

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DA LAGUNA MUNDAÚ POR SENSORIAMENTO REMOTO APLICANDO UM ALGORITMO DE CANAL ÚNICO

*Brunna Mariane Neri Donato Moura¹ ; Augusto Hugo Farias da Cunha² ; Carlos Ruberto
Fragoso Jr.³*

RESUMO – A temperatura da água está dentre os principais atributos que atuam nos ecossistemas aquáticos continentais. A utilização de dados de sensoriamento remoto a partir de produtos orbitais é uma alternativa para estimar a temperatura da superfície (TS) da água. O trabalho avaliou a qualidade da estimativa de TS da água da laguna Mundaú através do algoritmo proposto por Jiménez-Muñoz e Sobrino (2009), usando as diferentes bases atmosféricas aplicadas ao Landsat 7 ETM+. Algumas limitações foram observadas para a obtenção dos resultados, influenciando tanto no tamanho da série temporal produzida quanto nos erros associados à esta. Apesar das limitações apontadas, os resultados obtidos foram satisfatórios, apontando a viabilidade de aplicação da metodologia e extrapolação para outros pontos da laguna. As melhores bases atmosféricas foram a Jtigr61 e a e Ctigr 3, sendo estas recomendadas para geração de temperatura de superfície.

ABSTRACT– Water temperature is one of the main attributes that affect continental aquatic ecosystems. The use of remote sensing data from orbital products is an alternative to estimate the surface temperature (TS) of the water. The work evaluated the quality of TS estimation of water from the Mundaú lagoon through the algorithm proposed by Jiménez-Muñoz and Sobrino (2009), using the different atmospheric bases applied to Landsat 7 ETM +. Some limitations were observed to obtain the results, influencing both the size of the time series produced and the errors associated with it. Despite the limitations pointed out, the results were satisfactory, indicating the feasibility of application of the methodology and extrapolation to other points of the lagoon. The best atmospheric bases were Jtigr61 and a and Ctigr 3, which are recommended for surface temperature generation.

Palavras-Chave – Landsat 7 ETM+; Temperatura de superfície da água e Laguna Mundaú.

1) Afiliação: Universidad Nacional de La Plata, brunneri@hotmail.com

2) Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, hf.cunha@yahoo.com

3) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas, ruberto@ctec.ufal.br

1. INTRODUÇÃO

Dentre as propriedades físicas e químicas da água, a temperatura está dentre os principais atributos que atuam nos ecossistemas aquáticos continentais, afetando diversos processos físico-químicos (TUNDISI, 2008) como, por exemplo, as concentrações de oxigênio dissolvido na água (Rawson, 1939).

Devido a sua importância, séries temporais de temperatura dos rios pode ser utilizada para avaliação do balanço de calor em ecossistemas aquáticos a jusante, tais como reservatórios, lagos e estuários. Assim, estas séries servem como condição de contorno em modelos matemáticos conceituais de balanço de calor como, por exemplo, o modelo ecológico IPH-ECO (Fragoso Jr et al., 2009). No entanto, medições da temperatura da água em riacho e rios têm sido limitadas a amostragem locais pontuais e com pouca frequência. (HANDCOCK et al., 2012). De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA) há apenas 1817 pontos em operação da rede nacional de monitoramento de qualidade de águas (RNQA) que monitoram a temperatura da água, entre outros parâmetros. Entretanto, grande parte das estações tem baixa frequência de medição, são manuais e não existe uma continuidade de monitoramento, não sendo capaz de monitorar corpos d'água importantes e relevantes a nível local e/ou regional.

Considerando esta limitação, diversos modelos foram propostos para estimar séries de temperatura na foz de rios, como regressões lineares simples (e.g. Crisp e Howson, 1982), modelos estocásticos (Cluis, 1972), modelos determinísticos (e.g. Sinokrot e Stefan, 1993), até modelos empíricos que usam redes neurais artificiais ou algoritmos dinâmicos não-lineares (e.g. Sahoo et al., 2009). Em geral, estes modelos são baseados em dados secundários como vazão e temperatura do ar (Toffolon e Piccolroaz, 2015). Para esses casos em que não existem dados locais medidos, ou para expandir a série em locais com poucas medições, a utilização de dados de sensoriamento remoto de produtos orbitais é uma alternativa para estimar a temperatura da água.

