XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

MONITORAMENTO DE SISTEMAS LACUSTRES A PARTIR DE ÍNDICES DE ONDAS DE CALOR: ESTUDO DE CASO NA LAGOA MANGUEIRA/RS

Carlos Henrique Saldanha-Ferrari[1]; Matheus Henrique Tavares[1,2]; David da Motta Marques[1]; Lúcia Helena Ribeiro Rodrigues[1] & Juan Martín Bravo[1]

Abstract: For monitoring lake systems, limonological engineering stands out as an area that integrates physical and water quality aspects. In this sense, the choice of parameter(s) to monitor the lake of interest is crucial for an adequate representation of the hydrodynamics and the chemical and biological agents associated with the ecosystem. Water temperature, a driver of processes in lake systems and the parameter used in this study, is also the variable needed to determine lake heatwaves. These extreme events, whose occurrence can be observed in atmospheric and aquatic environments, are potentially stressful for lake ecosystems and can be represented using indexes, such as: duration, heating rate and average and maximum intensity. To apply this methodology, the results of which can provide relevant information for monitoring lakes, we used the water temperature estimation model Air2Water, which estimates daily water temperature time-series based on observed daily air temperature data. Lagoa Mangueira, a shallow coastal and subtropical lake located in the far south of Brazil, was the study area for this work, which aims to contribute to the explanation of a methodology that can be applied to monitoring different lake systems. Expressed in heatwave indexes, the results indicate increasing trends especially in the duration of these extreme events, substantially altering the thermal dynamics of the Lake Mangueira. The application of heatwave indexes is therefore of paramount importance for the proper monitoring lake systems.

Keywords – Limonological engineering; heatwave indexes; lake monitoring

Resumo: Para o monitoramento de sistemas lacustres, a engenharia limonlógica destaca-se como área que integra aspectos físicos e de qualidade da água. Nesse sentido, a escolha do(s) parâmetro(s) para monitorar o lago de interesse são cruciais para uma adequada representação da hidrodinâmica e dos agentes químicos e biológicos associados ao ecossistema. A temperatura da água, reguladora de processos em sistemas lacustres e parâmetro utilizado neste estudo, é também a variável necessária para determinação de ondas de calor lacustres. Tais eventos extremos, cuja ocorrência pode ser observada em ambiente atmosférico e aquático, são potencialmente estressores de ecossistemas lacustres, e podem ser representados a partir de índices, aqui apresentados: duração, taxa de aquecimento e intensidade média e máxima. Para aplicação dessa metodologia, cujos resultados podem expressar informações relevantes no monitoramento de lagos, foi utilizado o modelo de estimativa de temperatura da água Air2Water, que estima séries temporais diárias de temperatura da

1) Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 91501-970. carloshsferrari@gmail.com
2) Afiliação: Géosciences Environnement Toulouse (GET), UMR5563, CNRS, IRD, Université Toulouse 3, Toulouse, France.

água com base em dados diários observados de temperatura do ar. A Lagoa Mangueira, lagoa rasa costeira e subtropical situada no Extremo Sul do Brasil, foi a área de estudo deste trabalho, que busca contribuir com a explanação de uma metodologia cuja aplicação vale para monitoramento de distintos sistemas lacustres. Expressos em índices de ondas de calor, os resultados indicam tendências de aumento especialmente na duração desses eventos extremos, alterando substancialmente a dinâmica térmica da Lagoa Mangueira. Assim, verifica-se que o estudo e a aplicação de índices de ondas de calor são de suma importância para o adequado monitoramento de sistemas lacustres.

Palavras-Chave – Engenharia limonlógica; índices de ondas de calor; monitoramento de lagos

INTRODUÇÃO

Dentre os ambientes aquáticos, destacam-se aqueles considerados continentais e de água doce, tratados como límnicos (Barbosa *et al.*, 2019). Tais corpos d'água representam uma pequena parcela de 3% do total de água na Terra, que, se restringida aos sistemas lacustres (lagos e lagoas), passam a representar apenas 0,26% da totalidade de água disponível (Collischonn e Dornelles, 2015). Assim, estabelece-se uma pressão sobre esses ecossistemas dados os importantes serviços ambientais associados, como abastecimento público e irrigação (Woolway *et al.*, 2021b). Nesse panorama, lagos e lagos estão contemplados entre os 21 principais aspectos do clima pela Organização Meteorológica Mundial, sendo considerados indicadores climáticos essenciais (WMO, 2016).

