

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL

CARLOS HENRIQUE SALDANHA FERRARI

**AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE ONDAS DE CALOR LACUSTRES
NA LAGOA MANGUEIRA/RS EM PERÍODO HISTÓRICO E
SOB A PERSPECTIVA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

PORTO ALEGRE

2023

CARLOS HENRIQUE SALDANHA FERRARI

**AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE ONDAS DE CALOR LACUSTRES
NA LAGOA MANGUEIRA/RS EM PERÍODO HISTÓRICO E
SOB A PERSPECTIVA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Programa de Pós Graduação do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientadora: Profa. Dra. Lúcia Helena Ribeiro Rodrigues

Coorientador: Prof. Dr. Juan Martín Bravo

PORTO ALEGRE

2023

CIP - Catalogação na Publicação

Saldanha-Ferrari, Carlos Henrique
Avaliação da ocorrência de ondas de calor lacustres
na Lagoa Mangueira/RS em período histórico e sob a
perspectiva de mudanças climáticas / Carlos Henrique
Saldanha-Ferrari. -- 2023.

69 f.

Orientadora: Lúcia Helena Ribeiro Rodrigues.

Coorientador: Juan Martín Bravo.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Limnologia física. 2. Sistemas lacustres. 3.
Temperatura da água. 4. Índices de ondas de calor. 5.
Mudanças climáticas. I. Rodrigues, Lúcia Helena
Ribeiro, orient. II. Bravo, Juan Martín, coorient.
III. Título.

CARLOS HENRIQUE SALDANHA FERRARI

AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE ONDAS DE CALOR LACUSTRES
NA LAGOA MANGUEIRA/RS EM PERÍODO HISTÓRICO E
SOB A PERSPECTIVA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Programa de Pós Graduação do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Aprovada em: Porto Alegre, 09 de março e 2023.

Prof. Dra. Lúcia Helena Ribeiro Rodrigues – IPH/UFRGS
Orientadora

Prof. Dr. Juan Martín Bravo – IPH/UFRGS
Coorientador

Prof. Dr. Anderson Luís Ruhoff – IPH/UFRGS
Examinador

Dr. Saulo Aires de Souza – Agência Nacional de Águas
Examinador

Dra. Marie-Paule Bonnet – Institut de Recherche pour le Développement
Examinadora

AGRADECIMENTOS

“Ao fim de tudo”, minhas lágrimas seguem caindo, contrariando a bela letra de Duca Leindecker. Ao fim de (quase) tudo, voltamos ao início. Nesse regresso, as lágrimas vêm carregadas especialmente de boas vibrações, de um sentimento de missão cumprida, pois a gota se modificou entre fases, tomou formas diferentes, como em todo ciclo hidrológico. Muito pela vontade de atravessar novos ambientes, mas também pelas forçantes externas que se fizeram presentes nesse processo, complexo e muito bonito.

Das primeiras até as últimas fases desse ciclo, ali estava a Prof^a Dra. Professora Lúcia. Abraçaste minha proposta inicial, bastante relacionada à ocupação profissional que eu tinha à época. A pesquisa que apresento hoje, que trata sobre uma lagoa rasa, se comportou como tal. A partir da ação do vento, se modificou bastante, e tomou rumos diferentes. Da economia de recursos hídricos, para a limnologia, ganhando então novos contornos, conduzidos e orientados com maestria por ti, Professora. Muito obrigado!

Assim como as inversões térmicas, que acontecem frequentemente em lagoas como a que estudo aqui, as inversões temáticas e de abordagem. Prof. Dr. Juan, foste um agente muito importante nessa transição. Avaliar o aumento de temperatura da lagoa Mangureira nos fez também esquentar a cabeça, por algumas vezes. Mas, graças aos teus conselhos, fui aprendendo que momentos de resfriamento são igualmente necessários, até mesmo na determinação de ondas de calor. Pela introdução nesse mundo da programação, até então desconhecido pra mim, minha gratidão, Professor!

Meus agradecimentos também ao Prof. David, sempre interessado no andamento da pesquisa e nos seus resultados dentro dessa nova temática. Teve muito significado a tua confiança no meu trabalho, em especial no apoio de representar o laboratório num evento externo, internacional. Mais uma vez, a gota d'água experimentando novas formas e descobrindo ambientes até então não familiares. Pelo seu próprio desejo, e por agentes que, sabiamente e em conjunto, moldam essa transformação.

À Dra. Marie-Paule Bonnet e ao Dr. Saulo Aires de Souza, agradeço pelo aceite em participar da banca e, com suas considerações, contribuir com a melhoria do meu trabalho. Também participando da banca, Prof. Dr. Anderson Ruhoff, meu apreço pela tua contribuição nesse meu processo de formação enquanto mestre, seja com as disciplinas que com entusiasmo lecionava, ou participando da discussão sobre os rumos da pesquisa que, àquela época, ainda careciam, naturalmente, de correções atmosféricas.

Gostaria de agradecer também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento; a Sebastião Piccolroaz, Marco Toffolon e Bruno Majone, pela disponibilização gratuita do modelo Air2Water; ao Laboratório de Ecotecnologia e Limnologia Aplicada (LELA), pelo apoio científico e revisão deste trabalho; ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pela ótima infraestrutura e incentivo à pesquisa.

No meu retorno ao mundo acadêmico, pessoas especiais se apresentaram. Matheus, tua parceria se manifesta de diversas formas, como a água no ciclo hidrológico. Seja na minha pesquisa, que foi se consolidando a partir das tuas navegações anteriores pela Mangueira, seja pelas conversas no RU ou nas caronas vespertinas em horários fielmente respeitados. Mesmo sem estarmos mais fisicamente juntos na sala do LELA, tua presença segue viva, pela amizade que construímos e por tantas outras a que me apresentaste.

A essas amizades, construídas dentro do IPH, sou muito, mas muito grato. Danrlei, Cléber e Karla, os vôleis sem vocês não seriam os mesmos. Maurício e Itza, os Unos e as risadas que dali saíam, da mesma forma. Bruno e Marina, o retorno de vocês à terra do samba e de tantos outros gêneros foi especial demais, oportunizando-nos laços ainda mais estreitos. Ju e Gean, as notas musicais que trocamos foram cheias de significado pra mim. Assim como o rio nunca é o mesmo a cada seção, sigo transformado dessas interações!

À Família Floripa, onde iniciei minha jornada hidráulica, muito bem apadrinhado, o meu carinho. Dindo e Dinda, vocês estão juntos nessa nova conquista, de forma um pouco mais distante dessa vez, mas não menos importante. Seguem comigo os aprendizados que tive com vocês, também compartilhados com o Lucas e a Ju, com quem tive a sorte de ficar bem próximo novamente nas últimas semanas do mestrado. Invertendo a dinâmica de quem recebe e quem visita, foi um prazer dividir meu quarto com vocês!

Com a Família de Porto Alegre, minha terra natal, finalizo os agradecimentos. Afinal, a gota d'água que precipita e desce à terra já foi algum dia um embrionário núcleo higroscópico. Depois de 10 anos fora, o núcleo que revisito é o familiar, da mesma forma que vocês, Pai, Mãe e João, a mim revisitaram. Como era de se esperar, não éramos mais os mesmos recursos hídricos. Felizmente, isso não impediu que os processos hidrológicos inerentes a esse novo *loop* do ciclo se desenvolvessem. Meu coração, navegador, que vira, e que virou, é vermelho pelo amor de vocês e azul pela água do nosso chimarrão!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Temperatura da água monitorada via sensor termal em função.....	8
Figura 2: Etapas desenvolvidas e séries temporais estimadas via sensoriamento remoto e modelagem.	12
Figura 3: Fluxograma da PSO acoplada ao Air2Water junto à etapa de ajuste do modelo.	17
Figura 4: Destaque do Lago Superior. Fonte: adaptada de Piccolroaz <i>et al.</i> (2013).	18
Figura 5: Etapa de ajuste do modelo Air2Water para o período de calibração (1994 a 2005).	22
Figura 6: Etapa de ajuste do modelo Air2Water para o período de verificação (2006 a 2011).	22
Figura 7: Convergência de 50 soluções candidatas da PSO na etapa de ajuste do modelo.	23
Figura 8: Convergência de 5000 soluções candidatas da PSO na etapa de ajuste do modelo.	23
Figura 9: Localização da lagoa Mangueira/RS e da estação meteorológica	27
Figura 10: Relação entre temperatura superficial da água estimada e observada no período de calibração.....	31
Figura 11: Etapas desenvolvidas previamente à etapa de determinação das ondas de calor lacustres.	33
Figura 12: Frequência de ocorrência de ondas de calor lacustres para os 26 MCGs	35
Figura 13: Anomalia dos valores médios de duração das ondas de calor lacustres	37
Figura 14: Anomalia dos valores médios de intensidade média das ondas de calor lacustres	38
Figura 15: Valores médios de intensidade média para as.....	38
Figura 16: Anomalia dos valores médios de intensidade cumulativa para as ondas de calor lacustres	40
Figura 17: Anomalia dos valores médios de intensidade máxima para as ondas de calor lacustres	41
Figura 18: Valores médios de intensidade máxima para as ondas de calor lacustres	41
Figura 19: Anomalia dos valores médios de taxa de aquecimento para as ondas de calor lacustres	42
Figura 20: Distribuição interanual dos valores médios de intensidade média das ondas de calor lacustres projetadas para a lagoa Mangueira/RS.....	43
Figura 21: Distribuição interanual dos valores médios de duração das ondas de calor lacustres projetadas para a lagoa Mangueira/RS.....	44
Figura 22: Distribuição interanual dos valores médios de duração total das ondas de calor lacustres projetadas para a lagoa Mangueira.....	45
Figura 23: Porcentagem de MCGs cujas projeções indicam ao menos uma onda de calor lacustre que se estendeu por mais de 1 estação para a lagoa Mangueira/RS....	47
Figura 24: Porcentagem de MCGs cujas projeções indicam ao menos uma onda de	47
Figura 25: Porcentagem de MCGs cujas projeções indicam ao menos uma onda de calor lacustre que se estendeu por mais de 3 estações para a lagoa Mangueira/RS. .	48
Figura 26: Porcentagem de MCGs cujas projeções indicam ao menos uma onda de calor lacustre que se estendeu por mais de 4 estações para a lagoa Mangueira.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores médios de NSE e tempo de processamento para cada número de partículas na PSO.	20
Tabela 2: Valores médios da RMSE e tempo de processamento para cada número de partículas na PSO.	21
Tabela 3: Características do produto MOD11A1v061. Adaptada de WAN, et al. (2021).	28
Tabela 4: Faixa de variação recomendada para um sistema lacustre com 2,6m de profundidade.	30
Tabela 5: Percentual de dados válidos junto às diferentes séries temporais.	30
Tabela 6: Valores de medida de desempenho na etapa de ajuste da versão completa do modelo.	30
Tabela 7: Conjunto de parâmetros obtido na rodada de ajuste do modelo com melhor valor de RMSE.	31
Tabela 8: Níveis de radiação, de aumento médio global na temperatura do ar e desafios projetados	32
Tabela 9: Períodos estabelecidos para cada cenário associado às séries temporais.	33
Tabela 10: Índices para determinação das ondas de calor. Adaptada de Hobday, et al. (2016).	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GEE - Gases de efeito estufa

