

XIV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

COMPARAÇÃO DE ESTIMATIVAS DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LAGOS POR SENSORIAMENTO REMOTO: ESTUDO DE CASO DA LAGOA MANGUEIRA USANDO LANDSAT 7 ETM+ E O PRODUTO MOD28

*Matheus Henrique Tavares¹; David da Motta Marques²; Augusto Hugo Farias da Cunha³;
Anderson Luís Ruhoff⁴ e Carlos Ruberto Fragoso Jr.⁵*

RESUMO

A temperatura regula muitos processos físicos, químicos e biológicos em lagos e reservatórios, sendo uma variável chave para a modelagem ecológica destes sistemas. Neste trabalho, foi realizada uma comparação entre estimativas da temperatura superficial da lagoa Mangueira feitas pelo MOD28 e duas metodologias aplicadas ao Landsat 7 ETM+: o AtmCorr, que fornece parâmetros de correção atmosféricas para aplicação da equação de transferência radiativa, e o algoritmo de canal único, para este usando duas bases de perfis atmosféricos e duas fontes de vapor d'água atmosférico, do MODIS e do AtmCorr. Para verificação, foram utilizados dados medidos em três estações da lagoa, entre 2001 e 2008. As estimativas feitas pelo Landsat foram superiores às do MOD28, e as do AtmCorr foram as mais acuradas, com erro absoluto de 0,666°C e R² de 0,955. Entre as estimativas usando vapor d'água, a base TIGR3 mostrou-se mais indicada para a lagoa do que a SAFREE, e o vapor d'água do AtmCorr mostrou melhor desempenho. Recomenda-se utilizar o MOD28 apenas quando a acurácia não seja tão importante, dada a facilidade de uso dos produtos, ou caso seja necessária uma maior frequência de dados de temperatura, de forma a complementar uma série de dados.

ABSTRACT

Temperature regulates many physical, chemical and biological processes in lakes and reservoirs, being a key variable for ecological modelling of these systems. In the work, a comparison was made between estimations of surface temperature of lake Mangueira made by MOD28 and two methodologies applied to Landsat 7 ETM+: AtmCorr, which provides atmospheric correction parameters for the application of the radiative transfer equation, and the single-channel algorithm, using two atmospheric profiles data bases and two sources of atmospheric water vapour content, MODIS and AtmCorr. For the verification, data measured in three stations on the lake between 2001 and 2008 were used. Landsat's estimates were superior than MOD28's, and AtmCorr's were the most accurate, with values of absolute error and R² being 0.666°C of 0.955. Among the estimates using water vapour, the TIGR3 database is more indicated than SAFREE for the lake, and AtmCorr's water vapour content showed best performance. We recommend to use MOD28 only in the cases when the accuracy is not really necessary, due to the easiness of use, or when a higher data frequency is needed, in a way to complement a data series.

Palavras-Chave – Temperatura de superfície; sensoriamento remoto; lagos.

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, e-mail: matheus.tavares@ufrgs.br

2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, e-mail: dmm@ufrgs.br

3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, e-mail: augusto.cunha@ufrgs.br

4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, e-mail: anderson.ruhoff@ufrgs.br

5) Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Maceió, e-mail: ruberto@ctec.ufal.br

1. INTRODUÇÃO

A temperatura regula muitos processos físicos, químicos e biológicos em lagos e reservatórios, sendo utilizado como um parâmetro importante de qualidade da água e uma variável chave para a modelagem ecológica destes sistemas (Allan e Castillo, 2007). Por isso, nestes modelos a temperatura é um fator essencial para a modelagem das outras variáveis que dela dependem e, sendo assim, é importante verificar que a precisão da modelagem da temperatura espacial e temporalmente.

Comumente isto é feito através de estações com sensores, que medem a temperatura em alta frequência no ponto onde são instaladas. Contudo, esta prática tem limitações, destacando-se a demanda de equipamento e trabalho de campo e a variabilidade espacial e temporal da temperatura. Estas limitações podem ser superadas com produtos de sensoriamento remoto para estimar a temperatura da água (Handcock *et al.*, 2006). Apesar da estimativa da temperatura sensoriamento remoto se limitar apenas à superfície da água, estes dados são bastante úteis para validar modelos ecológicos, não apenas por causa de sua cobertura espacial mas também por causa da disponibilidade temporal ao longo do período de vida útil de sensores a bordo de satélites (Crosman e Horel, 2009).