Para o monitoramento dos sistemas lacustres, diferentes parâmetros da área de engenharia limnológica podem ser utilizados. Entre eles, a temperatura da água destaca-se como um regulador dos processos físico-químicos e biológicos nesses ecossistemas (Piccolroaz *et al.*, 2013). Um exemplo da representação da hidrodinâmica e da qualidade da água de lagos e lagos a partir da temperatura da água é a sua relação com a solubilidade do oxigênio, variável físico-química, e, portanto, com a distribuição da biota aquática ao longo da coluna d'água no sistema lacustre (Jane *et al.*, 2021). Como consequência, outra manifestação da temperatura da água como driver de processos em lagos é a definição de zonas em caso de estratificação (Stumm *et al.*, 2004).

A partir de dados de temperatura da água, ondas de calor podem ser determinadas. Assim foi a primeira a aplicação dessa metodologia junto a um ambiente aquático (Hobday *et al.*, 2016), depois de dados de temperatura do ar terem sido utilizados para determinação de ondas de calor atmosféricas (Perkins e Alexander, 2013). Para representar esses eventos extremos, foram concebidos índices para não apenas identificar a ocorrência de uma onda de calor, como também mensurá-la em termos de magnitude e extensão. A utilização dos índices permite comparar diferentes eventos de onda de calor para um mesmo ambiente, em diferentes escalas espaciais, ou mesmo entre diferentes ambientes e áreas de estudo (Schlegel *et al.*, 2018).

O processamento de dados monitorados em diferentes escalas temporais facilita a compreensão dos fenômenos da engenharia limnológica. Neste caso, os índices de ondas de calor obtidos a partir de dados de temperatura da água, quando projetados em período histórico e em cenários futuros, auxiliam no monitoramento do sistema lacustre de interesse. O presente estudo teve como objetivo avaliar a ocorrência de ondas de calor lacustres na Lagoa Mangueira, lagoa rasa costeira subtropical, vulnerável às mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global (Wieliczko *et al.*, 2021).