IPCC - Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas (do inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change*)

MCGs - Modelos climáticos globais (do inglês, *Global Climate Models*)

MODIS - Espectroradiômetro de imageamento de resolução moderada (do inglês, *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)

NSE - Eficiência Nash-Suttcliffe (do inglês, *Nash-Suttcliffe Efficiency*)

PSO - Otimização por enxame de partículas (do inglês, *Particle Swarm Optimization*)

RMSE - Raiz quadrática média do erro (do inglês, *Root Mean Squared Error*)

SSPs - Trajetórias socioeconômicas compartilhadas (do inglês, *Shared Socioeconomic Pathways*)

SCSS– rasas costeiras subtropicais austrais (do inglês, *shallow coastal subtropical Southern*)

SW - Quente do Sul (do inglês, *Southern warm*)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Temperatura do ar e projeções climáticas	1
1.2. Temperatura da água de sistemas lacustres	2
1.2.1. Sensoriamento remoto da temperatura da água	2
1.2.2. Modelos de estimativa da temperatura da água	8
1.3. Eventos extremos de temperatura	12
1.4. Justificativa	13
1.5. Questões científicas	13
1.6. Objetivos	14
1.6.1. Objetivo principal	14
1.6.2. Objetivos específicos	14
1.7. Organização da dissertação	14
2. DESEMPENHO DA PSO NO AJUSTE DE MODELO DE ESTIMATIVA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DA ÁGUA DE LAGOS	15
2.1. Introdução	16
2.2. Metodologia	17
2.2.1. Particle Swarm Optimization (PSO)	17
2.2.2. Área de estudo	18
2.2.3. Ajuste do modelo	19
2.3. Resultados e discussão	20
2.4. Conclusão	23
3. AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE ONDAS DE CALOR NA LAGOA MANGUEIRA/RS EM PERÍODO HISTÓRICO E SOB A PERSPECTIVA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	24
3.1. Introdução	25
3.2. Metodologia	26
3.2.1. Área de estudo	26
3.2.2. Modelo de estimativa de temperatura da água	27
3.2.3. Sensoriamento remoto aplicado à temperatura da água	28
3.2.4. Ajuste do modelo Air2Water	29
3.2.5. Modelos climáticos globais	32
3.2.6. Determinação de ondas de calor lacustres	34
3.3. Resultados e Discussão	35
3.3.1. Índices das ondas de calor lacustres	36
3.3.2. Distribuição interanual das ondas de calor lacustres	43
3.3.3. Distribuição intranual das ondas de calor lacustres	46
3.4. Conclusão	49
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
5. REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

1.1. Temperatura do ar e projeções climáticas

A temperatura do ar é considerada como o grau de agitação das moléculas na coluna atmosférica a uma dada altura do solo (AGATHANGELIDIS, et al., 2022). Classificada como uma variável meteorológica (WOOLWAY, et al., 2021b), a temperatura do ar pode ser utilizada para avaliar as mudanças climáticas em curso e estimar cenários futuros (BRÊDA, 2021). Dentro desse contexto, dados de temperatura do ar podem ser obtidos a partir de modelos climáticos globais (MCGs), configurando-se as séries estimadas de temperatura do ar como projeções climáticas futuras geradas pelos MCGs.

Inerentes às projeções climáticas futuras, existem incertezas associadas aos cenários de emissão de gases do efeito estufa (SORRIBAS, et al., 2016), condições atmosféricas que determinam a performance dos MCGs. Ainda que as projeções climáticas futuras de um único MCG possam adequadamente representar a climatologia de um dado local, seus resultados vêm se mostrando inferiores aos obtidos por um conjunto desses modelos (TEJADAS, et al., 2016). Quando considerada uma ampla série de MCGs, é possível identificar a magnitude das incertezas associadas às projeções climáticas e a convergência dos resultados desses conjuntos de modelos (BRÊDA, 2021).

A partir da intercomparação de modelos acoplados, cujas versões são publicadas periodicamente no Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, a integração de MCGs confere maior precisão e confiabilidade às projeções climáticas e aos impactos dela decorrentes (BRÊDA, 2021). Nesse sentido, a integração de MCGs é uma prática comum no contexto de mudanças climáticas, e já foi utilizada, por exemplo, na projeção de padrões de temperatura do ar na Bacia do Rio Paraguai Superior, em que um aumento na temperatura do ar foi observado para a média climatológica de todos os meses do ano em ambos os períodos de tempo analisados (BRAVO, et al., 2014).

No presente estudo, a integração de MCGs foi também considerada para avaliação da temperatura do ar. Junto à coluna atmosférica, a temperatura do ar exerce influência na dinâmica térmica das águas continentais, o que é relevante a nível de monitoramento ambiental. Dentro desse contexto, a temperatura da água, outra variável aqui estudada, tem o seu valor alterado através das trocas com o meio externo dada sua natureza não conservativa (FEITOSA, et al., 2008).

1.2. Temperatura da água de sistemas lacustres

Os sistemas lacustres, representados por lagos e lagoas, estão associados apenas a 0,26% do total de água doce na Terra (COLLISCHONN, et al., 2015). Nesse cenário, estão em constante condição de vulnerabilidade, sendo também sensíveis às mudanças ambientais e climáticas (BARBOSA, et al., 2019). Altos valores de temperatura da água podem afetar diretamente as comunidades aquáticas que vivem nos sistemas lacustres (PICCOLROAZ, et al., 2013), além de potencialmente comprometer outros serviços ambientais a eles associados (WOOLWAY, et al., 2021b). Dada essa relevância em nível de políticas climáticas e ambientais, sistemas lacustres são considerados indicadores climáticos essenciais pela Organização Meteorológica Mundial, estando contemplados entre os 21 principais aspectos do clima (WMO, 2016).

Os sistemas lacustres podem ser monitorados através de parâmetros que identificam suas características físicas, químicas e/ou biológicas (BARBOSA, et al., 2019). Entre os parâmetros físico-químicos tipicamente utilizados para caracterizar os sistemas lacustres, neste estudo será dada ênfase à temperatura, *driver* de processos físicos, químicos e biológicos nesses ecossistemas (PICCOLROAZ, et al., 2013). Em um lago estratificado, por exemplo, a temperatura da água não somente define zonas como também as conecta, numa perspectiva hidrodinâmica (STUMM, 2004). Entretanto, dados de temperatura da água obtidos em campo ainda são escassos (TAVARES, et al., 2019a).

Alternativamente, informações de satélites oportunizam a obtenção desses dados com uma maior cobertura espacial e temporal, o que não é comum para medições *in situ*, geralmente custosas e de complexa operação (HANDCOCK, et al., 2012). Para contornar a escassez de dados de temperatura da água medidos *in situ*, destacam-se como crescentes aplicações o uso de sensoriamento remoto e de modelos de estimativa da temperatura da água, melhor elucidadas nas seções 1.2.1 e 1.2.2, respectivamente. Essas técnicas foram, no presente estudo, aplicadas a dois sistemas lacustres, apresentados nas seções 2.2.2 (Lago Superior) e 3.2.1 (lagoa Mangueira).

1.2.1. Sensoriamento remoto da temperatura da água

A obtenção de parâmetros de qualidade da água associados às águas continentais é facilitada pelos dados de sensoriamento remoto (BARBOSA, et al., 2019). Com o auxílio de sensores a bordo de satélites, podem ser estimados parâmetros de qualidade da água como alternativa às medições em campo, que, quando contínuas, tornam-se complexas a nível de operação. Nesse contexto, o sensoriamento remoto viabiliza um monitoramento

sistemático da condição qualitativa dos corpos hídricos superficiais em escala regional e a um baixo custo (HANDCOCK, et al., 2012).

Ainda que o sensoriamento remoto oportunize um efetivo monitoramento espacial e temporal de parâmetros de qualidade da água, alguns desafios ainda são observados. Um deles, na faixa do visível (0,4 a 0,7 μm), é o fato de a absorbância da água ser bastante elevada, implicando uma reflectância pouco maior que 5% (MOREIRA, 2001). Assim, são necessários sensores de alta sensibilidade para detectar os sinais refletidos pelos componentes associados aos parâmetros de qualidade da água de interesse.

No sensoriamento remoto óptico, que contempla o visível e o infravermelho próximo (BARBOSA, et al., 2019), observa-se a maior penetração da radiação solar na coluna d'água. Justamente nessa faixa de comprimento de onda do espectro eletromagnético onde há grande interação da radiação solar com os componentes presentes na água, existe, entretanto, muita interferência atmosférica. Estima-se que tal perturbação, causada pelas substâncias presentes na atmosfera, seja na ordem de 90% (NOVO, 2001).

Na caracterização do meio aquático via sensoriamento remoto óptico (faixa do visível e do infravermelho próximo), existem dificuldades na discriminação dos sinais refletidos pelos componentes opticamente ativos associados aos parâmetros de qualidade da água. Tais componentes apresentam espectros de absorção semelhantes, assim como, por correspondência, os espectros de reflexão, podendo haver sobreposição dos sinais de interesse entre cada substância opticamente ativa presente na água (NOVO, 2001).

Dadas as limitações de quantificar os parâmetros associados à condição qualitativa dos corpos hídricos via sensoriamento remoto óptico, é usual o monitoramento da temperatura da água no infravermelho termal (HANDCOCK, et al., 2012). Nessa banda, que opera com as radiações eletromagnéticas emitidas pelos objetos presentes na Terra em função de seus valores de emissividade e temperatura (AEB, 2008), os sensores a bordo de satélites detectam sinais do infravermelho distante (CCRS, 2015) e sua respectiva fundamentação teórica será aqui explorada.

A temperatura superficial de corpos d'água continentais é usualmente monitorada na faixa do infravermelho termal (TAVARES, et al., 2019a). A escolha desta banda no processo de sensoriamento remoto pode ser fundamentada pelas Leis de Radiação de um Corpo Negro. A radiação total emitida por um corpo negro é, segundo a Lei de Stefan-Boltzmann, proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta (Equação 1). Esta radiação energética emitida por um corpo negro, conforme a Lei do Deslocamento de

Wien, varia para diferentes valores de comprimento de onda e de temperatura (JENSEN, 2007), e é matematicamente expressa na Equação 2.

$$M_y = \sigma * T^4 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

M_y = total de radiação emitida por um corpo negro [W/m²];

σ = constante de Stefan-Boltzmann [W/(m².K⁴)];

T = temperatura absoluta do corpo negro [K].

$$\lambda_{m\acute{a}x} = k/T \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

$\lambda_{m\acute{a}x}$ = comprimento de onda dominante [μ m];

k = constante de Wien [μ m.K];

T = temperatura absoluta do corpo negro [K].

