

DINÂMICA DA VARIAÇÃO INTRADIÁRIA DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DA ÁGUA NAS LAGOAS COSTEIRAS DO RIO GRANDE DO SUL, REGIÃO SUL DO BRASIL

Matheus Henrique Tavares¹, Itzayana González Avila², Gláucia dos Santos Nascimento², José Rafael Cavalcanti², Alane Patrícia de Melo Souza², Augusto Hugo Farias da Cunha², David da Motta Marques², Anderson Ruhoff², Carlos Ruberto Fragoso Jr.³

¹Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, tavaresmatheush@gmail.com, ²Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, ³Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Alagoas, Maceió/AL

RESUMO

A temperatura da água regula muitos processos físicos, químicos e biológicos em lagos e reservatórios, desempenhando papel fundamental na dinâmica das comunidades aquáticas em diferentes escalas temporais. Imagens de sensoriamento remoto por satélite podem complementar medidas *in situ* para compreender a variabilidade espacial e temporal da temperatura da água. Neste trabalho, foi avaliada a dinâmica de variação intradiária da temperatura superficial de lagoas costeiras do Rio Grande do Sul, e analisado o efeito da área superficial sobre estes padrões, entre os anos de 2012 e 2017, utilizando o produto MODIS M*D11A1. Identificamos um padrão homogêneo da temperatura das lagoas, com marcada variação sazonal. Os maiores valores de ΔT foram observados durante o verão. A área superficial mostrou grande influência na redução da amplitude da variação da temperatura, com uma boa relação ($r^2 = 0,73$) entre o logaritmo da área e o ΔT .

Palavras-chave – Temperatura superficial da água, lagoas costeiras, dinâmica intradiária, MODIS, morfologia.

ABSTRACT

Water temperature regulates many physical, chemical and biological processes in lakes and reservoirs, having a fundamental role in the dynamics of aquatic communities in different temporal scales. Remote sensing imagery can complement the *in situ* monitoring to comprehend its spatial and temporal variability. In this work, we assessed the dynamics of the diel variation of the surface temperature of coastal lakes in Rio Grande do Sul, and analysed the influence of the superficial area on these patterns, between 2012 e 2017, using the MODIS product M*D11A1. We identified a homogeneous pattern on the lakes' temperature, with a pronounced seasonal variation. The highest values of ΔT were observed during summer. The superficial area showed great influence in the reduction of the amplitude of variation of the temperature, with good agreement ($r^2 = 0.73$) between the logarithm of the area and ΔT .

Key words – Water surface temperature, coastal lakes, diel dynamics, MODIS, morphology.

1. INTRODUÇÃO

A temperatura da água regula muitos processos físicos (solubilidade do oxigênio), químicos (taxas de reação) e biológicos (distribuição de espécies) em lagos e reservatórios [1], desempenhando papel fundamental na dinâmica das comunidades aquáticas em diferentes escalas temporais [2]. Lagos são considerados sentinelas da mudança climática por serem sistemas sensíveis ao ambiente que os cerca [3], e, por isso, a avaliação desta variável é essencial para entender o funcionamento e a estrutura destes ecossistemas, e os possíveis impactos desta mudança. As lagoas costeiras do Rio Grande do Sul possuem grande importância ecológica e humana, como fonte de água, para pesca e recreação, e têm sido estudadas com enfoque em características geológicas [4] e biológicas [5], porém pouco ainda se sabe sobre o padrão de variabilidade da temperatura destes corpos d'água.

Imagens de sensoriamento remoto por satélite podem complementar medidas *in situ* para compreender a variabilidade espacial e temporal da temperatura da água, dada à cobertura em escala sinótica em grandes áreas [6]. Apesar da temperatura estimada por sensoriamento remoto ser uma descrição apenas da temperatura de superfície da água, eles provêm informações úteis sobre o padrão de variação espacial e temporal da temperatura destes corpos d'água, e podem ser usado como referência para analisar os impactos da mudança climática sobre estes sistemas [7].

Os dados de satélites também podem ser utilizados para avaliar a dinâmica de variação da temperatura da água em diferentes escalas de tempo [8, 9]. Nesse sentido, muitos estudos trabalham com a dinâmica da temperatura em escalas anuais [7], sazonais [8], mensais [9] e diários [10], porém pouco é conhecido sobre a variação intradiária destes corpos d'água. De fato, como ressaltado no trabalho de Woolway e colaboradores [11], apesar de sua importância em processos ecológicos e biogeoquímicos, devido a apenas recente proliferação de sensores *in situ* de alta frequência, a análise do padrão de comportamento intradiário da temperatura de lagos e reservatórios foi pouco estudada na literatura. Além disso, a morfologia parece ter considerável importância nos processos nestes corpos d'água, indicado por estudos recentes [12, 13].