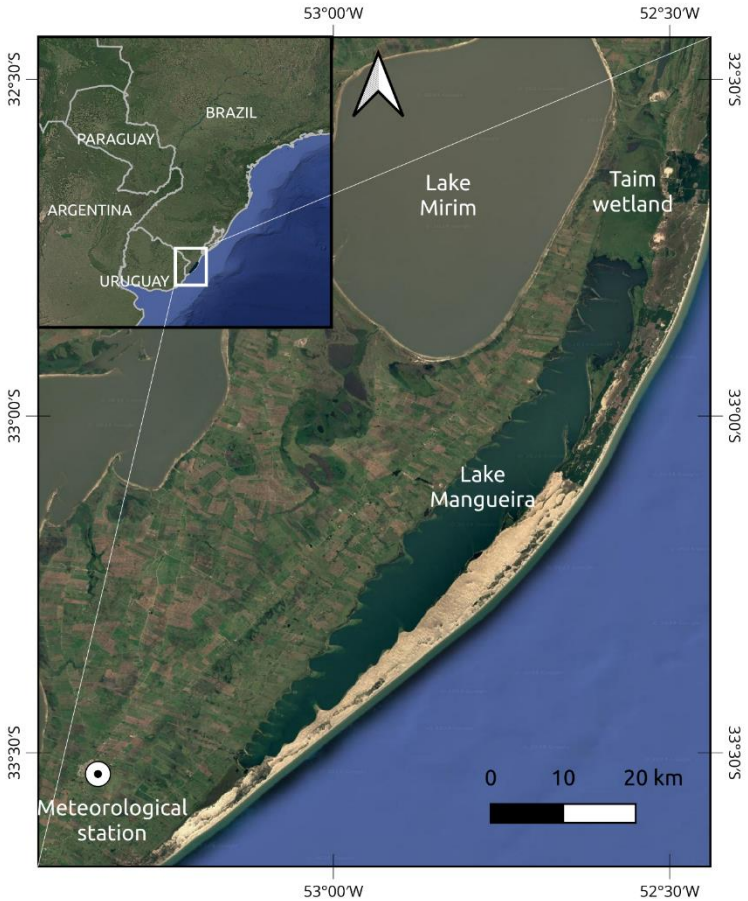
METODOLOGIA

Área de estudo

A Lagoa Mangueira, lagoa rasa costeira e subtropical, está situada na planície costeira do Rio Grande do Sul (RS), no Extremo Sul do Brasil, próximo à fronteira com o Uruguai (Figura 1). A lagoa integra o Sistema Hidrológico do Taim, que abriga a Estação Ecológica do Taim, unidade de conservação federal com mais de 33.935 hectares. Localizada em uma estreita faixa de terra, a Lagoa Mangueira estabelece-se entre o Oceano Atlântico e a Lagoa Mirim, compreendida pelas coordenadas 32°20′ a 33°00′ S e 52°20′ a 52°45′ W. Localiza-se, portanto, a Lagoa Mangueira em uma região subtropical com clima Cfa de acordo com a Classificação Climática de Köppen (Tavares, 2019).

A Lagoa Mangueira, classificada como polimítica quente contínua, estratifica-se no máximo algumas horas de cada vez (Lewis Jr. 1983). Com uma profundidade média de 2,6 m, a lagoa atinge sua profundidade máxima de 6,0 m na região central. Ademais, o comprimento da Lagoa Mangueira é de 90 km, com uma área superficial de 820 km² e largura variando de 3 a 10 km (Wieliczko *et al.*, 2021). Na Figura 1, também é ilustrada a estação meteorológica Santa Vitória do Palmar, a partir da qual os dados diários de temperatura do ar foram obtidos para posterior modelagem da temperatura superficial da água da Lagoa Mangueira.

Figura 1 – Situação da Lagoa Mangueira/RS no Extremo Sul do Brasil, e localização da estação meteorológica Santa Vitória do Palmar.



Determinação dos índices de ondas de calor

Inicialmente, destaca-se que os dados de temperatura da água necessários para determinar os índices de ondas de calor foram obtidos, para este estudo, por modelagem. Neste caso, a ferramenta utilizada foi o modelo de estimativa de temperatura da água Air2Water, que associa a temperatura do ar à temperatura do epilímnio, camada superficial dos lagos (Piccolroaz *et al.*, 2013). A temperatura do ar, única variável de entrada deste modelo, foi obtida junto à estação meteorológica Santa Vitória do Palmar (Figura 1). Além disso, para ajuste do modelo Air2Water, informações de satélite também foram utilizadas para contornar a escassa medição *in situ* de dados de temperatura da água (Tavares *et al.*, 2019). A bordo do satélite Terra (Wan *et al.*, 2021), o sensor MODIS foi utilizado como fonte dos dados de temperatura da água necessários para ajustar o modelo Air2Water. Detalhadamente, a aplicação dessas técnicas de modelagem da temperatura da água e sensoriamento remoto são descritas por Saldanha-Ferrari *et al.* (2024).

Com o modelo Air2Water ajustado, a simulação das séries diárias de temperatura da água para posterior determinação dos índices de ondas de calor se deu a partir de um conjunto de 26 modelos climáticos globais (MCGs), de onde se obteve as projeções climáticas de temperatura do ar. Para cada MCG utilizado, os resultados foram apresentados e discutidos como valores médios de índice a partir das respectivas séries de temperatura da água projetadas. O período histórico foi estabelecido entre Janeiro de 2081 e Dezembro de 2100 e os cenários futuros entre Janeiro de 1985 a Dezembro de 2014, para a séries diárias de temperatura superficial da água e do ar. Para avaliar o efeito das mudanças climáticas na temperatura Lagoa Mangueira, foram utilizados os cenários futuros associados ao sexto e último relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês, IPCC): SSP1-2,6 (menos severo), SSP2-4,5 (intermediário) e SSP5-8,5 (mais severo).