A partir dessas duas Leis de Radiação de Corpo Negro, picos de radiação energética emitidos pela água podem ser verificados na mesma janela espectral onde se aproxima de um corpo negro: entre 8 e 14 μ m. Nesta faixa de comprimento de onda, que compreende o infravermelho termal, a água emite elevadas taxas de energia e, portanto, são fortes os sinais a serem detectados pelos sensores de satélites que operam nesta banda (HANDCOCK, et al., 2012). Justifica-se, assim, a satisfatória resolução na estimativa da temperatura da água via sensoriamento remoto na banda do infravermelho termal.

A determinação da temperatura da água propriamente dita, via sensoriamento remoto na banda do infravermelho termal, é fundamentada pela Lei de Planck (JENSEN, 2007). Configurada como outra Lei de Radiação de um Corpo Negro, tal formulação possibilita calcular, para um dado comprimento de onda, a energia radiante emitida por um corpo negro em função da sua temperatura (Equação 3). Já que a radiância espectral do sensor é a variável efetivamente medida, a Lei de Planck pode ser reescrita isolando a temperatura, variável de interesse (HANDCOCK, et al., 2012).

$$T_b (\lambda, W) = \frac{c_2}{\lambda * \ln\left(\left(\frac{c_1}{W * \lambda^5}\right) + 1\right)} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

T_b = temperatura de brilho do objeto [K];

W = total de radiação espectral emitida [W/(m.m²)];

λ = comprimento de onda de emissão da radiação [m];

$c_1 = 3,7242.10^{-16}$ [W/m²];

$c_2 = 1,4388.10^{-2}$ [m.K].

Como resultado da Equação 3, obtém-se a temperatura de brilho de um objeto, que, conforme Handcock, et al. (2012), é assim denominada por não estar ainda associada à correção da emissividade. Reescrita a Lei de Planck, a incógnita passa a ser a temperatura de brilho, determinada indiretamente a partir da radiância espectral emitida pelo alvo de interesse. Esse sinal registrado pelos sensores de satélites pode conter perturbações atmosféricas (JIMÉNEZ-MUÑOZ, et al., 2010) e, portanto, precisa ser corrigido.

A correção atmosférica trata da conversão da radiação lida pelo sensor a bordo do satélite na radiação efetivamente emitida pelo alvo junto à superfície da Terra. Existem regiões do infravermelho onde as interferências atmosféricas são maiores, como, por exemplo, na faixa de comprimento de onda entre 3 a 5 μm (HANDCOCK, et al., 2012). Ainda que a perturbação causada por radiações indesejadas seja minimizada na janela atmosférica onde tipicamente operam os sensores de satélites na banda do infravermelho termal (entre 8 e 14 μm), os efeitos atmosféricos devem ser considerados.

Segundo Handcock, et al. (2012), o vapor d'água é considerado uma das maiores fontes de erro no sensoriamento remoto junto à banda do infravermelho termal. Assim, devem ser corrigidos os efeitos das radiações absorvidas e emitidas especialmente pelo vapor d'água presente na atmosfera. Sinais indesejados que chegam até os sensores a bordo de satélites junto ao topo da atmosfera podem ser representados, no processo de correção atmosférica, por dois fatores (HANDCOCK, et al., 2012). Ao mesmo tempo que existe uma radiação espectral aditiva dado o caminho entre alvo e satélite através da atmosfera, há também uma atenuação por absorção e espalhamento da radiação espectral emitida pela superfície. Matematicamente, tais fatores são representados na Equação 4.

$$L_g(\lambda) = \frac{L_s(\lambda) - L_p(\lambda)}{\tau(\lambda)} \quad \text{(Equação 4)}$$

Em que:

L_g = radiância espectral emitida pela superfície [$\text{W}/(\text{sr} \cdot \mu\text{m} \cdot \text{m}^2)$];

L_s = radiância espectral registrada no sensor [$\text{W}/(\text{sr} \cdot \mu\text{m} \cdot \text{m}^2)$];

L_p = radiância espectral do caminho [$\text{W}/(\text{sr} \cdot \mu\text{m} \cdot \text{m}^2)$];

τ = transmissividade da atmosfera (adimensional);

λ = comprimento de onda em que opera o sensor [μm].

Corrigidos os efeitos atmosféricos, a radiância espectral que chega aos sensores a bordo de satélites não está mais perturbada por sinais que não são de interesse. Todavia,

no sensoriamento remoto da temperatura na banda do infravermelho termal, é necessária ainda a correção da emissividade (HANDCOCK, et al., 2012). A temperatura de brilho obtida por meio da Equação 3 deve ser, por consequência, corrigida de acordo com a real temperatura emitida pelo alvo do satélite junto à superfície da Terra.

A partir destas bases físicas, é possível discutir o comportamento da água enquanto corpo cinza. Conforme indicam Handcock, et al. (2012), corpos negros verdadeiros não existem junto ao ambiente natural. Assim, a emissividade dos corpos d'água observados na superfície terrestre será sempre inferior a 1, pois não se comportam exatamente como um corpo negro (SHUTTLEWORTH, 2012). De qualquer modo, mesmo que se configure como um corpo cinza, a água apresenta valores de emissividade próximos de 1 entre 8 e 14 μm (HANDCOCK, et al., 2012), aproximando-se assim de um corpo negro nesta faixa de comprimento de onda compreendida pela banda do infravermelho termal.

Para estimativa da emissividade dos corpos d'água, bibliotecas espectrais podem ser utilizadas como fonte de dados, segundo Handcock, et al. (2012). Matematicamente, valores de emissividade podem ser calculados a partir da Lei de Kirchoff (Equação 5), dada a correlação com os índices de refletividade correspondentes. Com tal formulação, devido ao princípio de conservação de energia (SHUTTLEWORTH, 2012), é possível compreender por que a água possui altos valores de emissividade em correspondência aos índices de refletividade bastante baixos (HANDCOCK, et al., 2012).

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) \quad \text{(Equação 5)}$$

Em que:

ε = emissividade do material em um dado comprimento de onda (adimensional);

ρ = refletividade do material em um dado comprimento de onda (adimensional).

Na banda do infravermelho termal, a radiância espectral dos sensores é uma combinação da temperatura real do objeto e sua respectiva emissividade de superfície. Para melhor representar a temperatura superficial da água, a correção da emissividade de superfície da água é necessária pois a temperatura radiante, diferentemente da cinética, é obtida indiretamente por medições da radiância espectral registrada pelos sensores termais junto à camada superficial da água, não sendo assim representativas da temperatura cinética da coluna d'água (HANDCOCK, et al., 2012).

Entre os sensores de satélites que operam na banda do infravermelho termal, neste estudo será utilizado o MODIS, especificamente seu produto de temperatura da superfície terrestre: MOD11A1. A bordo do satélite Terra (WAN, et al., 2021), tal sistema sensor

opera segundo a base física antes referenciada para estimar a temperatura dos alvos do satélite junto à superfície terrestre. Como vantagem, o MOD11A1 já contempla em seus produtos as correções atmosféricas e de emissividade discutidas anteriormente. Os respectivos dados são, portanto, disponibilizados com valores de temperatura real do objeto de interesse e sem a sobreposição de radiações indesejadas.

Tais correções são possíveis à medida que o sensor MODIS possui 2 bandas termiais. Junto ao produto MOD11A1, o sensor termal opera nas assim chamadas bandas 31 e 32, cujos intervalos de comprimentos de onda são 10,78 a 11,28 μm e 11,77 a 12,27 μm , respectivamente (TAVARES, et al., 2019a). A partir das diferentes radiâncias espectrais medidas em cada banda, a correção dos efeitos atmosféricos se dá por meio de um algoritmo de janela dividida generalizada, cujas condições de céu claro são estabelecidas por meio de outro produto do MODIS, o MOD35 (WAN, 2013).

Já a emissividade, de acordo com Tavares, et al. (2019), é de difícil estimativa por sensoriamento remoto. Na faixa de comprimento de onda que contempla as bandas 31 e 32 do sensor MODIS (8 e 14 μm), a emissividade da água é próxima de 1, conforme referenciado anteriormente. No produto MOD11A1, utiliza-se 0,9885, média dos valores médios de emissividade da água dado o cruzamento entre as bandas 31 e 32 (TAVARES, et al., 2019a). Tais etapas do sensoriamento remoto termal são resumidas no Apêndice I.

Para o monitoramento de corpos d'água via sensores termiais, a obtenção dos valores de temperatura se dá junto à camada subsuperficial de água, que corresponde aos 100 μm superiores do corpo d'água (Figura 1). Nessa fina camada, dado o fluxo evaporativo da água perdendo calor para o ar no processo de evaporação, a temperatura diminui e pode chegar a ser de 0,1 a 1,5°C inferior àquela medida na coluna d'água (HANDCOCK, et al., 2012). Tal efeito, conhecido como de pele fria, não é intrinsecamente corrigido pelo MOD11A1 e, portanto, para o presente estudo foi admitido um pós-processamento dos dados de temperatura superficial da água para remover o viés de subestimá-los.

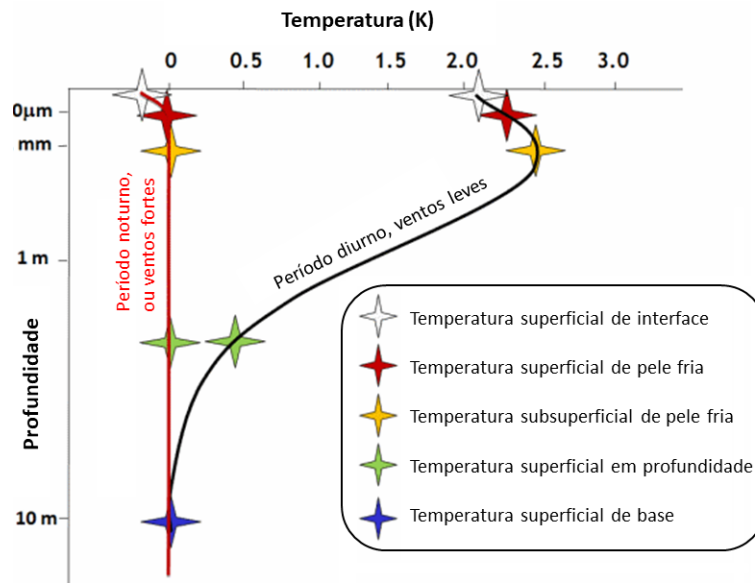


Figura 1: Temperatura da água monitorada via sensor termal em função da profundidade do corpo d'água. Adaptada de GHRSSST (2023).

1.2.2. Modelos de estimativa da temperatura da água

Previamente à estimativa da variável de interesse na etapa de simulação, os modelos devem ser ajustados, junto às etapas aqui tratadas como de calibração e verificação. Para cada uma dessas etapas, são adotadas medidas de desempenho que mensuram a precisão do modelo na estimativa da variável de interesse. Esse processo de ajuste está associado ao método de otimização que, para o presente estudo, trata-se da otimização por enxame de partículas - do inglês, *Particle Swarm Optimization* (PSO).

Na PSO, cada partícula do enxame simboliza uma solução candidata que compartilha informações em busca do ótimo global (KENNEDY, et al., 1995). O número de partículas que participam desse processo de otimização pode ser variado, e o desempenho da PSO a partir dessa variação foi com afinco avaliado no capítulo 2. Ademais, dados os números aleatórios de distribuição uniforme na formulação do método, confere-se componentes de aleatoriedade ao modelo a que está acoplada a PSO.