Na escolha do sensor correto, uma questão importante é o *trade-off* entre a resolução espacial/temporal. Sensores com maior resolução temporal tendem a ter menor resolução espacial, devido à esta depender da área coberta pelo sensor. Dois dos sensores mais utilizados para este tipo de aplicação são os sensores termais (na faixa espectral do infravermelho termal – TIR) MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua, e das missões Landsat (e.g. Jiménez-Muñoz e Sobrino, 2003; Handcock *et al.*, 2006; Crosman e Horel, 2009). Os sensores das missões Landsat possuem resolução temporal de 16 dias, e resolução espacial de 30 m para todas as bandas, exceto a banda termal, que tem resolução espacial na faixa de 60–120 m. Já as imagens termais MODIS, com suas bandas 31 e 32, possuem resolução de 1000 m e são diárias; contudo, seus produtos possuem resolução variando entre 250 m e 9 km.

Para estudos em lagos e reservatórios, é possível utilizar tanto o sensor Landsat quanto MODIS para este monitoramento da temperatura, a depender tanto do tamanho do corpo d'água quanto do objetivo do monitoramento. Embora alguns estudos já tenham testado a precisão das estimativas destes dois sensores separadamente, nenhum verificou a precisão de ambos os sensores para um mesmo lago num mesmo intervalo de tempo. O objetivo deste trabalho é avaliar a precisão das estimativas de temperatura de superfície de um lago raso subtropical pelos produtos MOD28 do MODIS e diferentes metodologias aplicadas ao Landsat 7 ETM+, além de direcionar ao uso de cada produto para a região estudada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e dados de campo

O estudo foi realizado na lagoa Mangueira, na região Sul do Brasil. A lagoa Mangueira é um grande lago raso subtropical localizado no estado do Rio Grande do Sul, próximo à divisa com o Uruguai. Possui área de 820 km² e formato alongado, com 90 km de comprimento e de 3 a 10 km de largura, com profundidade média de 2,6 m e profundidade máxima de 6,9 m. O clima regional é subtropical, com temperatura média de 16°C e precipitação anual de 1.800–2.200 mm (Kottek *et al.*, 2006). As medições da temperatura foram feitas num período de 9 anos, entre 2001 e 2008, em 3 estações, Norte, Central e Sul, como mostradas na Figura 1.

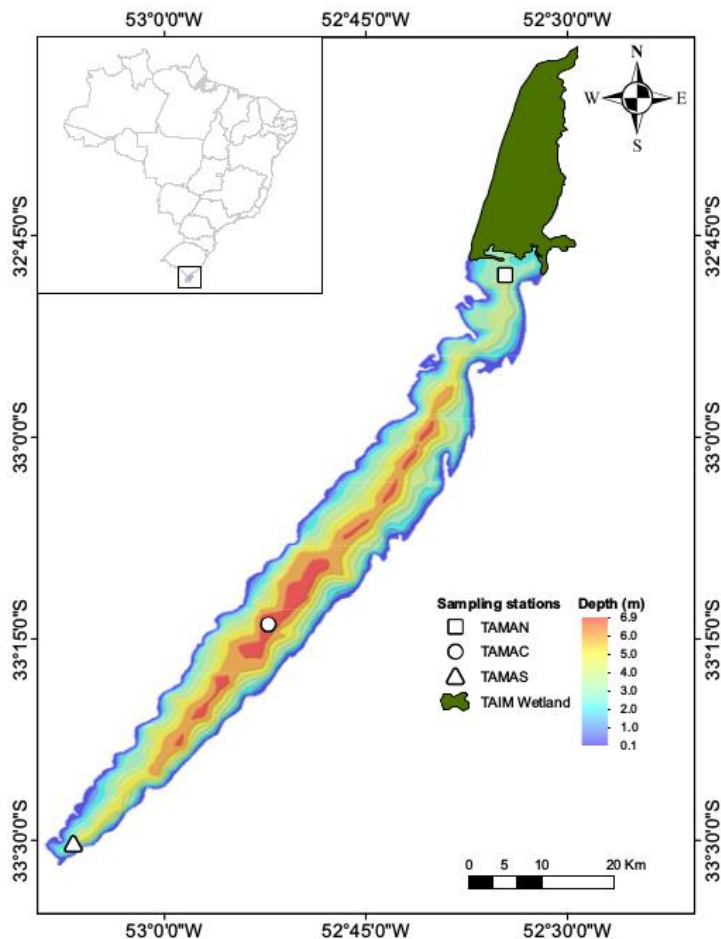


Figura 1 – Mapa da lagoa Mangueira, destacando as estações Norte (TAMAN), Central (TAMAC) e Sul (TAMAS).