Por fim, em posse das séries diárias de temperatura da água projetadas em período histórico e cenários futuros, foram então determinados os índices de ondas de calor (Tabela 1). Tal metodologia, quando aplicada a ambientes aquáticos, considera que um evento de onda de calor se configura como um período de pelo menos 5 dias com temperatura da água superior ao percentil 90% da série histórica utilizada como referência (Hobday *et al.*, 2016). Destaca-se a aplicabilidade dessa abordagem pois os índices são calculados com base na média climatológica da área de interesse, sendo possível observar os efeitos desses eventos sobre as comunidades aquáticas inclusive nos meses mais frios. Além de detectar a variação sazonal das ondas de calor, pode-se ainda comparar eventos entre diferentes sistemas, pois não se tratam de índices determinados como valores absolutos, mas sim normalizados.

Tabela 1: Índices para determinação das ondas de calor. Adaptada de Hobday *et al.* (2016).

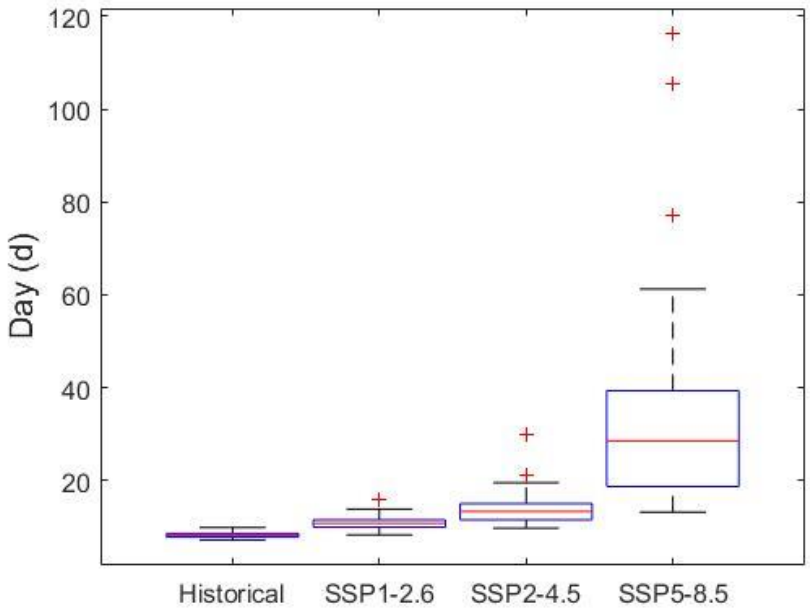
Índice	Unidade	Definição
Duração	dias	Período consecutivo de ao menos 5 dias com temperatura superior ao percentil 90%
Intensidade média	ºC	Diferença média entre a série de temperatura superficial da água e a climatologia do período histórico
Intensidade máxima	ºC	Maior diferença entre a temperatura da onda de calor e a climatologia do período histórico
Taxa de aquecimento	ºC/dia	Intensidade máxima menos a diferença entre a temperatura na véspera do início do evento e a climatologia, sobre o tempo até atingir a intensidade máxima

Entre os índices de ondas de calor apresentados, destaca-se a taxa de aquecimento. Para fins de monitoramento de sistemas lacustres, tal índice pode expressar informações relevantes pois, além de admitir a maior diferença de temperatura da água entre a série temporal e a respectiva climatologia, relativiza-a no intervalo de tempo de interesse (Hobday *et al.*, 2016). Outro índice de onda de calor relacionado a uma ideia temporal e obtido a partir de dados de temperatura da água é a intensidade cumulativa. Associando a duração e a intensidade média de um determinado evento de onda de calor, a intensidade cumulativa representa o efeito sinérgico desses índices no ambiente sujeito ao evento. Com mais detalhes, a aplicação da intensidade cumulativa junto a um sistema lacustre é apresentada e discutida por Saldanha-Ferrari *et al.* (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