O processo de modelagem, que estima a variável de interesse a partir de outras de mais fácil obtenção, varia de acordo com o tipo de aplicação. Para o presente estudo, a variável de interesse é a temperatura da água, especificamente de sistemas lacustres. Dada a escassez de dados de temperatura da água medidos *in situ* (TAVARES, et al., 2019a), uma alternativa é o uso de modelos de estimativa de temperatura da água. Para sistemas lóticos, modelos de regressão podem ser adequadamente utilizados, não valendo o mesmo para sistemas lacustres, de dinâmica térmica diferente (PICCOLROAZ, et al., 2013).

Mais complexos que os modelos de regressão, os modelos estocásticos, ou empíricos, admitem componentes aleatórias aos processos hidrológicos. Por outro lado, os modelos determinísticos não consideram a aleatoriedade dos processos hidrológicos, resultando de aplicações diretas das leis da Física, Química e/ou Biologia (NAGHETTINI, et al., 2007). A principal desvantagem dos modelos determinísticos é a necessidade de diferentes dados meteorológicos como entrada (CAISSIE, 2006). Assim, aconselha-se o emprego síncrono das abordagens estocástica e determinística para bem representar as variabilidades e as regularidades inerentes aos processos hidrológicos (NAGHETTINI, et al., 2007).

Aliando equações de base física à calibração estocástica dos parâmetros do modelo, destaca-se o modelo híbrido de estimativa da temperatura da água de lagos Air2Water (PICCOLROAZ, et al., 2018). Tal ferramenta foi utilizada no presente estudo e já foi aplicada com lagos ao redor do globo (PICCOLROAZ, et al., 2020), do Planalto Tibetano (GUO, et al., 2022), da China (WANG, et al., 2024), do Hemisfério Norte (TOFFOLON, et al., 2014), e na lagoa Mangueira (TAVARES, et al., 2019b), uma das áreas de estudo aqui avaliada (Seção 3.2.1).

A formulação do modelo de estimativa de temperatura da água Air2Water segue aqui as referências de Toffolon et al. (2014). Inicialmente, considera-se que, em geral, a troca calor superficial afeta apenas uma porção do volume total do lago, com o balanço de calor para essa camada podendo ser representado pela Equação 7. Dado que a profundidade média da camada superficial $D_s = V_s/A$, a Equação 7 pode ser reescrita isolando a variação de temperatura da água ao longo do tempo (Equação 8).

$$V_s \left(\frac{dT_w}{dt} \right) = A \left(\frac{\phi_{liq}}{\rho * c_p} \right) \quad (\text{Equação 7})$$

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{\phi_{liq}}{\rho * c_p * D_s} \quad (\text{Equação 8})$$

Em que:

V_s : volume da camada superficial do lago [comprimento³];

T_w : temperatura da água do lago (°C);

t : unidade de tempo [tempo];

A : área superficial do lago [comprimento²];

ϕ_{liq} : fluxo de calor líquido por unidade de área [calor/(tempo.comprimento²)];

ρ : densidade da água [peso/comprimento³];

c_p : calor específico da água (cal/g.°C);

D_s : profundidade média da camada superficial [comprimento].

Outro termo importante na formulação do modelo Air2Water é a taxa de mudança da temperatura superficial (δ), que corresponde à razão entre o volume da camada superficial (V_s) e o volume de referência (V_r). Nesse sentido, para uma mesma área superficial A , a taxa de mudança da temperatura superficial δ pode ser interpretada como a relação entre a profundidade média da camada superficial D_s e a profundidade média de referência (D_r). Admitindo que V_r é o volume de fato afetado pela troca de calor (TOFFOLON, et al., 2014), δ é inversamente proporcional à D_r e pode ser expresso conforme a Equação 9.

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{\delta} * \frac{\phi_{liq}}{\rho * c_p * D_r} \quad (\text{Equação 9})$$

Em que:

D_r : profundidade média de referência [comprimento];

δ : taxa de mudança da temperatura superficial (adimensional).

Para o modelo de estimativa da temperatura da água de Air2Water, assume-se que a temperatura do ar (T_a) é a variável determinante na variação da temperatura da água (T_w). Dessa forma, a troca de calor (Equação 7) pode ser simplificada na forma de uma equação diferencial ordinária em função de T_a , T_w e dos parâmetros do modelo (Equação 10 a 12). No presente trabalho, as versões do modelo utilizadas foram a de quatro e oito parâmetros, junto aos Capítulos 2 e 3, respectivamente.

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{\delta} * \{a_1 + a_2 * T_a - a_3 * T_w + a_5 * \cos[2\pi \left(\frac{t}{t_y}\right) - a_6]\} \quad (\text{Equação 10})$$

$$\delta = \exp\left(-\frac{T_w - T_h}{a_4}\right), \text{ para } T_w \geq T_h \quad (\text{Equação 11})$$

$$\delta = \exp\left(-\frac{T_w - T_h}{a_7}\right) + \exp\left(\frac{T_h}{a_8}\right), \text{ para } T_w < T_h \quad (\text{Equação 12})$$

Em que:

T_a : temperatura do ar (°C);

t_y : duração de um ano [tempo];

T_h : temperatura do hipolímnio (°C);

a_i : parâmetros do modelo, cujas unidades estão indicadas no Apêndice II.

Da versão de oito parâmetros para a versão de quatro parâmetros do Air2Water, uma das simplificações está associada à taxa de mudança da temperatura superficial δ . Para a versão de quatro parâmetros, assume-se que δ é constante para temperaturas menores que a do hipolímnio (T_h). Nesses casos, todo o volume de água do lago corresponde à sua camada superficial e contribui com a variação de temperatura da água ($\delta = 1$). Sob uma outra ótica física, valores de δ se aproximando de 0 indicam aumento nas forças de estratificação do lago. Com isso, a Equação 12 pode ser reescrita não contemplando mais os parâmetros a_7 e a_8 do modelo (Equação 13).

$$\delta = 1, \text{ para } T_w < T_h \quad (\text{Equação 13})$$

Outra simplificação entre a versão de oito e quatro parâmetros do modelo Air2Water é a retirada do forçamento sinusoidal imposto externamente, associado aos parâmetros a_5 e a_6 do modelo. Dada a periodicidade anual inerente às temperaturas do ar T_a e da água T_w , considera-se como indiretamente contemplado o forçamento meteorológico externo (TOFFOLON, et al., 2014). Assim, mesmo para a versão mais simples do Air2Water, de quatro parâmetros (Equação 14), os padrões sazonais de forçamento meteorológico são implicitamente considerados através do ajuste modelo (PICCOLROAZ, et al., 2013).

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{\delta} * \{a_1 + a_2 * T_a - a_3 * T_w\} \quad (\text{Equação 14})$$

Além das versões do modelo Air2Water de quatro e oito parâmetros, existe também a versão de seis parâmetros. No Apêndice II, são indicados os significados físicos dos parâmetros do modelo para cada versão, desde a mais simplificada, de quatro parâmetros, até a versão completa, de oito parâmetros. No presente trabalho, a nomenclatura utilizada para os parâmetros do modelo de estimativa de temperatura da água Air2Water, em suas diferentes versões, seguiu as referências de Toffolon et al. (2014).

Embora a série temporal de temperatura do ar em superfície seja a única entrada do Air2Water, sua aplicação está condicionada à uma série de temperatura da água, a ser utilizada na etapa de ajuste do modelo (PICCOLROAZ, et al., 2013). Assim, viabiliza-se o uso do Air2Water, depois de ajustado, a partir das séries temporais de temperatura do ar e de temperatura da água. Para o presente estudo, a série temporal de temperatura da água foi obtida via sensoriamento remoto, cujo uso pode ser combinado com modelos de estimativa de temperatura da água de sistemas lacustres (TAVARES, et al., 2019a). Um fluxograma ilustrando a aplicação dessas séries temporais é ilustrada abaixo (Figura 2).

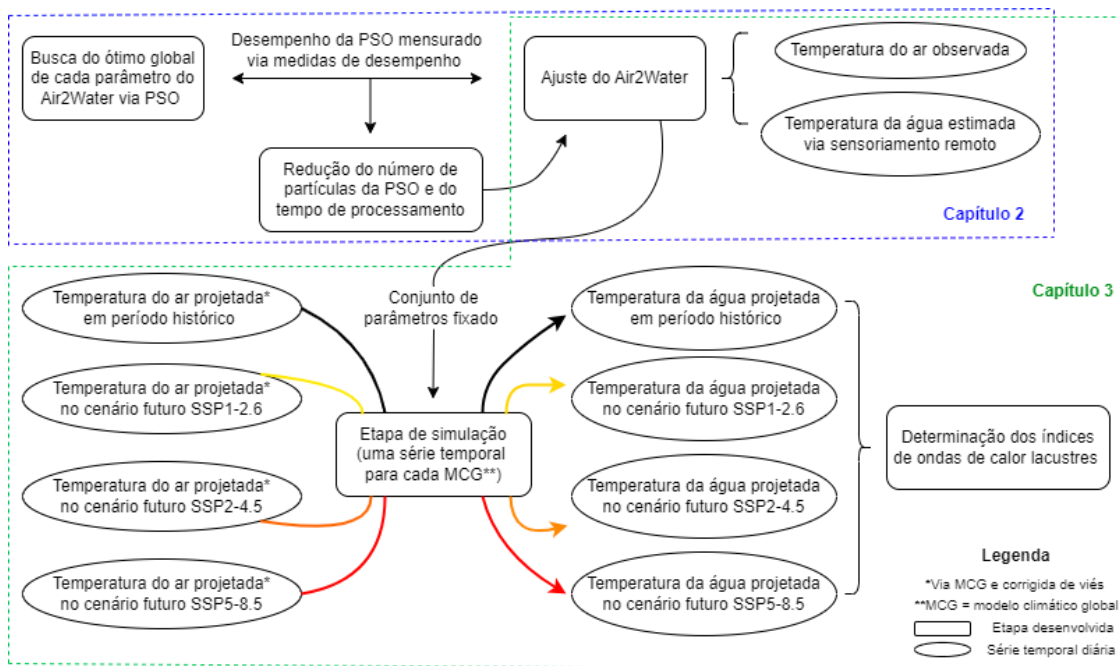


Figura 2: Etapas desenvolvidas e séries temporais estimadas via sensoriamento remoto e modelagem.

1.3. Eventos extremos de temperatura

Os primeiros eventos extremos a serem caracterizados e mensurados entre si em escala global estavam associados à temperatura do ar (SCHLEGEL, et al., 2018). Um período de pelo menos 5 dias com temperatura do ar superior ao percentil 90% de uma série histórica tida como linha de base foi admitido como onda de calor atmosférica (PERKINS, et al., 2013). Tal estrutura métrica, proposta para caracterização de um evento anormalmente quente, foi então empregada para o ambiente marinho (HOBDDAY, et al., 2016) e, posteriormente, para sistemas lacustres (WOOLWAY, et al., 2021b).