A estimativa da temperatura com produtos de sensoriamento remoto é limitada a superfície da água; para corpos d'água em que não há estratificação termal, como é o caso de lagos rasos, a temperatura de superfície é representativa de toda a camada d'água e, portanto, podem ser utilizados como estimativa da temperatura da massa d'água (do inglês "bulk temperature") (Kay et al., 2005).

Um dos sensores mais comumente empregados em estudos de temperatura superficial são os sensores das missões Landsat (e.g. JIMÉNEZ-MUÑOZ; SOBRINO, 2003; GAO et al., 2006; HANDCOCK et al., 2006; LI et al., 2013). Como para estes sensores não há produtos específicos de temperatura, alguns algoritmos foram desenvolvidos para a estimativa da temperatura a partir de sua banda termal (na faixa espectral do infravelho termal – TIR).

Dados TIR do sensor termal do Landsat têm sido convertidos em estimativa da temperatura de superfície e utilizados em estudos com sucesso (Jímenes-Muñoz et al. 2003; Cristóbal et al., 2009), e em análise de calor urbano (Stathopoulou e Cartalis, 2007). Jiménez-Muñoz e Sobrino (2003) desenvolveram um algoritmo, o algoritmo de canal único, que é amplamente utilizado na literatura, atualizado por Jiménez-Muñoz et al. (2009) para uso com os sensores Landsat 4 e 5 TM e Landsat 7 ETM+. Contudo, em seu trabalho há uma gama de bases de dados que podem ser utilizadas, que dependem de seu local de aplicação, mas poucos estudos realmente testaram os casos em que cada base de dado deve ser empregada. O objetivo deste trabalho é avaliar a precisão das estimativas de temperatura de superfície de um lago raso subtropical utilizando o algoritmo de Jiménez-Muñoz e Sobrino (2009), usando as diferentes bases de dados utilizadas pelos autores em seu estudo, aplicadas ao Landsat 7 ETM+, comparando tais estimativas com os valores de temperatura medidos in situ por uma sonda automática instalada na área de estudo.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Laguna Mundaú, como pode ser visto na Figura 1, que é localizada no estado de Alagoas, está inserida no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), abrange uma área de cerca de 24 km² e tem uma profundidade média de 1,5m. Esta laguna recebe o aporte da bacia hidrográfica do Rio Mundaú, com uma área de contribuição de aproximadamente 4128 km², e é bastante afetada pela urbanização da cidade de Maceió visto que o processo de ocupação da cidade a margem da lagoa ocorreu de forma desordenada, onde ocorre lançamento direto de esgoto bruto.