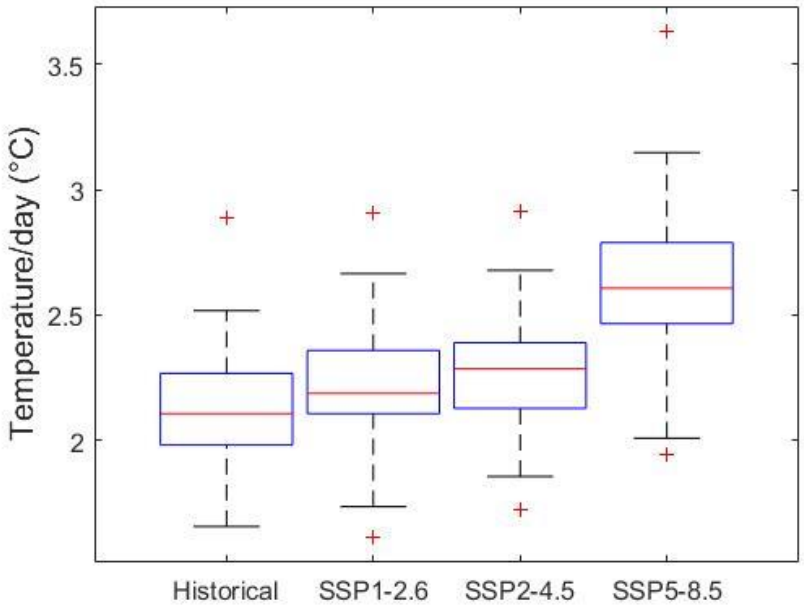
Entre os resultados de índices de ondas de calor, os associados à duração se mostraram como os que mais se diferenciam, a partir das projeções climáticas dos modelos climáticos globais (MCGs), entre o período histórico e os cenários futuros de mudanças climáticas (Figura 2). Especialmente as projeções de duração relacionadas ao cenário futuro SSP5-8,5 se destacam frente ao período histórico, com o maior valor médio relativo ao período histórico (10 dias) sendo inferior ao menor valor médio relativo ao cenário SSP5-8,5 (13 dias). Nesse caso, espera-se que a Lagoa Mangueira esteja sujeita a ondas de calor que durem mais, inclusive com projeções de que um evento de onda de calor se encerre após um próximo evento já ter iniciado (Saldanha-Ferrari *et al.*, 2024). Tais evidências indicam, a partir de um índice de onda de calor, um possível deslocamento de uma condição transitória de ondas de calor associadas à Lagoa Mangueira para um estado permanente de onda de calor, conforme já foi observado para outros sistemas lacustres por Woolway *et al.* (2021b).

Figura 2 – Ilustração do índice de onda de calor duração aplicado à Lagoa Mangueira/RS em período histórico e nos cenários futuros SSP1-2,6, SSP2-4,5 e SSP5-8,5.



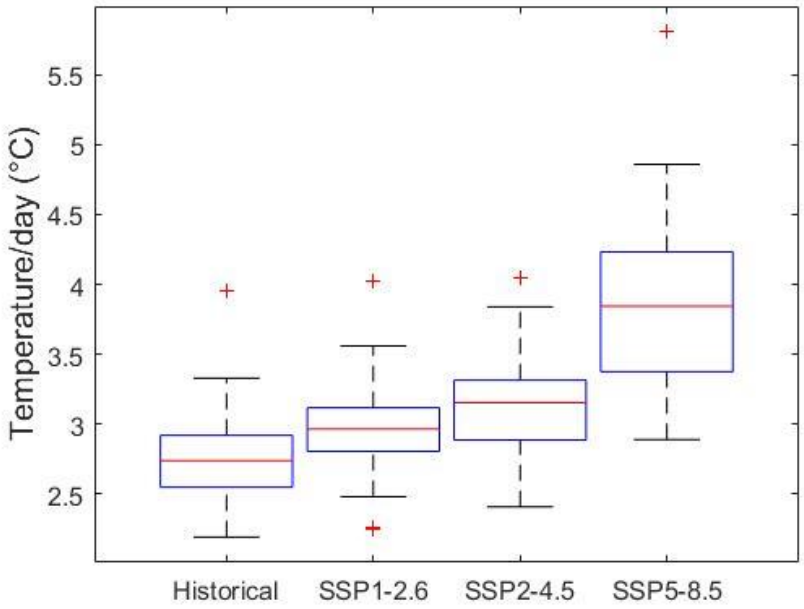
Para a intensidade média, podem ser destacados contrastes importantes inclusive entre o período histórico e os cenários futuros SSP1-2,6 e SSP2-4,5 (Figura 3). Acerca do primeiro, no mínimo 50% das projeções indicam que a Lagoa Mangueira estaria sujeita a uma intensidade média de 2,19 ºC, valor superior à mediana associada ao período histórico. Para o segundo, a expectativa é de ao menos 50% das projeções superando uma intensidade média de 2,29 ºC e, além disso, no mínimo 75% dos valores de intensidade média projetados junto ao período histórico. Admitindo a temperatura do ar como principal reguladora da temperatura da água de sistemas lacustres (Piccolroaz *et al.*, 2013), as projeções aqui apresentadas concordam com a tendência de que a temperatura do ar supere 1,5 ºC até o fim deste século (IPCC, 2018). Nesse sentido, com base no emprego de um índice de onda de calor, justifica-se reconhecimento de ecossistemas como a Lagoa Mangueira como indicadores climáticos essenciais pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2016).