Os mesmos índices concebidos para ondas de calor atmosféricas serão aqui utilizados para avaliação da ocorrência de ondas de calor em sistemas lacustres. Ao passo que as ondas de calor junto ao sistema atmosférico são caracterizadas com valores temperatura do ar, as ondas de calor em sistemas lacustres são determinadas por prolongados períodos de altas temperaturas da água (WOOLWAY, et al., 2021a). Tais eventos extremos, num cenário de mudanças climáticas, tendem a ser mais intensos e duradouros com o clima em aquecimento (WOOLWAY, et al., 2021b).

Um potencial impacto da ocorrência de ondas de calor lacustres é a perda, talvez irreversível, de espécies de peixes, que podem ter seus limites fisiológicos superados pela temperatura da água em elevação (WOOLWAY, et al., 2021a). O aumento na temperatura da água, que interfere diretamente na solubilidade do oxigênio dissolvido e na densidade da coluna d'água, pode ter como efeito ainda o aumento das florações de cianobactérias,

adaptadas a suportar valores mais elevados de temperatura da água. Implicações como essas podem afetar o fornecimento de serviços ambientais essenciais associados aos lagos, como abastecimento público e irrigação (WOOLWAY, et al., 2021b).

1.4. Justificativa

A temperatura do ar, embora usual na caracterização das condições de tempo e clima, foi utilizada para caracterizar eventos extremos em sistemas atmosféricos recentemente (SCHLEGEL, et al., 2018). Assim, ondas de calor atmosféricas foram determinadas a partir de valores de temperatura do ar superiores ao percentil 90% de uma série histórica utilizada como linha de base por um período de pelo menos 5 dias (PERKINS, et al., 2013). Tal estrutura métrica para caracterizar um evento extremo como onda de calor foi aproximada para sistemas aquáticos pela primeira vez em estudo aplicado ao ambiente marinho, sendo então utilizados valores de temperatura da água (HOBDAY, et al., 2016).

Na sequência, o conceito de ondas de calor foi empregado para sistemas lacustres, dada a sensibilidade de lagos a eventos extremos de temperatura (WOOLWAY, et al., 2021b). Nessa abordagem, apenas pouco mais de 10% dos sistemas lacustres analisados no estudo situavam-se no Hemisfério Sul. Entre tais ecossistemas, caracterizados como indicadores climáticos (WMO, 2016), destacam-se as lagoas rasas costeiras subtropicais, vulneráveis às mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global (WIELICZKO, et al., 2021). Nesse sentido, o presente trabalho avaliou a dinâmica térmica da lagoa Mangueira/RS, buscando identificar a ocorrência de ondas de calor sob a perspectiva de uma lagoa rasa costeira subtropical austral, localizada no extremo sul do Brasil.

1.5. Questões científicas

Com este estudo, pretende-se responder as perguntas listadas abaixo, correlacionadas aos objetivos central e específicos apresentados na sequência:

Q1. Há alteração no desempenho do ajuste de modelo de estimativa de temperatura da água variando a quantidade de partículas do método de otimização acoplado?

Q2. É possível observar a ocorrência de ondas de calor lacustres na lagoa Mangueira? Sob a perspectiva de mudanças climáticas, há alteração no padrão de ocorrência desses eventos entre o cenário histórico e os cenários futuros?

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo principal

A partir da avaliação de desempenho do método de otimização acoplado a um modelo de estimativa de temperatura da água, avaliar a ocorrência de ondas de calor lacustres na lagoa Mangueira/RS, em período histórico e sob a perspectiva de mudanças climáticas.

1.6.2. Objetivos específicos

1.6.2.1. Avaliar o ajuste de modelo de estimativa de temperatura da água a partir de diferentes números de partículas utilizadas no método de otimização acoplado (**Q1**).

1.6.2.2. Avaliar a ocorrência de ondas de calor lacustres na lagoa Mangueira, RS, comparando o padrão de ocorrência desses eventos entre o cenário histórico e os cenários futuros a partir de índices de ondas de calor lacustres (**Q2**).

1.7. Organização da dissertação

A fim de responder as questões científicas acima listadas, esta dissertação foi estruturada em dois artigos, com o primeiro associado ao objetivo específico 1.6.2.1: **DESEMPENHO DA PSO NO AJUSTE DE MODELO DE ESTIMATIVA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DA ÁGUA DE LAGOS** (capítulo 2). Já o segundo artigo está associado ao objetivo específico 1.6.2.2 e é intitulado como: **AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE ONDAS DE CALOR NA LAGOA MANGUEIRA/RS EM PERÍODO HISTÓRICO E SOB A PERSPECTIVA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS** (capítulo 3).

2. DESEMPENHO DA PSO NO AJUSTE DE MODELO DE ESTIMATIVA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DA ÁGUA DE LAGOS

Carlos Henrique Saldanha Ferrari; Juan Martín Bravo; David da Motta-Marques & Lúcia Ribeiro Rodrigues

Resumo: A temperatura da água regula processos químicos, físicos e biológicos em lagos. Ainda que esteja associada, enquanto parâmetro, à limnologia física, a temperatura da água está também intimamente associada à disponibilidade de oxigênio na coluna d'água e, portanto, à distribuição de espécies aquáticas nos lagos. Embora expressem relevantes informações destes ecossistemas, dados de temperatura da água medidos *in situ* de ambientes límnicos são, muitas vezes, de difícil obtenção. Esse cenário pode ser contornado com a utilização de dados obtidos via sensoriamento remoto, ou a partir de modelos de simulação de temperatura da água, objeto de estudo deste trabalho, que analisou o desempenho da otimização por enxame de partículas - do inglês, *Particle Swarm Optimization* (PSO) - no ajuste do Air2Water, modelo de estimativa da temperatura da água de lagos a partir de séries de temperatura do ar. Foi verificado o desempenho do método de otimização mono-objetivo acoplado ao Air2Water considerando 50, 100, 1000, 2000 e 5000 partículas e duas funções-objetivo (NSE e RMSE). Para a versão com 4 parâmetros do modelo, os resultados mostraram que o desempenho da PSO, mensurado por meio da função objetivo, foi, para a área de estudo aqui utilizada, pouco sensível à quantidade de partículas utilizadas, indicando a possibilidade de ajuste do modelo com um menor número de partículas comparado ao valor *default*, de 2000 partículas. Assim, foi obtido um ganho no tempo computacional que pode chegar a representar uma redução de 40 vezes no tempo de execução do processo de ajuste do Air2Water.

Abstract: Water temperature regulates chemical, physical and biological processes in lakes. Although it is associated, as a parameter, with physical limnology, water temperature is also closely associated with the availability of oxygen in the water column and, therefore, with the distribution of aquatic species in lakes. Whilst they express relevant information from these ecosystems, water temperature data measured *in situ* from limnic environments are often difficult to obtain. This scenario can be circumvented using data obtained via remote sensing, or from water temperature simulation models, the object of study of this work, which analyzed the performance of Particle Swarm Optimization (PSO) in the adjustment of the Air2Water, model of estimating the temperature of the water of the lakes from series of air temperature. The performance of the mono-objective optimization method coupled to Air2Water was verified considering 50, 100, 1000, 2000 and 5000 particles and two objective functions (NSE and RMSE). For the version with 4 parameters of the model, the results showed that the performance of the PSO, measured by the objective function, was, for the study area used here, a little sensitive to the number of particles used, indicating the possibility of adjusting the model with a smaller number of particles compared to the default value, of 2000 particles. Thus, a gain in computational time was obtained that may represent a reduction of 40 times in the execution time of the Air2Water adjustment process.

Palavras-Chave: Limnologia física; PSO; modelo de simulação de temperatura da água.

2.1. Introdução

Os ambientes límnicos representam, do total de água na Terra, uma pequena parcela de 3% (COLLISCHONN, et al., 2015). Por outro lado, estão associados a importantes serviços ambientais, encontrando-se, nessa ótica quantitativa, pressionados pela atividade humana e, assim, em condição de vulnerabilidade (BARBOSA, et al., 2019). O monitoramento destes corpos d'água é, nesse cenário, de grande interesse e pode ser realizado por meio de parâmetros que expressam suas características físicas, químicas e biológicas. Especificamente para lagos, o parâmetro crítico físico é a temperatura da água, que influencia diretamente os eventos de estratificação, além de reger processos químicos e biológicos nestes ecossistemas (PICCOLROAZ, et al., 2013).

Embora traduzam muitas informações do metabolismo e da dinâmica de um lago na limnologia física, dados *in situ* de temperatura da água são de difícil obtenção (TAVARES, et al., 2019a). As causas vão desde o difícil acesso ao local de coleta (GUO, et al., 2022) até a complexa operação de estações capazes de mensurar tal parâmetro (HANDCOCK, et al., 2012). Para contornar a escassez de dados desta natureza, técnicas de sensoriamento remoto configuram-se como alternativas, bem como a utilização de modelos que estimam séries de temperatura da água a partir de variáveis que podem ser obtidas mais facilmente, como a temperatura do ar (PICCOLROAZ, et al., 2013).

Neste contexto, destaca-se o Air2Water, modelo de estimativa da temperatura superficial da água de lagos. Uma das vantagens no uso do Air2Water é a necessidade de uma única variável de entrada, a temperatura do ar, principal reguladora da troca de calor junto à superfície de lagos (LIVINGSTONE, et al., 2007). Dessa forma, o Air2Water configura-se como uma ferramenta bastante útil, já que dados de temperatura do ar podem ser disponibilizados com alta resolução por modelos climáticos globais reconstruídos em período histórico ou projetados em cenários futuros (PICCOLROAZ, et al., 2013).

Com o objetivo de tornar ainda mais atrativo o uso do modelo Air2Water na estimativa da temperatura superficial da água, vêm sendo propostas melhorias como a de incremento no número de parâmetros, em relação à versão completa de 8, para representar de forma mais real a simulação dos processos de formação de gelo na superfície de lagos (GUO, et al., 2022). No caso do presente estudo, o intuito é avaliar, para determinadas aplicações, a possibilidade de redução no custo computacional do processo de ajuste do modelo sem efeitos negativos sobre o seu desempenho, aqui mensurado pelos valores de função objetivo e para a versão mais simplificada do Air2Water, de 4 parâmetros, cujos resultados foram validados no artigo de Piccolroaz e colaboradores (2013).

2.2. Metodologia

2.2.1. Particle Swarm Optimization (PSO)

O método de otimização acoplado ao Air2Water, modelo utilizado neste estudo, é a otimização por enxame de partículas - do inglês, *Particle Swarm Optimization* (PSO). Por meio da PSO, cuja metodologia é na sequência resumida, o Air2Water obtém as variáveis de decisão a serem utilizadas na etapa subsequente, conforme esquema da Figura 3. No presente estudo, onde os procedimentos de calibração e verificação são considerados como etapa de ajuste, a versão do modelo utilizada foi a mais simples, de quatro parâmetros, pois foram quatro as variáveis de decisão determinadas via PSO.