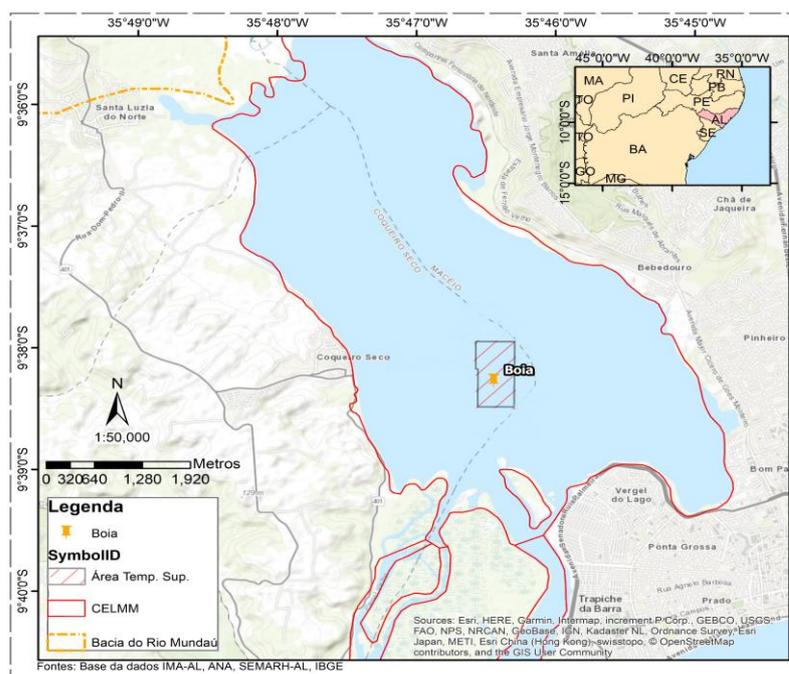


Figura 1 - Localização da laguna Mundaú.

2.2. Dados utilizados

2.2.1. Landsat 7 ETM+

Para a estimativa da temperatura de superfície foram utilizados dados do ano de 2017 do sensor térmico a bordo do satélite Landsat 7 ETM+, que corresponde a banda 6, a qual tem dois produtos, a banda B 6-1 (low gain) e a B 6-2 (high gain), e devido a sua maior precisão radiométrica, a banda B 6-2 foi utilizada (CHANDLER et al., 2009). Além disso, foi utilizada a banda de qualidade (BQA), para a remoção dos pixels de baixa qualidade.

Devido a sua resolução temporal de 16 dias, durante um ano apenas 23 imagens Landsat são geradas, no entanto, no estudo presente apenas 12 foram consideradas aptas para utilização no modelo devido à baixa qualidade de algumas imagens, principalmente pela presença de nuvens.

2.2.2. Sonda automática

Para avaliar a qualidade das estimativas de temperatura da água, foram utilizados dados observados de temperatura água do ano de 2017 registrados pela sonda automática instalada em uma boia de monitoramento na laguna Mundaú, localizada nas coordenadas UTM: 8933385,17 m S, 195528,59 m O, zona: 25S, medindo a temperatura a cerca de 70cm de profundidade.

2.2.3. Dados meteorológicos

Dados meteorológicos de temperatura do ar e umidade relativa foram utilizados para estimativa de temperatura da água. Foram utilizados dados de temperatura do ar do ano de 2017, medidos pela estação meteorológica do INMET localizada na orla de Maceió. Para a obtenção dos valores de umidade do ar na área de estudo foi utilizado o Atmospheric Correction Parameter Calculator – AtmCorr, que é uma plataforma online disponibilizada pela NASA, e dentre outros produtos, fornece uma estimativa da quantidade de vapor atmosférico para as bandas termais dos satélites Landsat (5, 7 e 8) para o local e data escolhidos.

2.3. Estimativa da temperatura de superfície

Inicialmente as imagens passaram por um pré-processamento, visto que as imagens Landsat são disponibilizadas no formato de número digital, estes valores numéricos das imagens foram convertidos em radiância espectral e a imagem da banda termal em temperatura de brilho. Para fazer tais conversões, utilizou-se índices calibrados que são disponibilizados no arquivo MTL das imagens Landsat baixadas, bem como as equações fornecidas por Chandler et.al (2009). Ainda no pré-processamento, removeu-se falhas contidas nas imagens, utilizando a banda de qualidade com um buffer de 30m em volta dos pixels de baixa qualidade. As imagens foram ainda recortadas considerando os limites de abrangência da área de estudo e de forma que envolvesse a sonda automática que mede a temperatura da água in situ, a fim de diminuir o tempo de processamento da rotina.