Figura 3 – Ilustração do índice de onda de calor intensidade média aplicado à Lagoa Mangueira/RS em período histórico e nos cenários futuros SSP1-2,6, SSP2-4,5 e SSP5-8,5.



Em comparação à intensidade média, diferenças mais destacadas para a intensidade máxima podem ser observadas entre o período histórico e os cenários futuros (Figura 4). No mínimo 75% das projeções de intensidade máxima associadas ao cenário futuro SSP5-8,5 superariam pelo menos 75% dos valores projetados para o período histórico e, inclusive, os cenários futuros SSP1-2,6 e SSP2-4,5. Considerando ainda o cenário futuro SSP5-8,5, na faixa dos 4 ºC estaria estabelecida a diferença entre a série de temperatura da água e a climatologia do período histórico para ao menos 75% das projeções de intensidade máxima associadas à Lagoa Mangueira. Tais projeções são bastante preocupantes já que um aumento na temperatura da água dessa magnitude pode superar os limites fisiológicos de espécies aquáticas durante a ocorrência desses eventos extremos (Woolway *et al.*, 2021a). Ademais, indicativos como os aqui apresentados na forma de índice de onda de calor ratificam a vulnerabilidade da Lagoa Mangueira às mudanças climáticas devido ao aquecimento global (Wieliczko *et al.*, 2021).

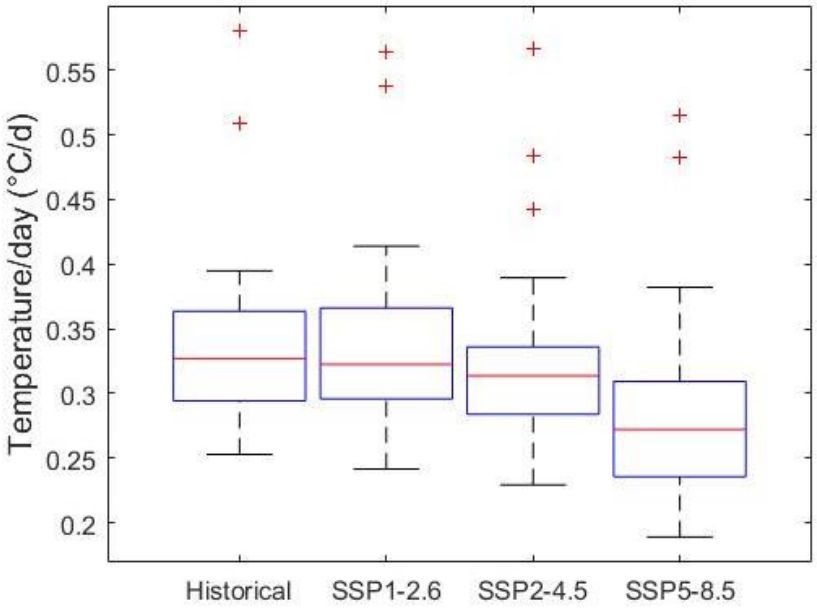
Figura 4 – Ilustração do índice de onda de calor intensidade máxima aplicado à Lagoa Mangueira/RS em período histórico e nos cenários futuros SSP1-2,6, SSP2-4,5 e SSP5-8,5.