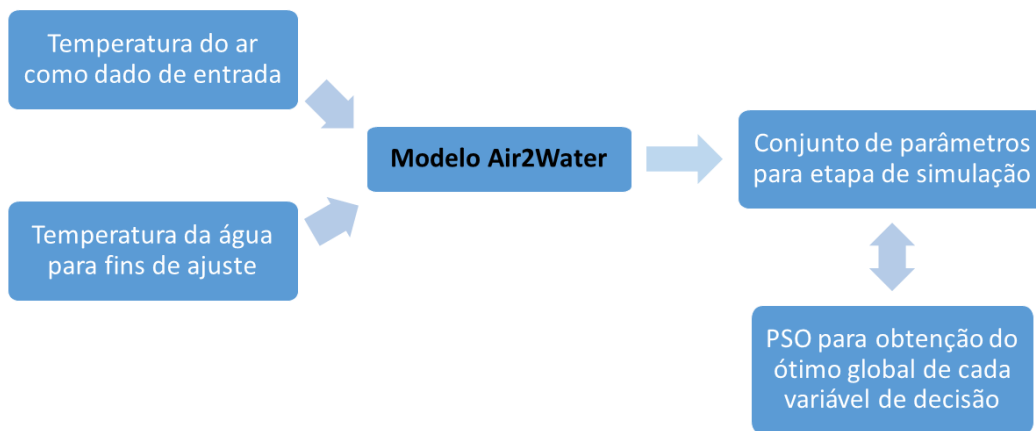


Figura 3: Fluxograma da PSO acoplada ao Air2Water junto à etapa de ajuste do modelo.

A expressão “enxame de partículas” está associada ao aprendizado coletivo entre cada partícula do enxame, um dos princípios da PSO (KENNEDY, et al., 1995), que pode ser entendido como o compartilhamento de informações entre as soluções candidatas que, em busca do ótimo global, têm a sua velocidade dada, em cada iteração, pela Equação 6. Além do princípio de aprendizado coletivo, associado matematicamente ao coeficiente c_2 , outro componente da PSO é a quantidade de partículas que participam do processo de ajuste do modelo, que será neste estudo avaliado de modo a verificar o desempenho do método de otimização acoplado ao Air2Water.

$$V_{t+1} = w * V_t + c_1 * r_1 * (X_{best(t)} - X_{(t)}) + c_2 * r_2 * (G_{best(t)} - X_{(t)}) \quad (\text{Equação 15})$$

Em que:

$V_{(t+1)}$: velocidade da partícula na nova iteração [comprimento/tempo];

$V_{(t)}$: velocidade da partícula na iteração anterior [comprimento/tempo];

w: coeficiente de inércia;
 c_1 : coeficiente de aprendizado individual [comprimento/ tempo²];
 c_2 : coeficiente de aprendizado coletivo [comprimento/tempo²];
 r_1 e r_2 : números aleatórios com distribuição uniforme U [0,1];
 $X_{best(t)}$: melhor posição da partícula até a iteração anterior [comprimento];
 $X_{(t)}$: posição da partícula na iteração anterior [comprimento];
 $G_{best(t)}$: melhor posição entre as partículas do enxame até a iteração anterior [comprimento].

O coeficiente c_1 associa-se à memória própria de cada solução candidata na busca pelo ótimo global, além do aprendizado coletivo, associado ao c_2 . Ambos os coeficientes, no presente estudo, foram fixados em 2 (KENNEDY, et al., 1995), valor que lhes é tipicamente atribuído no método PSO, cujo componente de aleatoriedade é dado pelos números aleatórios r_1 e r_2 , enquanto o de inércia, aqui estabelecido entre 0,4 e 0,9, é expresso junto ao 1º termo da Equação 15. O 2º e 3º termo são atualizados a cada iteração da PSO na etapa de ajuste do modelo a partir da nova posição da solução candidata dentro do espaço de busca em relação à melhor posição do grupo e à sua própria.

2.2.2. Área de estudo

O Lago Superior, objeto de teste do Air2Water (PICCOLROAZ, et al., 2013), foi também a área de estudo do presente trabalho para verificar o desempenho da PSO acoplada ao modelo à quantidade de partículas utilizadas em sua etapa de ajuste. Entre os Grandes Lagos da América do Norte, o Lago Superior, ilustrado na Figura 4, é o mais profundo e o de maior área superficial (PICCOLROAZ, 2016), configurando-se como um ambiente límnico de volume bastante expressivo (12.000 km³).



Figura 4: Destaque do Lago Superior. Fonte: adaptada de Piccolroaz *et al.* (2013).

Classificado como dimítico quanto ao padrão de estratificação, o Lago Superior mistura-se duas vezes ao ano, quando a estratificação termal enfraquece e a ação do vento sobre a sua superfície é suficientemente forte para haver a mistura total da coluna d'água, cujo valor médio é de 147 metros (PICCOLROAZ, 2016). Esse dado de profundidade, embora possa ser utilizado previamente ao ajuste do modelo na estimativa da faixa de variação de cada variável de decisão, não foi empregado no presente estudo dado o intuito de analisar o desempenho da PSO sem uma etapa de pré-processamento.

2.2.3. Ajuste do modelo

A única variável de entrada do Air2Water, temperatura do ar, foi obtida junto à estação de responsabilidade do Centro Nacional de Dados de Boias (PICCOLROAZ, et al., 2013), que está situada a aproximados 35 metros da superfície do Lago Superior, altura suficiente para não ser danificada quando há formação de gelo nos meses mais frios. Dessa forma, atende-se a um dos requisitos do modelo de não existência de falhas na série de temperatura do ar, diferentemente da série de temperatura superficial da água, onde falhas são admitidas sem comprometimento do seu desempenho, desde que devidamente identificadas juntos aos arquivos auxiliares de processamento.

Além da temperatura do ar como variável de entrada do Air2Water, a temperatura superficial da água é utilizada como balizadora do processo de ajuste do modelo. Neste caso, fez-se uso da série de temperatura da água obtida via sensoriamento remoto junto ao Laboratório de Pesquisa Ambiental dos Grandes Lagos, vinculado à Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (PICCOLROAZ, et al., 2013). A série temporal de temperatura superficial da água tem início e fim compatível com a de temperatura do ar (entre 1994 e 2011), com o período de calibração estabelecido nos primeiros 2/3 do intervalo (entre 1994 e 2005) e o de verificação no terço restante (entre 2006 e 2011).

O ajuste do modelo, por sua vez, é mensurado por meio das medidas de desempenho, também conhecidas como função-objetivo. No presente estudo, foram utilizadas duas funções-objetivo: NSE (*Nash–Sutcliffe Efficiency*) e RMSE (*Root-mean square error*), que também foram utilizadas no artigo de apresentação do Air2Water (PICCOLROAZ, et al., 2013). Dois tipos de procedimentos de ajuste foram executados: i) maximização da NSE, cujo valor máximo é igual a 1 e ii) minimização da RMSE, cujo valor mínimo é igual a zero. No total, executou-se 32 procedimentos de ajuste, com diferentes números de partículas utilizadas na PSO: 50, 100, 1000, 2000 e 5000.

2.3. Resultados e discussão

Inicialmente, serão apresentados e discutidos os resultados do ajuste do modelo Air2Water com a NSE como função-objetivo, pois é uma medida de desempenho amplamente utilizada em aplicações hidrológicas (PICCOLROAZ, et al., 2013). Os valores médios de NSE para os períodos de calibração e verificação são mostrados na Tabela 1, cuja primeira coluna indica o número de partículas utilizadas pela PSO e, sobrescrita, a quantidade de procedimentos de ajuste. Além disso, são apresentados os tempos médios de processamento em cada cenário para um computador com 2 processadores Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2697 v3 @ 2.60 GHz.

N° de partículas (PSO)	NSE calibração	NSE verificação	Tempo [min]
50⁵	0,95	0,96	1,71
100⁵	0,95	0,96	3,34
1000⁵	0,95	0,96	34,13
2000²	0,95	0,96	67,86
5000²	0,95	0,96	161,62

Tabela 1: Valores médios de NSE e tempo de processamento para cada número de partículas na PSO.

Os valores médios de NSE obtidos mostraram-se iguais aos indicados no artigo de apresentação do modelo para o mesmo conjunto de dados e mesma versão do Air2Water: 0,95 para calibração e 0,97 para verificação (PICCOLROAZ, et al., 2013). Dado que estes valores de função objetivo associam-se ao desempenho da PSO no ajuste do modelo, constata-se a manutenção da precisão do Air2Water em simular a temperatura superficial da água do lago em estudo a partir de temperatura do ar, mesmo com a redução do número de partículas utilizadas pela PSO. Ademais, entre o cenário com 50 partículas e o com 2000 (*default* do Air2Water), o ajuste do modelo ocorre num tempo de processamento quase 40 vezes menor, otimizando o custo computacional.

Além da igualdade dos resultados durante a calibração e a verificação para cada cenário, os valores médios de NSE muito próximos mesmo com a redução no número de partículas utilizadas pela PSO estão associados aos valores iguais para as variáveis de decisão na etapa de ajuste do modelo para cada cenário. Dessa forma, 50 partículas foram suficientes para obter o mesmo conjunto de parâmetros otimizados quanto utilizado a NSE como medida de desempenho para este estudo de caso.

Na sequência, apresenta-se e discute-se valores de RMSE como medida de desempenho da PSO no ajuste do Air2Water. Na Tabela 2, são mostrados os valores médios de RMSE para os períodos de calibração e verificação, o tempo médio de processamento e, sobrescrita junto à primeira coluna, a quantidade de procedimentos de ajuste em cada cenário, que corresponde ao número de partículas utilizadas pela PSO. Para a medida de desempenho agora considerada, expressa na mesma unidade que a variável a ser posteriormente simulada (em °C), busca-se a minimização da RMSE entre temperatura superficial da água observada e simulada (PICCOLROAZ, et al., 2018).

N° de partículas (PSO)	NSE calibração	NSE verificação	Tempo [min]
50³	1,17	1,06	1,82
100³	1,17	1,06	3,29
1000³	1,17	1,06	33,29
2000²	1,17	1,06	64,60
5000²	1,17	1,06	163,81

Tabela 2: Valores médios da RMSE e tempo de processamento para cada número de partículas na PSO.

Os valores de RMSE obtidos mostraram-se muito próximos dos obtidos no artigo de apresentação do modelo para o mesmo conjunto de dados e mesma versão do Air2Water: 1,21 para calibração e 1,08 para verificação (PICCOLROAZ, et al., 2013). Associados ao desempenho da PSO no ajuste do modelo, estes valores de função objetivo indicam inclusive uma melhora na precisão do Air2Water em simular a temperatura superficial da água do Lago Superior, a partir de temperatura do ar, visto que menores valores de RMSE representam menores erros na simulação dos dados. Assim como se observou anteriormente com a NSE como medida de desempenho, houve manutenção nos valores de RMSE mesmo com a redução do número de partículas utilizadas pela PSO.

Na Figura 5 e Figura 6, apresenta-se o ajuste entre temperatura superficial da água observada e simulada a partir de temperatura do ar pelo Air2Water entre os períodos de calibração e verificação. Graficamente, é possível observar, para ambos os períodos, a proximidade do ajuste para os valores de temperatura superficial da água, além de uma pequena subestimação das altas temperaturas, já observada na aplicação do modelo junto à Lagoa Mangueira (TAVARES, et al., 2019b), uma lagoa rasa costeira subtropical austral. Acerca das baixas temperaturas, especialmente no período de verificação, constata-se novamente uma subestimação dos valores de temperatura superficial da água.