Para a estimativa da Temperatura de Superfície (T_s) foi utilizado o algoritmo desenvolvido por Jiménez-Muñoz e Sobrinho (2003) que foi atualizado por Jiménez-Muñoz et al. (2009) para aplicação no Landsat 4, 5 TM e Landsat 7 ETM+. Este algoritmo se baseia na equação da transferência radiativa (Equação 1), em que são consideradas informações de radiância medida pelo sensor, emissividade da superfície, temperatura de brilho medida pelo sensor e funções atmosféricas, em que estas estão relacionadas a determinados perfis atmosféricos, característicos de um certo clima.

$$T_s = \gamma[\varepsilon^{-1}(\psi_1 L_{sensor} + \psi_2) + \psi_3 - L_{sensor}] + T_{sensor} \quad (1)$$

Onde, γ é função da radiância medida pelo sensor na banda do infravermelho termal; L_{sensor} é a radiância medida pelo sensor da banda do infravermelho termal; ε é a emissividade da superfície, a qual foi considerada constante e igual 0,99, como feito em outros estudos (e.g. Díaz-Delgado *et al.*, 2010; Deng e Wu, 2013); T_{sensor} é a temperatura de brilho medida pelo sensor, e ψ_1 , ψ_2 e ψ_3 são funções atmosféricas.

Para a determinação das funções atmosféricas, Jiménez-Muñoz e Sobrinho (2003) calcula ψ de forma que apenas a quantidade de vapor d'água na coluna atmosférica é considerada, onde:

$$\psi_n = c_n w^2 + b_n w + a_n \quad (3)$$

Em que $n=1, 2$ e 3 , w é a quantidade de vapor d'água na coluna atmosférica, os coeficientes de a , b e c são constantes que dependem da base de dados atmosférica escolhida e seus valores atualizados podem ser obtidos na *tabela II* disponibilizada por Jimenez-Muñoz et al. (2009).

Cristóbal et al. (2009) aplicaram o algoritmo supracitado calculando as funções atmosféricas de acordo com a Equação 10, mas também consideraram um outro cenário em que além do parâmetro w a temperatura local do ar (T_a) é necessária, de forma que:

$$\psi_n = i_n w^2 + h_n T_a^2 + g_n w + f_n T_a + e_n T_a^2 w + d_n T_a w + c_n T_a w^2 + b_n T_a^2 w^2 + a_n \quad (4)$$

Os valores dos coeficientes de a à i também dependem da base de dados atmosférica escolhida e estes estão disponibilizados na *tabela I* em Cristóbal et.al (2009).

Foram utilizadas 13 diferentes bases atmosféricas para avaliar a qualidade das estimativas de temperatura da superfície da água. Dentre estas bases, 9 delas foram aplicadas a metodologia que utiliza apenas a quantidade de umidade (W) e 4 delas utilizando a temperatura do Ar (Tar), além de W . A tabela a seguir identifica as bases utilizadas e as nomenclaturas adotadas para cada uma.

Tabela 1 - Nomenclatura das bases atmosféricas utilizadas.

Jiménez-Muñoz et al. (2009)						Considera
Original	TIGR1761	STD66	TIGR61	TIGR2311	SAFREE402	
Adotada	JTIGR1761	JSTD66	JTIGR61	JTIGR2311	JSAFREE402	
Disponibilizadas por Cristóbal em 2018						Umidade do ar (W)
Original	TIGR3	TIGR2	TIGR1	STD66		
Adotada	CTIGR3	CTIGR2	CTIGR1	CSTD66		
Original	TIGR 3	TIGR 2	TIGR 1	STD66		W e Tar

Adotada	CTaTIGR 3	CTaTIGR 2	CTaTIGR 1	CTaSTD66	
---------	-----------	-----------	-----------	----------	--

As estimativas obtidas correspondem a uma média da temperatura de uma área da lagoa mundaú que engloba o ponto em que está localizada a sonda automática para que os resultados possam ser comparados com os medidos por esta.