Por fim, são discutidos e apresentados os resultados da taxa de aquecimento, índice de onda de calor originalmente concebido para ambientes marinhos (Hobday *et al.*, 2016) e aqui aplicado a um sistema lacustre. Diferentemente dos outros índices de onda de calor, cujos valores médios projetados apresentaram uma tendência de aumento entre os cenários futuros SSP1-2,6 e SSP5-8,5, para a taxa de aquecimento é possível perceber uma tendência de decaimento (Figura 5). Ainda que as projeções associadas ao cenário futuro SSP1-2,6 estejam bastante similares às do período histórico, seus valores de taxa de aquecimento em geral superam os do cenário futuro SSP2-4,5, que, por sua vez, superam os do cenário futuro SSP5-8,5. Tal comportamento indica, dada a definição da taxa de aquecimento (Tabela 1), que a Lagoa Mangueira estaria atingindo seu pico de temperatura da água durante a onda de calor mais rapidamente. Nesse caso, tais espécies não teriam tempo suficiente para se deslocar até regiões mais frias do corpo d'água ou mesmo se adaptar às menores concentrações de oxigênio dissolvido disponível nessas regiões (Jane *et al.*, 2021).

Ainda sobre a taxa de aquecimento, destaca-se que o metabolismo aquático pode responder ao aumento da temperatura da água em curto prazo (Cavalcanti *et al.*, 2016). Assim, considerando dados de temperatura da água como base para emprego dos índices de ondas de calor em sistemas lacustres, os efeitos desses eventos extremos podem ser adequadamente identificados, por exemplo, a partir da taxa de aquecimento. Dado que a temperatura da água regula não apenas processos físico-químicos nesses ecossistemas, mas também biológicos (Piccolroaz *et al.*, 2013), o rápido aquecimento da água pode ainda desencadear a floração de cianobactérias potencialmente tóxicas, dada a maior capacidade de desenvolverem estratégias de sobrevivência (Woolway *et al.*, 2021b). Nesses casos, configura-se a taxa de aquecimento como um índice de onda de calor que pode traduzir importantes informações a respeito de sistemas lacustres como a Lagoa Mangueira.

Figura 5 – Ilustração do índice de onda de calor taxa de aquecimento aplicado à Lagoa Mangueira/RS em período histórico e nos cenários futuros SSP1-2,6, SSP2-4,5 e SSP5-8,5.



CONCLUSÃO

Neste estudo de caso, foi apresentada a possibilidade de aplicação de índices de ondas de calor como ferramenta de monitoramento de sistemas lacustres. Representar esses eventos extremos a partir de índices normalizados permite avaliá-los em diferentes épocas do ano, bem como compará-los entre sistemas distintos. Os resultados obtidos para a Lagoa Mangueira, expressos em termos de índices de ondas de calor, indicaram um aumento especialmente na duração desses eventos extremos quando considerados os cenários futuros em comparação ao período histórico. Assim, a dinâmica térmica da Lagoa Mangueira seria substancialmente alterada, com impactos potenciais na distribuição de suas comunidades aquáticas e na manutenção de importantes serviços ambientais associados.

Para monitoramento hidrodinâmico e de qualidade da água de sistemas lacustres, o emprego de índices de ondas de calor destaca-se ainda como uma metodologia que possibilita avaliar os efeitos das mudanças climáticas, com base em cenários futuros. Nesse sentido, é necessário o processamento de dados monitorados em distintas escalas temporais para compreensão dos fenômenos físicos, químicos e biológicos associados à engenharia limnológica. Em relação a diferentes escalas espaciais, recomenda-se a continuidade do presente trabalho com aplicação dos índices de ondas de calor em outros sistemas lacustres, dado que essa metodologia oportuniza viabiliza comparações de ocorrência desses eventos extremos mesmo em áreas de estudo diferentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Soluções baseadas na Natureza (INCT SbN), projeto financiado pelo MCTI, CNPq, CAPES e FAPERGS, pelo financiamento desta pesquisa; a Sebastiano Piccolroaz, Marco Toffolon e Bruno Majone, pela disponibilização gratuita do modelo Air2Water; e ao Laboratório de Ecotecnologia e Limnologia Aplicada, pelo apoio científico.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. de; M. MARTINS, V. S. (2019). *Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações.* Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Volume 1, 2019.