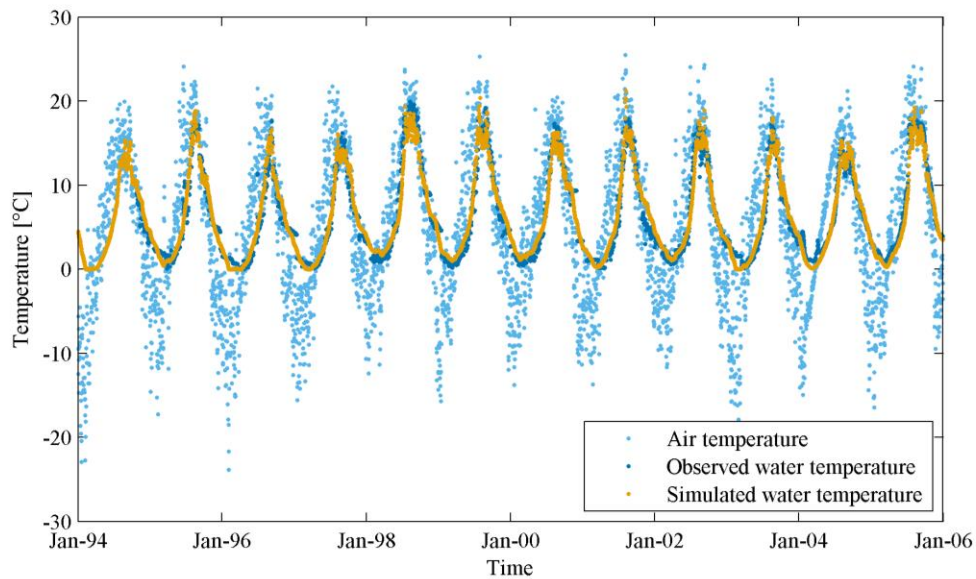


Figura 5: Etapa de ajuste do modelo Air2Water para o período de calibração (1994 a 2005).

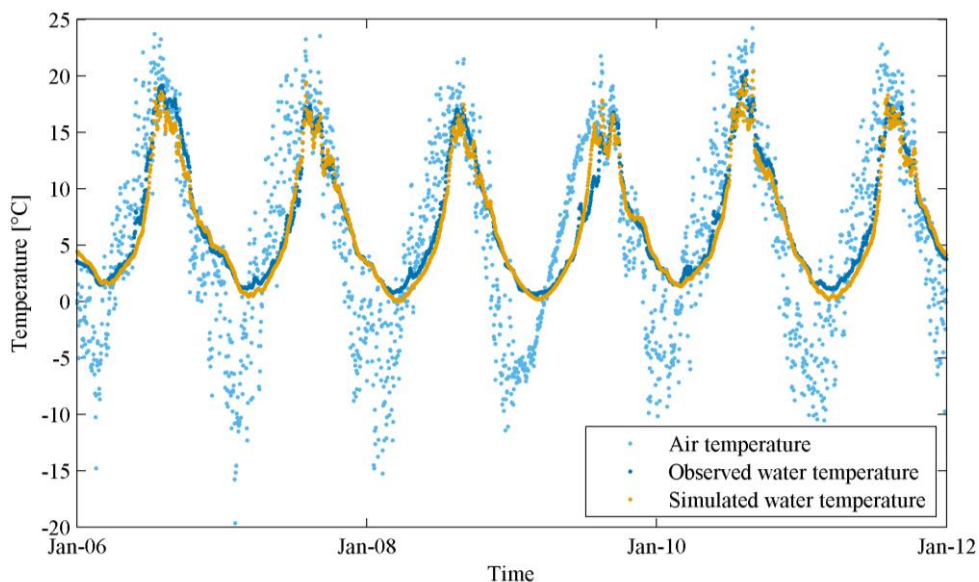


Figura 6: Etapa de ajuste do modelo Air2Water para o período de verificação (2006 a 2011).

Com destaque agora para o período de calibração na etapa de ajuste do modelo, apresenta-se a convergência das soluções candidatas na PSO em torno do ótimo global para 50 partículas (Figura 7) e para 5000 partículas (Figura 8). Mesmo com menos partículas utilizadas pela PSO, obtém-se o mesmo ótimo global (em laranja) para cada um dos quatro parâmetros da versão mais simples do Air2Water, ratificando a ideia de que, no presente estudo, a redução no número de partículas da PSO não implicou em piora nos valores de função-objetivo, trazendo como benefício menores custos computacionais e tempos médios de processamento na etapa de ajuste do modelo.

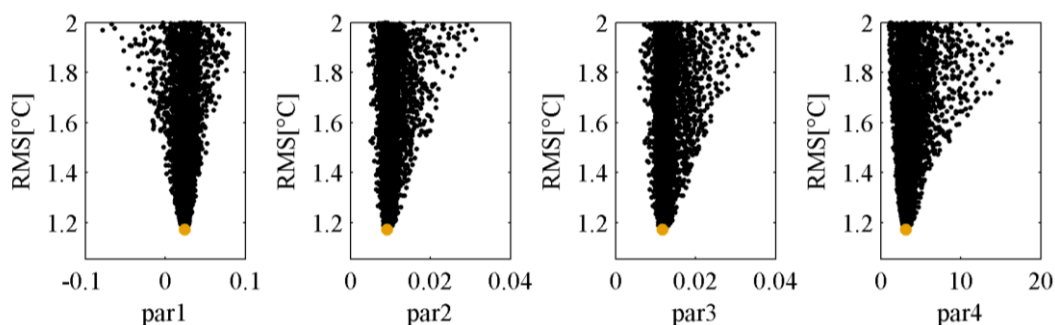


Figura 7: Convergência de 50 soluções candidatas da PSO na etapa de ajuste do modelo.

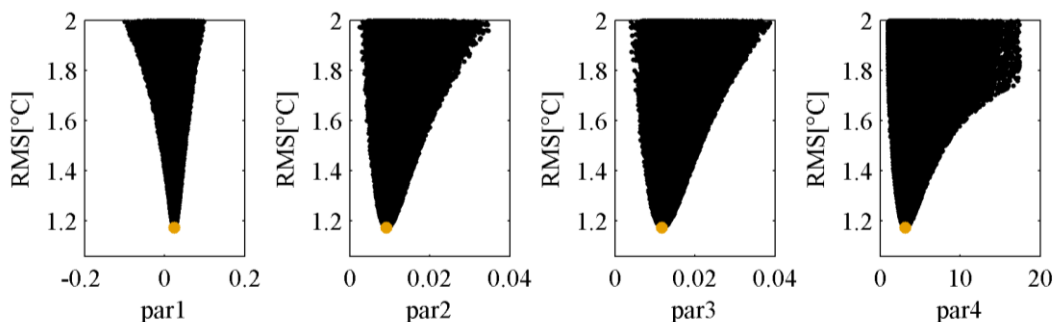


Figura 8: Convergência de 5000 soluções candidatas da PSO na etapa de ajuste do modelo.

2.4. Conclusão

Na análise da redução da quantidade de partículas utilizadas pela PSO, método de otimização utilizado para esta aplicação, não foram identificados impactos negativos no desempenho do ajuste do modelo, mensurado pelas medidas de desempenho aqui apresentadas e discutidas. Assim, a estimativa dos parâmetros para simular a temperatura superficial da água do lago estudado se manteve bastante satisfatória mesmo com menos partículas utilizadas pela PSO. Em conjunto, foram reduzidos os custos computacionais e os tempos médios de ajuste do modelo, tornando-se ainda mais atrativo.

Além da possibilidade aqui apresentada e discutida para o uso do Air2Water, é possível ainda a sua utilização na estimativa da temperatura superficial de lagos com diferentes características morfológicas (GUO, et al., 2022), outra vantagem que o torna particularmente atraente. Com isso, para trabalhos posteriores, recomenda-se a aplicação deste modelo para estimar, em período histórico e em projeções futuras, a temperatura superficial de lagoas rasas costeiras e subtropicais, vulneráveis às mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global (WIELICZKO, et al., 2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do artigo apresentado no capítulo 2, indicou-se uma satisfatória performance do modelo Air2Water na estimativa da temperatura superficial da água do Lago Superior. Dadas as medidas de desempenho obtidas no método de otimização acoplado ao modelo, destaca-se ainda a possibilidade de redução do custo computacional na etapa de ajuste do Air2Water, que já possui como atrativo o fato de ter uma única variável de entrada. Na estimativa da temperatura superficial da água da lagoa Mangueira, tratada no capítulo 3, evidenciou-se novamente uma satisfatória performance do modelo. Entre as versões do Air2Water avaliadas, os valores de medida de desempenho para a versão completa se mostraram superiores aos da versão mais simples, utilizada no capítulo 2.

Com as medidas de desempenho apresentadas nos capítulos 2 e 3, o uso do Air2Water como modelo de estimativa da temperatura superficial da água de sistemas lacustres é uma grande possibilidade, mesmo com lagos de diferentes morfometrias. Nesse contexto, configura-se como potencial ferramenta de manejo e gestão de sistemas lacustres, cujos processos físicos, químicos e biológicos são regidos pela temperatura da água. Já que o único dado de entrada é a temperatura do ar, de disponibilização mais facilitada, o modelo Air2Water torna-se ainda mais atraente para aplicações sob a perspectiva de mudanças climáticas, como a aqui estudada.

Acerca das ondas de calor lacustres projetadas para a lagoa Mangueira em período histórico e cenários futuros, foi constatada a ocorrência desses eventos extremos e suas respectivas magnitudes a partir dos índices aqui avaliados. Com os MCGs utilizados no presente estudo, as projeções de onda de calor lacustre associadas ao cenário futuro mais crítico (SSP5-8,5) foram as que mais se destacaram frente às do cenário histórico. Entre os resultados obtidos para os índices de onda de calor lacustre, as anomalias de maior magnitude apresentadas foram para a intensidade cumulativa, possivelmente pelo fato de, por definição, ser produto de outros dois índices: duração média e intensidade média.

Na avaliação dos índices duração média e intensidade média numa distribuição interanual, outra vez o cenário futuro mais crítico (SSP5-8,5) se destacou frente ao cenário histórico. Tal qual se observou para as anomalias médias entre os 26 MCGs utilizados, os valores médios entre os MCGs desses índices para o cenário SSP5-8,5 foram bastante superiores aos do cenário histórico durante os 20 anos analisados. Além da duração média e intensidade média, o agrupamento das ondas de calor lacustres segundo a sua duração total tornou mais evidente os efeitos das mudanças climáticas sobre a lagoa Mangueira.