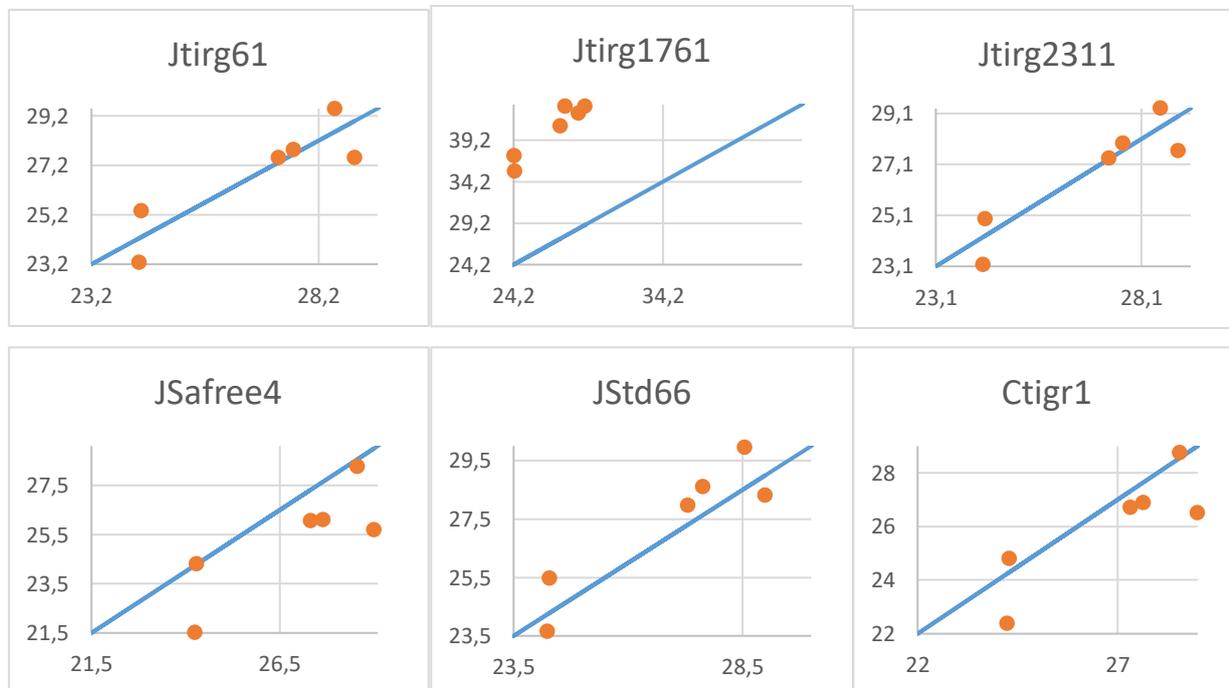
2.4. Análises e métricas

No total, das 12 imagens foram analisadas apenas seis devido à ausência de dado medido *in situ* pela sonda nas outras seis datas, o que impossibilitou a análise da estimativa.

Considerando todas as variações de coeficientes atmosféricos utilizados, ao final obteve-se 13 resultados de estimativa de temperatura da superfície para cada data analisada, o quais foram comparados com o valor da temperatura medida *in situ* na data correspondente a da imagem que gerou a estimativa. Para tais comparações, as métricas utilizadas foram: viés, raiz do erro médio quadrática e foi calculada a correlação dos dados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os gráficos na figura a seguir apresentam as temperaturas de superfície estimadas a partir de cada base atmosférica utilizada, comparando-as com as temperaturas medidas *in situ*. O resultado melhora para a dispersão (dados simulados) que melhor acompanha a reta (dados de campo), ainda indicando se teve uma tendência de superestimava (acima da reta) ou subestimativa (abaixo da reta).