Para a análise da variação intradiária da temperatura, o sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua, pode ser usado, devido à passagem do satélite durante dois momentos do dia (matutino e noturno). Com o produto diário de temperatura do MODIS (M*D11A1), é possível verificar o

padrão de variação intradiária de diferentes lagos e relacionar com características morfológicas, como a área. O objetivo deste trabalho é avaliar a dinâmica da variação intradiária da temperatura superficial da água de lagoas costeiras do Rio Grande do Sul, e sua relação com a área, utilizando imagens do sensor MODIS.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo inclui 23 lagoas localizadas ao longo do litoral do Rio Grande do Sul com diferentes características morfológicas, com área variando de 2 km² a 120 km², como mostradas na Tabela 1. O clima é subtropical, com classificação Köppen tipo Cfa [14]. Estas lagoas tiveram um processo similar de formação geológica, resultando em corpos d'água em sua maioria rasas e, no caso das lagoas inseridas no sistema do rio Tramandaí, com diferentes tipos de conectividade [4]. Apesar de pertencer a este mesmo processo de formação, a lagoa Mangueira não foi considerada neste estudo por ser muito maior do que as demais, e estar inserida num sistema próprio, o sistema do TAIM.

Tabela 1: Nome, localização e área das lagoas consideradas neste estudo.

Lagoa	Latitude	Longitude	Área (km ²)
Azaleia	30°58'26"S	50°13'11"O	2,52
Barro Vermelho	30°39'11"S	50°29'37"O	4,84
Bacopari	30°31'30"S	50°24'30"O	9,27
Barros	29°55'45"S	50°22'30"O	92,37
Capão do Fundo	31°06'38"S	50°58'30"O	29,92
Cerquinha	30°15'31"S	50°16'36"O	5,89
Cidreira	30°11'50"S	50°15'13"O	15,62
Cipó	30°18'20"S	50°17'32"O	5,45
Custódias	30°12'10"S	50°11'17"O	9,08
Figueira	30°47'53"S	50°36'28"O	8,54
Fortaleza	30°7'50"S	50°14'56"O	18,17
Fundo	31°40'55"S	50°45'58"O	2,27
Gentil	30°33'46"S	50°12'13"O	6,15
Itapeva	29°29'44"S	49°55'18"O	119,46
Malva	29°48'19"S	50°10'39"O	48,63
Palherinho	30°23'43"S	50°20'21"O	2,14
Porteira	30°21'29"S	50°19'37"O	18,88
Quadros	29°42'54"S	50°50'12"O	119,55
Quintão	30°27'18"S	50°22'15"O	9,03
Reserva	30°52'35"S	50°46'56"O	14,02
Simão	30°56'21"S	50°42'22"O	4,52
Tarumã	30°44'24"S	50°33'12"O	3,36
Tramandaí	29°58'21"S	50°9'33"O	19,47

2.2. Produto MODIS M*D11A1

Os produtos MODIS *Land Surface Temperature* (LST – temperatura superficial continental) MOD11A1 (diário) e MYD11A1 (noturno) possuem resolução de 1000 m e resolução temporal diária. Estes produtos podem ser baixados diretamente via interface web (disponível

em <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>). Estes produtos foram escolhidos por terem informação diária da temperatura, com resolução espacial compatível com o tamanho das lagoas, e por terem sido extensamente validados para estes estudos [15, 16]. Com estas imagens, se tem informação, com boa precisão, da temperatura superficial das lagoas pela manhã (por volta de 10h30, horário local) e pela noite (por volta de 23h30, horário local), quando ocorre o imageamento pelos satélites Terra e Aqua, respectivamente.

2.3. Processamento

O período analisado foi de 2012 a 2017, resultando em 4384 imagens utilizadas. Como o produto M*D11A1 já possui um algoritmo interno de qualidade e remoção dos pixels contaminados por nuvens, o processamento consistiu no recorte das imagens para cada lagoa e cálculo da média dos pixels, considerando apenas pixels inteiramente dentro das lagoas, para não haver influência do solo na temperatura. Foram construídas, então, séries de temperatura da água diurna e noturna para cada uma das lagoas, calculado o ΔT (diferença entre os dois), e analisada a sua relação com a área e o padrão de variação médio de todas as lagoas neste período.

