTOSO, A.; NG, B.; ANDERSON, W.; WANG, G.; GENG, T.; JO, H. S.; MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; OSMAN, M.; LI, S.; WU, L.; KARAMPERIDOU, C.; TAKAHASHI, K.; VERA, C. Climate impacts of the El Niño-Southern Oscillation on South America. **Nat Rev Earth Environ** 1, 215-231 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>.
- CARDOZO, A. B.; REBOITA, M. S.; GARCIA, S. R. Climatologia de frentes frias na América do Sul e sua relação com o Modo Anular Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, Vol. 17, Ano 11, 9-26. Jul/Dez, 2015. <https://doi.org/10.5380/abclima.v17i0.40124>.
- CUNHA, C. N.; PIEDADE, M. T. F.; JUNK, W. J. **Classificação e delineamento das áreas úmidas brasileiras e de seus macrohabitats**. Cuiabá: Ed. UFMT, 2015. ISBN 978-85-327-0557-0.
- ESRI - Environmental Systems Research. **ArcGISPRO**: release 3.0. Versão 3.1.0. Redlands, CA: ESRI, 2023.
- EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA. Copernicus. 2023. Disponível em: <https://dataspace.copernicus.eu/browser/>. Acesso em: 24 de abr. 2024.
- EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA. Copernicus. 2022. Disponível em: <https://dataspace.copernicus.eu/browser/>. Acesso em: 14 de ago. 2024.
- FERNANDES, V. R.; CUNHA, A. P. M. A.; PINEDA, L. A. C.; LEAL, K. R. D.; COSTA, L. C. O.; BROEDEL, E.; FRANÇA, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. Secas e os impactos na Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Rio de Janeiro, vol.18, ano 17, 561-584. Jan/Jun 2021. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/14748>. Acesso em: 15 de abr. 2024.
- FOGT, R. L.; SCHNEIDER, D. P.; GOERGENS, C. A.; JONES, J. M.; CLARK, L. N.; GARBEROGLIO, M. J. Seasonal antarctic pressure variability during the twentieth century from spatially complete

reconstructions and CAM5 simulations. **Climate Dynamics**, Springer journal online, Vol. 53, 2019. p. 1435-1452. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04674-8>.

GLOBAL PRECIPITATION CLIMATOLOGY CENTRE – GPCC. Disponível em: <https://www.dwd.de/EN/ourservices/gpcc/gpcc.html>. Acesso em: 01/06/2023.

GONG, D.; WANG, S. Definition of Antarctic Oscillation Index. **Geophysical Research Letters**, v. 26(4), p. 459-462, 1999. <https://doi.org/10.1029/1999GL900003>.

GUASSELLI, L. A. (Org.) **Áreas úmidas: questões ambientais** [e-book]. Porto Alegre: CAPES/UFRGS/Programa de Pós-Graduação em Geografia. Ed. Imprensa Livre. 2018. p. 347. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/174963>. Acesso em: 30 de ago. 2024.

GUASSELLI, L. A. Dinâmica da vegetação no banhado do Taim, RS. **Tese** (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Porto Alegre: UFRGS. 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/6768>. Acesso em: 23 de ago. 2024.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAN, R. L. **Análise Multivariada de Dados**. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688p.

HU, X.; EICHNER, J.; GONG, D.; BARREIRO, M.; KANTZ, H. Combined impact of ENSO and Antarctic Oscillation on austral spring precipitation in Southeastern South America (SESA). **Climate Dynamics**, Springer journal online, v.61, issue 1-2, 399-412. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06592-8>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Base cartográfica com a organização do território**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?edicao=30138&t=downloads>. Acesso em: 01 de abr. 2021.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - ICMBio. **Limites da Estação Ecológica do Taim**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/marinho/lista-de-ucs/esec-do-taim>. Acesso em: 01 de abr. 2021.

MARCHESAN, J.; ALBA, E.; TABARELLI, C.; MELLO, E. P.; HONNEF, D. H.; PEREIRA, R. S. Risco de incêndios na Estação Ecológica do Taim, Rio Grande do Sul. **Pesquisas Agrárias e Ambientais**. Nativa, Sinop, Vol. 8, n. 1, p. 112-117, jan/fev, 2020. <https://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i1.8180>.

NASCIMENTO, A. L. S.; TEIXEIRA, M. S.; ALONSO, M. F. Incêndio na Estação Ecológica do Taim em 2013: Análise do ambiente atmosférico e dispersão de poluentes. **Biodiversidade Brasileira**. 11(4): p. 109-120, 2021. <https://10.37002/biobrasil.v11i4.1772>.

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. **ENOS INDEX**. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 01 mai. 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - NOAA. **SAM INDEX**. Disponível em: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/Cwlink/daily_ao_index/ao/monthly.ao.index.b79.current.ascii.table. Acesso em: 01 mai. 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - NOAA. **Reporting on the State of the Climate in 2023**. 2023 Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov/news/reporting-state-climate-2023>. Acesso em: 16 out. 2024

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA - UNESCO. **Convention on Wetlands of International Importance especially as Waterfowl Habitat**. Ramsar, 2.2.1971. Disponível em: https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/scan_certified_e.pdf. Acesso em: 01 de jun. 2021.