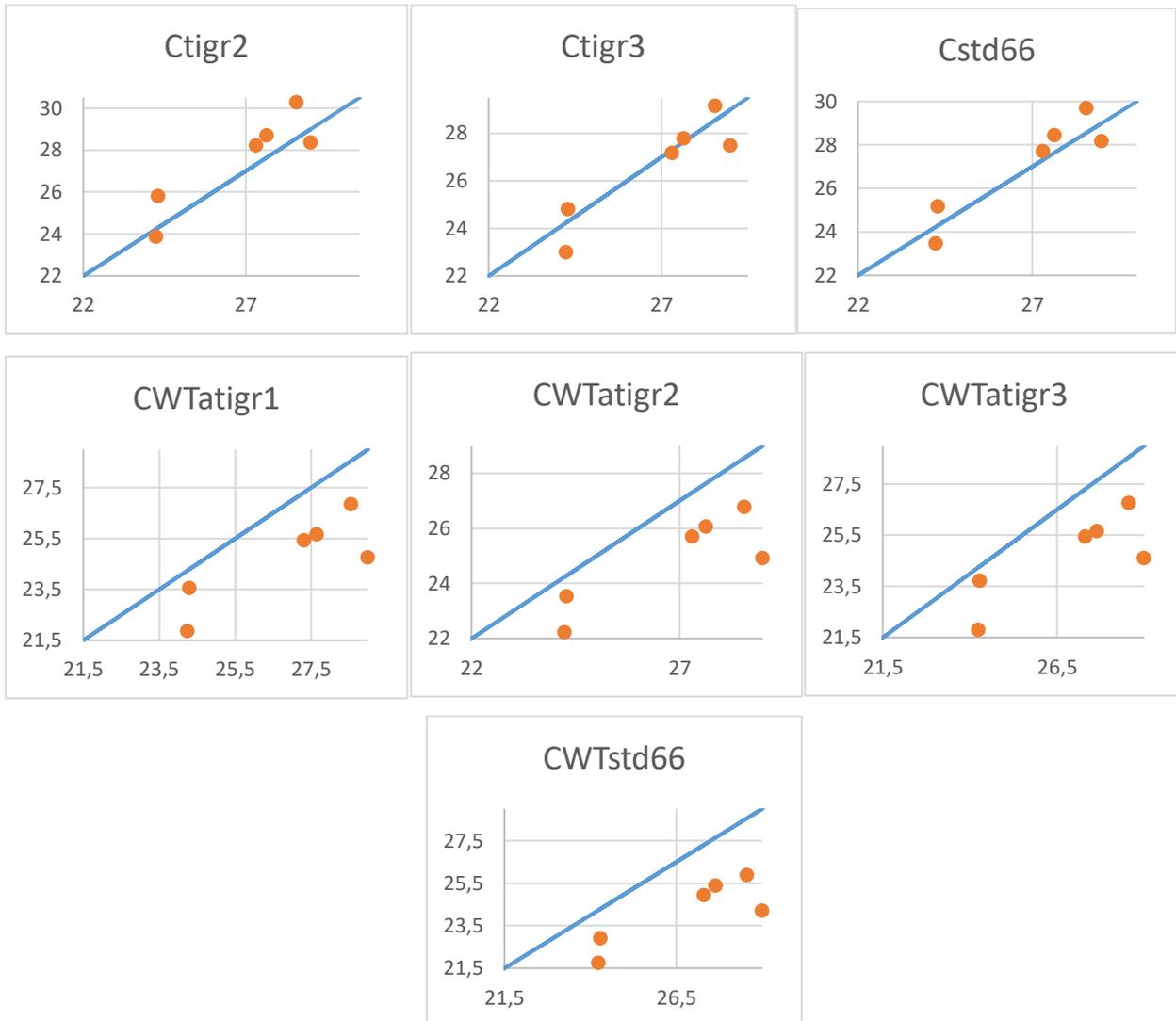


Figura 2- Temperaturas de superfície estimada por cada base

As estimativas apresentam uma tendência linear com uma dispersão que varia entre -0.693 e 2.67 em relação a sua tendência central, com exceção da base Jtirg1761. As estimativas utilizando a temperatura do Ar e a quantidade de umidade subestimaram a temperatura medida in situ e foram menos precisas que as estimativas utilizando apenas a quantidade de umidade do ar, como apontado no estudo feito por (Cristóbal et al., 2009). O erro pode estar associado aos dados de temperatura do ar utilizados que foram obtidos de uma estação distante do local de estudo e para o horário de 12h.

Observando os valores do viés, valores positivos indicam que, na média das datas analisadas, as temperaturas foram subestimadas, e valores negativos indicam que as temperaturas foram superestimadas. Quando utilizamos a metodologia que considera a umidade e temperatura do ar, as temperaturas foram sempre subestimadas com viés próximo de 2 para todas as bases, sendo ainda as que apresentaram menores valores de correlação.