3. RESULTADOS

A média das temperaturas diurnas variaram de 27,1°C em janeiro a 15,4°C em julho, e as noturnas de 22°C em fevereiro a 12,1°C em julho, enquanto que o ΔT atingiu o maior valor em dezembro, de 6,6°C, e o menor em julho, de 3,3°C, seguindo um padrão de variação sazonal (Figura 1). Se observou uma grande influência da área na variação intradiária da temperatura, com uma relação quase linear, e uma boa correlação ($r^2 = 0,73$), entre o ΔT médio de toda a série e o logaritmo da área para cada lagoa (Figura 2).

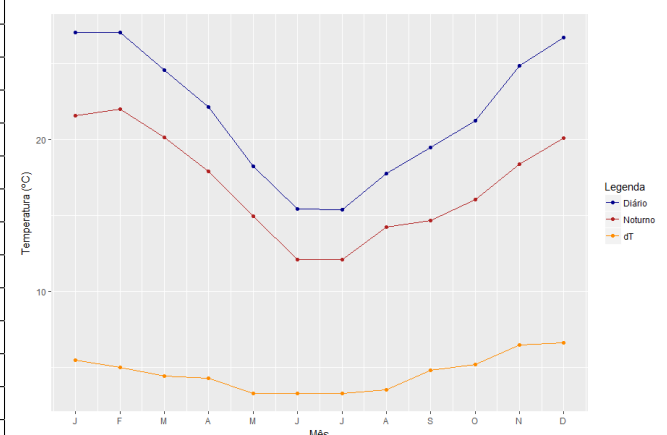


Figura 1: Padrão de variação mensal da temperatura diurna, noturna e ΔT para todas as lagoas entre 2012 e 2017.

4. DISCUSSÃO

Os valores médios mensais das temperaturas foram bastante similares entre as lagoas, indicando que estas lagoas podem ter similaridade com relação à dinâmica de outros processos. As diferenças da temperatura observados estão relacionadas relacionadas à área (Figura 2), que tem o efeito de reduzir a

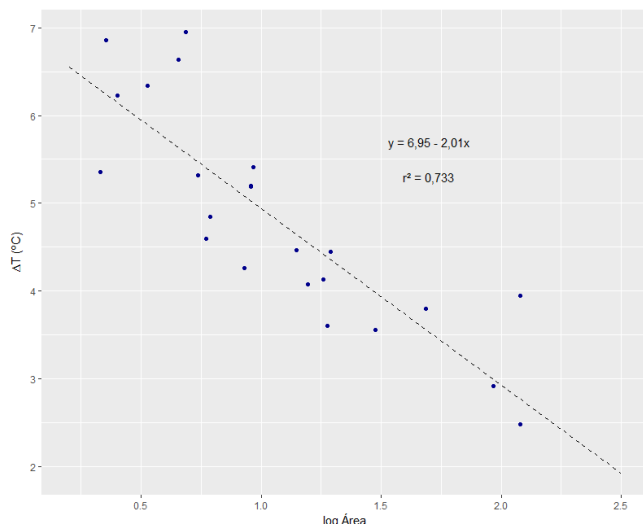


Figura 2: Relação entre o ΔT médio e o logaritmo da área (em km^2) de cada lagoa.

amplitude de variação intradiária da temperatura, isto é, com menor temperatura média durante o dia e maior temperatura média durante a noite. Também se observou uma variação bastante sazonal nos padrões de temperatura para todas as lagoas, com maior amplitude no verão e menor no inverno (Figura 1), como descrito na literatura [11]. A variação intradiária observada da temperatura é consideravelmente maior aos 2°C reportados por Woolway e colaboradores [11] para o verão, para 100 lagos temperados e boreais, em sua maioria no hemisfério norte. Isto se deve ao clima local: se nota que as médias mensais, no verão, superam os 25°C, e há uma tendência a haver maior variação intradiária para maiores temperaturas.

Lagos com áreas maiores se mostraram termicamente mais homogêneos em relação a lagos menores, como esperado [11, 17]. Além de lagos menores terem maior influência do entorno e, no litoral do Rio Grande do Sul, menor volume, lagos grandes também podem ter uma maior mistura devido à ação do vento, que numa maior área superficial tem maior relevância, diminuindo a variação intradiária da temperatura [18]. Portanto, quando o papel do vento é reduzido em lagos com pequena área superficial, uma camada de água rasa com uma temperatura homogênea é gerada, que aquece rapidamente no dia e esfria rapidamente no noite, causando os maiores ΔT observados.