CAVALCANTI, J.; MOTTA-MARQUES, D.; FRAGOSO JR, C. (2016). "*Process-based modeling of shallow lake metabolism: Spatio-temporal variability and relative importance of individual processes*". Ecological Modelling, 323, 28-40. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2015.11.010.

COLLISCHONN, W. e DORNELLES, F. (2015). *Hidrologia para Ciências Ambientais.* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recuros Hídricos (ABRH), 2015. 2ª impressão.

HOBDAY, A.; ALEXANDER, L. V.; PERKINS, S. E. (2016). "*A hierarchical approach to defining marine heatwaves"*. Progress in Oceanography.

JANE, S.; HANSEN, G.; KRAEMER, B.; LEAVITT, P.; MINCER, J.; NORTH, R.; ... ROSE, K. (2021). "*Widespread deoxygenation of temperate lakes*". Nature, 594, 66-70. DOI: 10.1038/s41586-021-03550-y.

LEWIS JR, W. (1983). *A revised classification of lakes based on mixing*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 40(10), 1779-1787. DOI: 10.1139/f83-207.

PERKINS, S. E.; ALEXANDER, L. V. (2013). "*On the Measurement of Heat Waves"*. Journal of Climate.

PICCOLROAZ, S.; TOFFOLON, M.; MAJONE, B. (2013). "*A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes*". Hydrology and Earth System Sciences.

SALDANHA-FERRARI, C. H.; BRAVO, J.; TAVARES, M.; MARQUES, D.; RODRIGUES, L. (2024). "*Climate change effects on a subtropical coastal shallow lake from heatwave indexes*". Earth Systems and Environment. DOI: 10.1007/s41748-024-00538-2

SALDANHA-FERRARI, C. H., BRAVO, J. M., TAVARES, M. H., MARQUES, D. da M., RODRIGUES, L. H. R. (2025). "*Cumulative intensity heatwave index as an assessment tool for climate change effects on shallow lakes"*. Limnetica: Associação Ibérica de Limnologia (AIL).

SCHLEGEL, R. W.; SMIT, A. J. (2018). *heatwaveR: "A central algorithm for the detection of heatwaves and cold-spells*". Journal of Open Source Software.

STUMM, W. (2004). *"Chemical processes regulating the composition of lake waters*", *in The Lakes Handbook: Limnology and Limnetic Ecology.* Org. por O'Sullivan P. E. e Reynolds C. S. Oxford: Blackwell Science.

TAVARES, M. (2019). "*Estimativa da temperatura superficial da água por sensores remotos: acurácia e aplicabilidade com modelos de temperatura"*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

TAVARES, M. H., MARQUES, D. M.; FRAGOSO JR., C. R. (2019). *"Combinando modelo de temperatura da água e sensoriamento remoto para estimar o efeito da mudança climática sobre a temperatura da Lagoa Mangueira-RS*" in Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. XXIII, Foz do Iguaçu-PR, Nov. 2019.

WAN, Z.; HOOK., S.; HULLEY, G. (2021). *"MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061*". LP DAAC MOD11A1. USGS NASA.

WIELICZKO, A. R.; CROSSETTI, L. O.; CAVALCANTI, J. R.; HESSEL, M. S.; MOTTA-MARQUES D. da; RODRIGUES, L. R. (2021). *"Meteorological drivers and ENSO influence on phytoplankton biomass dynamics in a shallow subtropical lake"*. Environmental Monitoring and Assessment.

WMO (2016). "*The global observing system for climate: implementation needs"*. World Meteorological Organization (WMO): Global Climate Observing System (GCOS).

WOOLWAY, R. I.; ANDERSON, E. J.; ALBERGEL, C (2021a). "*Rapidly expanding lake heatwaves under climate change*". Enviromental Research Letters.

WOOLWAY, R. I.; JENNINGS, E.; SHATWELL, T.; GOLUB, M.; PIERSON, D. C.; MABERLY, S. C. (2021b). *"Lake heatwaves under climate change"*. Nature, 589.