Utilizando a metodologia que considera apenas a umidade do ar, aproximadamente metade das bases subestimaram a temperatura e conseqüentemente a outra metade superestimou a temperatura,

os valores de viés médio variaram entre -0.69 e 0.83, exceto pela base Jtigr1761, estimando valores completamente fora do esperado, com viés de -13.59; indicando que apenas o R^2 não indica a qualidade da estimativa, pois apenas reflete o bom ajuste linear entre os dados, não considerando erros sistemáticos.

A Tabela 2 apresenta os resultados das métricas, sendo as bases Jtigr61 e Ctigr 3 consideradas com as melhores estimativas.

Tabela 2 - Métricas calculadas entre as temperaturas estimadas por cada base e a temperatura medida pela sonda automática.

Base Atm.	Viés_med	RMSE	Erro Abs.		
			Max	Mín	R ²
Jtigr61	0.022	0.935	1.498	0.179	0.886
Jtigr1761	-13.598	13.665	15.650	11.143	0.951
Jtigr2311	0.122	0.826	1.361	0.022	0.917
JSafree402	1.513	1.926	3.291	0.011	0.822
Jstd66	-0.492	0.962	1.407	0.584	0.921
Ctigr1	0.829	1.342	2.475	0.202	0.853
Ctigr2	-0.693	1.132	1.717	0.391	0.905
Ctigr3	0.276	0.864	1.505	0.132	0.917
Cstd66	-0.274	0.834	1.140	0.407	0.930
CWTAtigr1	2.162	2.407	4.247	0.741	0.831
CWTAtigr2	1.968	2.216	4.072	0.758	0.845
CWTAtigr3	2.167	2.449	4.380	0.564	0.801
CWTAstd66	2.676	2.868	4.797	1.394	0.844

Considerando os resultados das bases Jtigr61 e Ctigr 3, observou-se que as estimativas feitas a temperatura estão variando em 1,5°C para cima ou para baixo em relação a temperatura observada na boia corroborando com os erros encontrados na literatura (Handcock et al., 2006; Crosman e Horel, 2009; Lamaro et al., 2013).

Os valores dos erros obtidos nas análises podem estar associados ao fato da temperatura dos poucos milímetros no topo da coluna d'água serem inferior ao da água abaixo, afetando as estimativas por sensoriamento remoto, esse efeito da camada superficial (*cooler skin effect*) reduz a temperatura da água na faixa de 0,1 a 0,6°C (ROBINSON; WELLS; CHARNOCK, 1984; PRATS et al., 2018). Além disto, o medidor in situ está localizado abaixo da superfície a uma profundidade entre 50 e 70 cm.

4. CONCLUSÕES

Algumas limitações foram observadas para a obtenção dos resultados, influenciando tanto no tamanho da série temporal produzida quanto nos erros associados à esta. Considerando que para validação da técnica escolhemos um local específico de amostragem, e ainda um horário específico; uma grande quantidade de imagens apresentou uma baixa qualidade em função da presença de nuvens, de forma que as informações obtidas pelas imagens apresentaram muitas falhas. Entretanto, uma vez confirmada a eficiência da técnica, é possível extrapolar a informação para outros pontos da Laguna, em outros horários, sendo possível gerar uma série anual completa para, por exemplo, calibração de modelos ecológicos.

Quanto a qualidade dos resultados obtidos (valores de temperatura de superfície para as 6 imagens) alguns fatores de incerteza precisam ser levados em conta que geram diferenças entre a temperatura medida e a simulada. Como a profundidade em que os dados de campos obtidos foram medidos e o fato da estimativa ser na superfície da água. Para a metodologia que utilizou umidade e temperatura do ar, a pior qualidade nos resultados pode estar associada à utilização de dados da estação do INMET na orla de Maceió, medidos às 12:00, horário disponível mais próximos dos dados analisado. Além destes, outro fator limitante pode estar relacionado a utilização de uma emissividade de 0.99 constante a qual pode não representar a realidade, visto que esta pode variar em função da salinidade, por exemplo.