A análise dos padrões de variação da temperatura são importantes, por exemplo, para relacionar com a ictiofauna local (já que muitas espécies de peixes são sensíveis a temperatura máxima da água [19]), com o fluxo de gases entre a água e atmosfera [11], e com os possíveis impactos da mudança climática sobre estes sistemas, considerando que em lagos menores esta variação intradiária tenderá a ser ainda maior com o aumento da temperatura.

Neste trabalho, apenas a influência da área foi analisada. Contudo, outros parâmetros podem influenciar a dinâmica da temperatura, como a transparência da água, a intensidade e direção dos ventos predominantes [13], e até mesmo a conectividade entre as lagoas, que pode ser importante principalmente para as lagoas no sistema do rio Tramandaí [5]. Por isso, recomenda-se estudos nesta área, considerando

outras forçantes da temperatura, de forma a se obter uma maior compreensão da estrutura e funcionamento das lagoas costeiras do Rio Grande do Sul.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, analisamos a dinâmica de variação intradiária da temperatura superficial de lagoas costeiras do Rio Grande do Sul. Verificamos que as lagoas se comportam de maneira homogênea, com a amplitude de variação estando relacionada com a área superficial de cada lagoa ($r^2 = 0,73$), e que há um padrão marcadamente sazonal nesta variação intradiária. Recomendamos mais trabalhos focando nas lagoas costeiras do Rio Grande do Sul, considerando outras forçantes da temperatura, de forma a se obter uma maior compreensão da estrutura e funcionamento destes corpos d'água.

6. REFERÊNCIAS

- [1] HORNE, A. J.; GOLDMAN, C. R. *Limnology*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 594 pp., 1994.
- [2] FRAGOSO JR, C. R. et al. Potential effects of climate change and eutrophication on a large subtropical shallow lake. *Environmental Modelling & Software*, v. 26, n. 11, p. 1337–1348, 2011.
- [3] WILLIAMSON, C. E. et al. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, v. 54, n. 6part2, p. 2273–2282, 2009.
- [4] SCHWARZBOLD, A.; SCHÄFER, A. Gênese e morfologia das lagoas costeiras do Rio Grande do Sul – Brasil. *Amazoniana*, v. 9, p. 87–104, 1984.
- [5] GUIMARÃES, T. d. F. R.; HARTZ, S. M.; BECKER, F. G. Lake connectivity and fish species richness in southern Brazilian coastal lakes. *Hydrobiologia*, v. 740, n. 1, p. 207–217, 2014.
- [6] KAY, J. E. et al. Accuracy of lake and stream temperatures estimated from thermal infrared images. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 41, n. 5, p. 1161–1175, 2005.
- [7] O'REILLY, C. M. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters*, v. 42, n. 24, p. 10773–10781, 2015.
- [8] ALCÂNTARA, E. H. et al. Remote sensing of water surface temperature and heat flux over a tropical hydroelectric reservoir. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, n. 11, p. 2651–2665, 2010.
- [9] WOOLWAY, R. I. et al. Geographic and temporal variations in turbulent heat loss from lakes: A global analysis across 45 lakes. *Limnology and Oceanography*, 2018.
- [10] CURTARELLI, M. et al. Effects of cold fronts on MODIS-derived sensible and latent heat fluxes in Itumbiara reservoir (Central Brazil). *Advances in Space Research*, v. 52, n. 9, p. 1668–1677, 2013.
- [11] WOOLWAY, R. I. et al. Diel surface temperature range scales with lake size. *PLoS One*, Public Library of Science, v. 11, n. 3, p. e0152466, 2016.
- [12] STAEHR, P. A. et al. Lake metabolism scales with lake morphometry and catchment conditions. *Aquatic Sciences*, Springer, v. 74, n. 1, p. 155–169, 2012.

- [13] PTAK, M. et al. Effect of environmental conditions and morphometric parameters on surface water temperature in polish lakes. *Water*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 5, p. 580, 2018.
- [14] ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- [15] REINART, A.; REINHOLD, M. Mapping surface temperature in large lakes with MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, p. 603–611, 2008.
- [16] LIU, G. et al. Validating and mapping surface water temperatures in Lake Taihu: Results from MODIS land surface temperature products. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 8, n. 3, p. 1230–1244, 2015.
- [17] GORHAM, E. Morphometric control of annual heat budgets in temperate lakes. *Limnology and Oceanography*, v. 9, n. 4, p. 525–529, 1964.
- [18] WOOLWAY, R. I. et al. A comparison of the diel variability in epilimnetic temperature for five lakes in the English Lake District. *Inland waters*, v. 5, n. 2, p. 139–154, 2015.
- [19] VANNOTE, R. L. et al. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 37, n. 1, p. 130–137, 1980.