PROJETO MAPBIOMAS – **Coleção 8** da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. Disponível em: https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection_8/iclu/coverage/brasil_coverage_2022.tif Acesso em: 15 de nov. 2023.

QUINN, W. H.; ZOPF, D. O.; SHORT, K. S.; KUO YANG, R. T. W. Historical trends and statistics of the Southern Oscillation, El Niño, and Indonesia droughts. **Fishery Bulletin**, v.76(3), p. 663-678, 1978. Disponível em: <https://spo.nmfs.noaa.gov/content/historical-trends-and-statistics-southern-oscillation-el-nino-and-indonesian-droughts>. Acesso em: 24 de mar. 2021.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. D. Relationship between the southern annular mode and the southern hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 48–55. Mar, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000100005>.

- RIO GRANDE DO SUL. **Resolução CONSEMA nº 380, de 13 de setembro de 2018**. Dispõe sobre os critérios para a identificação e enquadramento de banhados em imóveis urbanos. Lex: Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201810/08143237-380-2018-criterios-para-identificacao-e-enquadramento-de-banhados-em-imoveis-urbanos.pdf>. Acesso em: 12 de ago. 2022.
- ROSSATO, M. S. Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia. **Tese** (Doutorado em Geografia) - Porto Alegre: UFRGS. 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/32620>. Acesso em: 16 de out. 2024.
- ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite (**ERTS**) **symposium**, 1, 309–317, 1973. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>. Acesso em: 01 de set. 2024.
- ROZANTE, J.R., MOREIRA, D.S., GONÇALVES, L.G.G., VILA, D.A., Combining TRMM and surface observations of precipitation: Technique an validation over South America. **American Meteorological Society**, Boston, vol.25, Issue 3, p.885-894. June, 2010. <https://doi.org/10.1175/2010WAF222325.1>.
- SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO RIO GRANDE DO SUL – SEMARS. **Base Cartográfica do Estado do Rio Grande do Sul**, Escala 1:25.000 – BCRS25, versão 1.0-2018. Disponível em: <https://ww2.fepam.rs.gov.br/bcrs25/>. Acesso em: 20 de abr. 2020.
- SILVESTRI, G. E.; VERA, C. S. Antarctic oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. **Geophysical Research Letters**, v. 30, p. 2115–2118, 2003. <https://doi.org/cdx792>.
- SIMIONI, J. P. D.; GUASSELLI, L. A.; BELLOLI, T. F.; RAMOS, R. A. Assessment of fire resilience in subtropical wetlands using high spatial resolution images. Springer, **Environ Monit Assess**, vol. 194, n. 417, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09985-8>.
- SIMIONI, J. P. D.; GUASSELLI, L. A. Banhados: uma abordagem conceitual. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, n. 30, p. 33-47, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/224814>. Acesso em: 10 de abr. 2024.
- TELESCA, L.; LASAPONARA, R. Pre- and post-fire behavioral trends revealed in satellite NDVI time series. **Geophysical Research Letters**, Vol. 33(14), 2–5, 2006. <https://doi.org/10.1029/2006GL026630>.
- TRAN, B. N.; TANASE, M. A.; BENNETT, L. T.; APONTE, C. Evaluation of spectral indices for assessing fire severity in Australian temperate forests. **Remote Sensing**, 10(11), 1–18, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10111680>.
- TURNER, J.; MARSHALL, G. J. **Climate Change in the Polar Regions**. Cambridge: Ed. Cambridge University Press, 433 pp, 2011. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511975431>.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Earth Explorer**. 2013. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 06 de mar. 2024.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Earth Explorer**. 2008. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 28 de ago. 2024.
- VASCONCELOS, F. C.; PIZZOCHERO, R. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Month-to-month impacts of Southern Annular Mode over South America climate. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 41, p. 783-792, 2019. https://doi.org/10.11137/2019_1_783_792.
- VASCONCELOS, F. C. A oscilação antártica-mecanismos físicos e a relação com características atmosféricas sobre a América do Sul/oceanos adjacentes. 2012. **Tese** (Doutorado em Meteorologia) – São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2012. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2012/10.09.19.33/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 20 de jan. 2022.
- WOLLMANN, C. A.; SIMIONI, J. P. D.; IENSSE, A. C. **Atlas climático da Estação Ecológica do Taim: contribuição ao estudo do clima em unidades de conservação no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: E-book, 1 ed. 2015. Disponível em: <https://www.ufsm.br/cursos/graduacao/santa-maria/geografia/atlas-climatico-da-estacao-ecologica-do-taim#:~:text=O%20Atlas%20Clim%C3%A1tico%20da%20Est%C3%A7%C3%A3o,emprego%20de%20%C3%A9nicas%20de%20geoprocessamento>. Acesso em: 16 de out. 2024.

Recebido em: 18/04/2025

Aceito para publicação em: 31/07/2025