A ocorrência de ondas de calor lacustres se estendendo por uma ou mais estações foi também avaliada no presente estudo a partir dos valores de duração obtidos em cada MCG utilizado. Além dos resultados indicando eventos de onda de calor lacustre se estendendo por duas ou mais estações para os cenários futuros SSP2-4,5 e SSP5-8,5, foram projetadas também para a lagoa Mangueira ondas de calor lacustres atravessando as quatro estações do ano no cenário SSP5-8,5. Num estado permanente de ocorrência, conforme definição referenciada no presente estudo, tais eventos deixariam de ter um caráter transitório e/ou extremo. Ademais, a elevação da temperatura da água, por tempo prolongado, a níveis extremos é particularmente preocupante à medida que tem implicações diretas nos processos físicos, químicos e biológicos sistemas lacustres, como a lagoa Mangueira.

5. REFERÊNCIAS

- AEB. 2008.** Agência Espacial Brasileira. *Formação continuada de professores: Curso Astronáutica e Ciências do Espaço – Sensoriamento Remoto.* 2008.
- AGATHANGELIDIS, I, et al. 2022.** Can Satellite-Based Thermal Anomalies Be Indicative of Heatwaves? An investigation for MODIS Land Surface Temperatures in the Mediterranean Region. *Remote Sensing.* 2022, Vol. 14.
- ÁVILA, Itzayana González, et al. 2021.** Southern coastal subtropical shallow lakes skin temperature driven by climatic and non-climatic factors. *Springer Nature - Environmental Monitoring and Assessment.* 2021.
- BARBOSA, C. C. F. , NOVO, E. M. L. de M. e MARTINS, V. S. 2019.** *Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações.* s.l. : Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Volume 1, 2019.
- BRAVO, J M, et al. 2014.** Climatic Change. *Impact of projected climate change on hydrologic regime of the Upper Paraguay River basin.* 2014, Vol. 127.
- BRÊDA, J P L F. 2021.** Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Gr. *Impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos da América do Sul através de projeções do CMIP5.* Porto Alegre : s.n., 2021.
- CAISSIE, D. 2006.** The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology.* 2006, Vol. 51(8), pp. 1389–1406.
- CAVALCANTI, R. M., et al. 2016.** Aplicação do modelo IPH-ECO na simulação da dinâmica da clorofila-A em lagoa costeira do RN. Natal - RN : s.n., 2016.
- CCRS. 2015.** Canada Centre for Remote Sensing: Remote Sensing Tutorial. *Fundamentals of Remote Sensing.* 2015.
- CEN. 2010.** CEN: European Committee for Standardization. *Water quality - Guidance standard on assessing the hydromorphological features of lakes.* Brussels : s.n., 2010.
- COLLISCHONN, W e DORNELLES, F. 2015.** *Hidrologia para Ciências Ambientais.* Porto Alegre : Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015. 2ª impressão.
- FANG, G. H. , et al. 2015.** Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrology Earth System Sciences.* 2015, Vol. 19, 6.
- FEITOSA, Fernando A C, et al. 2008.** *Hidrogeologia: conceito e aplicações.* s.l. : Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2008. 3ª edição - Revisão e Ampliada.
- GUO, L., et al. 2022.** An integrated dataset of daily lake surface water temperature over the Tibetan Plateau. *Earth System Science Data.* 2022, pp. 3411–3422.
- HANDCOCK, R N, et al. 2012.** Thermal Infrared Remote Sensing of Water Temperature in Riverine Landscapes. *Fluvial Remote Sensing for Science and Management.* 1, 2012.

- HOBDAY, A J , ALEXANDER, L V e PERKINS, S E. 2016.** A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *ELSEVIER - Progress in Oceanography*. 2016.
- IPCC. 2018.** Summary for Policymakers. [A. do livro] V MASSON-DELMOTTE, et al. *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways [...]*. Cambridge, UK and New York, NY e USA : Cambridge University Press, 2018.
- . **2022.** Summary for Policymakers. [A. do livro] H. -O. PÖRTNER, et al. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge (UK) and New York (USA) : Cambridge University Press, 2022.
- JENSEN. 2007.** Electromagnetic radiation principles. *Remote Sensing of Environment*. 2007.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., et al. 2010.** Atmospheric correction of optical imagery from MODIS and Reanalysis. *Remote Sensing of Environment*. 2010, Vol. 114, 110, pp. 2195-2210.
- KENNEDY, J. e EBERHART, R. . 1995.** Particle Swarm Optimization. Perth, WA, Australia : Institute of Eletrical and Eletronics Engineers (IEEE), 1995. Vol. IV, pp. 1942-1948.
- LIVINGSTONE, D. M. e PADISÁK, J. 2007.** Large-scale coherence in the response of lake surface-water temperatures to synoptic-scale climate forcing during summer. *Limnology and Oceanography*. 2007, 52 (2), pp. 896–902.
- MOREIRA, M A. 2001.** *Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação (1ª Edição)*. São Jose dos Campos, SP : s.n., 2001.
- NAGHETTINI, M. e PINTO, E. J. A. . 2007.** *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte : Serviço Geológico do Brasil (SGB), 2007.
- NOVO, E M L M. 2001.** Comportamento espectral da água. [A. do livro] P R Meneses e J S M Netto. *Sensoriamento Remoto - Reflectância de alvos naturais*. s.l. : UnB, 2001.
- PERKINS, S E e ALEXANDER, L V. 2013.** On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate*. 2013.
- PICCOLROAZ, S, TOFFOLON, M e MAJONE, B. 2013.** A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013.
- PICCOLROAZ, S, WOOLWAY, R I e MERCHANT, C J. 2020.** Global reconstruction of twentieth century lake surface water temperature reveals different warming trends depending on the climatic zone. *Climatic Change*. 2020.
- PICCOLROAZ, S. 2016.** Prediction of lake surface temperature using the air2water model: guidelines, challenges, and future perspectives. *Advances in Oceanography and Limnology*. 2016, pp. 36-50.
- PICCOLROAZ, S., et al. 2018.** On the predictability of lake surface temperature using air temperature in a changing climate: A case study for Lake Tahoe (U.S.A.). *Limnology and Oceanography*. 2018, pp. 243–261.

- SCHLEGEL, R W e SMIT, A J. 2018.** heatwaveR: A central algorithm for the detection of. *Journal of Open Source Software*. 2018.
- SHUTTLEWORTH, W J. 2012.** *Terrestrial Hydrometeorology (1ª edição)*. 2012.
- SORRIBAS, M V, et al. 2016.** Climatic Change. *Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin*. 2016, Vol. 136.
- STUMM, W. 2004.** Chemical processes regulating the composition of lake waters. [A. do livro] P E O'SULLIVAN e C S REYNOLDS. *The Lakes Handbook: Limnology and Limnetic Ecology*. Oxford : Blackwell Science , 2004.
- TAVARES, M H, et al. 2019a.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 11 *Estimativa da temperatura superficial da água por sensores remotos: acurácia e aplicabilidade com modelos de temperatura*. Porto Alegre : s.n., 2019a.
- TAVARES, M. H., MARQUES, D. M. e FRAGOSO JR., C. R. 2019b.** Combinando modelo de temperatura da água e sensoriamento remoto para estimar o efeito da mudança climática sobre a temperatura da lagoa Mangueira-RS. *XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. XXIII , 2019b.
- TEJADAS, B E, et al. 2016.** Revista Brasileira de Meteorologia. *Projeções de Vazão Afluente à Lagoa Mangueira com Base em Cenários de Mudanças Climáticas*. 2016, Vol. 31.
- TOFFOLON, M., et al. 2014.** Prediction of surface temperature in lakes with different morphology using air temperature. *Limnology Oceanography*. 2014, Vol. 59, 6.
- WAN, Z. 2013.** Users' Guide: MODIS Land Surface Temperature Products (Collection 6). ERI, University of California, Santa Barbara : s.n., 2013.
- WAN, Z, HOOK , S e HULLEY, G. 2021.** MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061. *LP DAAC MOD11A1*. [Online] USGS NASA, 2021. [Citado em: 15 de 05 de 2022.]
- WANG, W., et al. 2024.** The impact of extreme heat on lake warming in China. *Nature Communications*. 2024.
- WIELICZKO, A R, et al. 2021.** Meteorological drivers and ENSO influence on phytoplankton biomass dynamics in a shallow subtropical lake. *Springer Nature - Environmental Monitoring and Assessment*. 2021.
- WMO. 2016.** *The global observing system for climate: implmentarion needs*. s.l. : World Meteorological Organization (WMO): Global Climate Observing System (GCOS), 2016.
- WOOLWAY, R I, ANDERSON, E J e ALBERGEL, C. 2021a.** Rapidly expanding lake heatwaves under climate chang. *Enviromental Research Letters*. 2021a.
- WOOLWAY, R I, et al. 2021b.** Lake heatwaves under climate change. *Nature*. 2021b, Vol. 589.

Apêndice I: Aplicações do infravermelho termal no sensoriamento remoto da temperatura da água. Adaptada de Jensen (2007), Shuttleworth (2012) e Handcock et al. (2012).

Etapas	Escolha da banda espectral	Temperatura de brilho	Correção atmosférica	Correção da emissividade
Aplicação	Janela atmosférica com picos de radiação energética emitidos pelos corpos d'água	Determinação da temperatura de brilho via radiância espectral	Radiação registrada pelo sensor convertida na radiação emitida pelo alvo junto à superfície	Temperatura de brilho corrigida pela emissividade: temperatura real do objeto
Base Física	Leis de Stefan-Boltzmann e do Deslocamento de Wien	Lei de Planck	-	Lei de Kirchoff (conservação de energia)
Drivers	Temperatura do corpo negro, total de radiação por ele emitida e o respectivo comprimento de onda	Comprimento de onda de emissão da radiação	Transmissividade da atmosfera, radiações lidas no sensor e emitidas junto à superfície	Emissividade e refletividade do objeto
Entrada	-	Radiância espectral registrada no sensor	Temperatura de brilho via radiação lida no sensor	Temperatura de brilho do objeto junto à superfície
Saída	-	Temperatura de brilho	Temperatura de brilho do objeto junto à superfície	Temperatura real do objeto

Apêndice II: Significado físico dos parâmetros do modelo de estimativa da temperatura da água de Air2Water. Adaptada de Toffolon et al. (2014).

Parâmetros	Significado físico	Consideração
a1	Diferença residual entre a temperatura do ar e a temperatura superficial do lago	A periodicidade anual das forçantes meteorológicas é representada apenas pela temperatura do ar e pela temperatura superficial da água, que variam naturalmente ao longo do ano
a2	Associado à temperatura do ar e, indiretamente, à diferença entre esta e a temperatura superficial do lago	
a3	Associado à temperatura superficial do lago e, indiretamente, à diferença entre esta e a temperatura do ar	
a4	Força de estratificação termal direta, para temperaturas superficiais da água iguais ou superiores à do hipolímnio	
a5	Amplitude do termo sinusoidal imposto externamente	Um termo sinusoidal é imposto externamente para representar também a periodicidade anual das forçantes meteorológicas
a6	Fase do termo sinusoidal imposto externamente	
a7	Força de estratificação termal inversa, para temperaturas superficiais da água inferiores à temperatura do hipolímnio	A taxa de mudança da temperatura superficial δ varia para temperaturas superficiais da água inferiores à do hipolímnio
a8	Redução do fluxo de calor no período de cobertura do gelo	