Apesar das limitações apontadas, consideramos os resultados obtidos satisfatórios, apontando a viabilidade de aplicação da metodologia e extrapolação para outros pontos da laguna. As melhores bases atmosféricas foram a Jtigr61, com viés médio de 0.02 e RMSE 0.93, e a e Ctigr 3, com viés médio de 0.27 e RMSE de 0.86, sendo estas recomendadas para geração de temperatura de superfície.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas (Brasil) (ANA). Dados abertos: Rede de Monitoramento de Qualidade de Água: Pontos em Operação. Disponível em: <http://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/f7a27c8dc66b420d8223c63dc88ae1df_0>. Acesso em: 01 de maio de 2019.

Chandler et.al (2009) - Chander, G., Markham, B. L., e Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113:893–903.

CRISTOBAL 2009 - Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Ninyerola, M., e Pons, X. (2009). Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapor and air temperature. *Journal of Geophysical Research*, 114:D08103.

Crosman, E. T. & Horel, J. D., 2009. MODIS-derived surface temperature of the Great Salt Lake. *Remote Sensing of Environment* 113(1).

Fragoso Jr., C. R., van Nes, E. H., Janse, J. H., e Motta Marques, D. (2009). IPHTRIM3D-PCLake: A three-dimensional complex dynamic model for subtropical aquatic ecosystems. *Environmental Modelling & Software*, 24(11):1347–1348.

Gao et. Al 2006 - Gao, F., Masek, J., Schwaller, M., e Hall, F. (2006). On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience*, 44(8):2207–2218.

HANDOCK 2012: HANDOCK, R.N; TORGERSEN, C.E; CHERKAUER, K.A; GILLESPIE, A.R; TOCKNER, K; FAUX, R.N; TAN, J. Thermal Infrared Remote Sensing of Wate

Temperature in Riverine Landscapes. *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*, pgs. 85-113.

HANDOCK 2006: HANDOCK, R.N; GILLESPIE, A.R; CHERKAUER, K.A; KAY, J.E; BURGESS, S.J; KAMPF, S.K. Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales. *Remote Sensing of Environment* 100 (2006) 427 – 440.

Jímenzes-Muñoz et al. 2003 - Jiménez-Muñoz, J. C. e Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 108:D22.

Jímenzes-Muñoz et al. 2009 - Jiménez-Muñoz, J. C., Cristóbal J., Sobrino, J. A., Sória G., Ninyerola M., Pons X.(2009). Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, VOL. 47, NO. 1.

Kay, Jennifer E., Stephanie K. Kampf, Rebecca N. Handcock, Keith A. Cherkauer, Alan R. Gillespie, and Stephen J. Burges, 2005. Accuracy of lake and Stream Temperatures Estimated From Thermal Infrared Images. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 41(5):1161-1175.

Lamaro, A. A., Mariñelarena, A., Torrusio, S. E., e Sala, S. E. (2013). Water surface temperature estimation from Landsat 7 ETM+ thermal infrared data using the generalized singlechannel method: Case study of Embalse del Río Tercero (Córdoba, Argentina). *Advances in Space Research* 51(3):492–500.

LI 2013 - Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I. F., e Sobrino, J. A.(2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131:14–37.

Robinson, I. S., Wells, N. C. and Charnock, H. (1984) The sea surface thermal boundary layer and its relevance to the measurement of sea surface temperature by airborne and spaceborne radiometers. *International Journal of Remote Sensing*, 5, 19-45.

Stathopoulou e Cartalis, 2007 - Stathopoulou, M., and C. Cartalis (2007), Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece, *Sol. Energy*, 81(3): 358– 368.

TOFFOLON E PICCOLROAZ, 2015 - Toffolon, M. e Piccolroaz, S. (2015). A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge. *Environmental Research Letters*, 10:114011.

TUNDISI: TUNDISI, G.J; TUNDISI, T.K. *Limnologia*. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos. 2008. p. 631.