(Fonte: Munar, 2017)

Como as datas de coleta devem ser nos dias em que há imagens do sensor Landsat sem cobertura de nuvens (que inviabilizou várias imagens, dada a frequente cobertura de nuvens na região) para comparação, reduzindo o número de datas compatíveis, foram usadas imagens numa janela de até um dia de diferença da medição, considerando que a variação de temperatura dentro desta janela é

pequena (Kay *et al.*, 2005). Ao todo, foram feitas comparações em 8 datas separadas, com a disponibilidade de imagens mostrada na Tabela 1. Para comparação entre as temperaturas estimadas e medidas, foram utilizados o viés, o erro absoluto, a raiz do erro quadrático médio (REQM) e o coeficiente de correlação (através de uma regressão linear) como métricas.

Tabela 1 – Datas com dados medidos de temperatura que foram utilizadas para o estudo, junto com as datas das imagens Landsat 7 ETM+ e MODIS e a disponibilidade destas imagens sobre cada estação.

Dia	Data	Data Landsat	Estações imageadas	Data MODIS	Estações imageadas
1	21/08/2001	mesma data	todas	mesma data	Norte e Central
2	24/10/2001	mesma data	todas	mesma data	todas
3	29/01/2002	28/01/2002	todas	mesma data	todas
4	19/11/2002	mesma data	Central e Sul	mesma data	apenas Central
5	21/10/2003	mesma data	Central e Sul	mesma data	Norte e Central
6	10/02/2004	mesma data	Central e Sul	mesma data	Central e Sul
7	03/05/2005	mesma data	todas	não disponível	não disponível
8	12/11/2008	mesma data	todas	mesma data	todas

2.2. Produto MODIS – MOD28 SST

O sensor MODIS possui produtos específicos de temperatura, que estão disponíveis diretamente para download. No caso da lagoa Mangueira, que é um lago costeiro, para a temperatura de superfície foi utilizado o produto MOD28, de temperatura de superfície dos oceanos (SST), usando em outros trabalhos nesse âmbito (e.g. Reinart e Reinhold, 2008). Para este produto, estão disponíveis as opções de resolução espacial de 4 km e 9 km, e de cálculo feito com a banda na faixa do infravermelho termal (~11 μ m) e na faixa de infravermelho de ondas curtas (~4 μ m). Para fazer a comparação com o Landsat, e também por ser mais comum esta faixa do espectro para estimativa da temperatura no continente, se optou por utilizar apenas o produto na faixa do TIR.

Os produtos de SST do MODIS foram baixados diretamente do FTP do PODAAC/JPL da NASA (disponível em <ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/OceanTemperature/modis/L3/terra/11um/v2014.0/4km/daily/>) para as datas escolhidas. Então, a temperatura de superfície foi extraída de cada imagem para os 3 pontos de medição, utilizando o software ArcGIS®.

2.3. Imagens Landsat 7 ETM+

Enquanto o MODIS possui produtos específicos para temperatura de superfície, para as imagens Landsat é preciso fazer a estimativa da temperatura manualmente, utilizando a equação de

transferência radiativa ou algoritmos desenvolvidos para este fim. A radiância captada pelo sensor no espectro do TIR não é a mesma que deixa o solo, já que a atmosfera absorve e emite radiação nesta faixa, principalmente devido ao vapor d'água (Jiménez-Muñoz e Sobrino, 2003). Para a estimativa da temperatura, é necessário remover estes efeitos da atmosfera, que se relacionam à radiância captada pelo sensor através da equação de transferência radiativa, dada por:

$$L_{sensor} = [\varepsilon B + (1 - \varepsilon)L^\downarrow]\tau + L^\uparrow \quad (1)$$

em que L_{sensor} é a radiância captada pelo sensor no topo da atmosfera, ε é a emissividade da superfície, B é a radiância espectral emitida por um corpo negro a temperatura T , τ é a transmissividade, e L^\uparrow e L^\downarrow são a radiância emitida e absorvida pela atmosfera.

Dada a falta de dados atmosféricos precisos para a aplicação direta da equação de transferência radiativa, Jiménez-Muñoz e Sobrino (2003) desenvolveram um algoritmo de canal único, atualizado por Jiménez-Muñoz *et al.* (2009), para estimativa da temperatura de superfície com os sensores Landsat, substituindo os termos τ , L^\uparrow e L^\downarrow por funções do conteúdo de vapor d'água atmosférico, chegando a uma equação geral utilizando apenas constantes que dependem da base de dados atmosféricos escolhida e do vapor d'água, dada por:

$$ST = \gamma[\varepsilon^{-1}(\psi_1 L_{sensor} + \psi_2) + \psi_3 - L_{sensor}] + T_{sensor} \quad (2)$$

em que γ é uma função, T_{sensor} é a temperatura de brilho medida pelo sensor, e ψ_1 , ψ_2 e ψ_3 são as funções atmosféricas, calculadas por:

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

em que $n = 1, 2, 3$, w é a quantidade de vapor d'água atmosférico, e as constantes a , b e c são encontradas em Jiménez-Muñoz *et al.* (2009), dependendo da base de dados atmosféricos. Para este trabalho, duas bases foram utilizadas para comparação: a base SAFREE, que é resultado de uma coleção de perfis atmosféricos marítimos, portanto indicado para a região costeira, e a base TIGR3, que é mais completa em termos de perfis atmosféricos, e apresentou melhores resultados em testes preliminares deste estudo. Para o vapor d'água, foi utilizado o produto MOD07L2, que é diário e possui 1 km de resolução espacial, considerando que este parâmetro não varia muito espacialmente e é suficiente para esta aplicação (Díaz-Delgado *et al.*, 2010), e a emissividade foi adotada constante e igual a 0,99, como feito em outros estudos (e.g. Díaz-Delgado *et al.*, 2010; Deng e Wu, 2013).

Contudo, considerando que as constantes são generalizadas para uma série de perfis atmosféricos, é esperado que elas não sejam muito precisas, principalmente quando há muito vapor d'água na atmosfera (Jiménez-Muñoz e Sobrino, 2009). Por isso, neste estudo também foi utilizada outra ferramenta para estimar os parâmetros atmosféricos: o Atmospheric Correction Parameter Calculator – AtmCorr (Barsi *et al.*, 2003) –, uma plataforma online da NASA (disponível em

<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) que estima os termos de correção atmosférica (τ , L^\uparrow e L^\downarrow) para as bandas termais dos satélites Landsat para o local e data escolhidos. Com estes dados, a Equação 1 pode ser diretamente aplicada para estimar a temperatura. Além disso, o AtmCorr também fornece uma estimativa da quantidade de vapor atmosférico, que pode ser utilizada para substituir o produto MOD07L2 do MODIS. Dado este número de metodologias distintas, este trabalho também se propõe a fazer um estudo comparativo entre métodos de estimativas utilizando imagens do Landsat 7 ETM+.

Neste estudo, apenas imagens Landsat 7 ETM+ T1 (com correção geométrica e radiométrica) foram utilizadas. Primeiro, as imagens foram cortadas para um polígono de 990 m x 480 m envolvendo cada estação, de forma a haver mais pixels para a estimativa (dada a cobertura de nuvens na região e as conhecidas falhas sistemáticas do sensor). Em seguida, os pixels de baixa qualidade foram removidos usando a banda BQA com um buffer de 30 m (um pixel) em volta dos pixels ruins. Para cada polígono, a temperatura de superfície foi calculada para cada data, e então a temperatura calculada para cada estação foi tomada como a média dos valores dos pixels dentro dos polígonos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação das estimativas de temperatura superficial da lagoa Mangueira para cada estação, assim como as diferenças em relação às medições, estão na Figura 2. A maioria das estimativas se encontra numa janela de 2°C em relação à temperatura medida, o que está de acordo com a literatura (Handcock *et al.*, 2006; Crosman e Horel, 2009; Lamaro *et al.*, 2013). As estimativas do Landsat foram, em geral, mais precisas do que as do MOD28, o que se verifica nas métricas calculadas para cada método de estimativa (Tabela 2). As estimativas feitas utilizando os dados do AtmCorr foram as mais precisas, chegando a um erro absoluto de 0,666°C e R² de 0,955. Entre as estimativas usando vapor d'água, a base de dados TIGR3 mostrou-se mais indicada para ser aplicada na Lagoa Mangueira do que a SAFREE, apesar desta conter apenas perfis atmosféricos marítimos e, por isso, era esperado que apresentasse melhor desempenho em áreas costeiras. Além disso, o valor de vapor d'água atmosférico provido pelo AtmCorr mostrou melhor desempenho para as estimativas de temperatura para esta região do que as do MODIS, reduzindo a REQM em mais de 0,2°C.

Observando os valores de erro médio calculados para cada método, se nota que na maioria das estimativas a temperatura foi subestimada, o que pode se dever ao efeito de “pele fria” (do inglês *cool skin layer effect*), em que poucos milímetros da superfície da água são mais frios que a água mais abaixo devido a trocas calor com o ar, influenciadas principalmente pela ação do vento, com redução da temperatura na faixa de 0,1–0,5°C (Fairall *et al.*, 1996). Há técnicas desenvolvidas para se remover esta influência nestas estimativas, mas não foram aplicadas aqui.

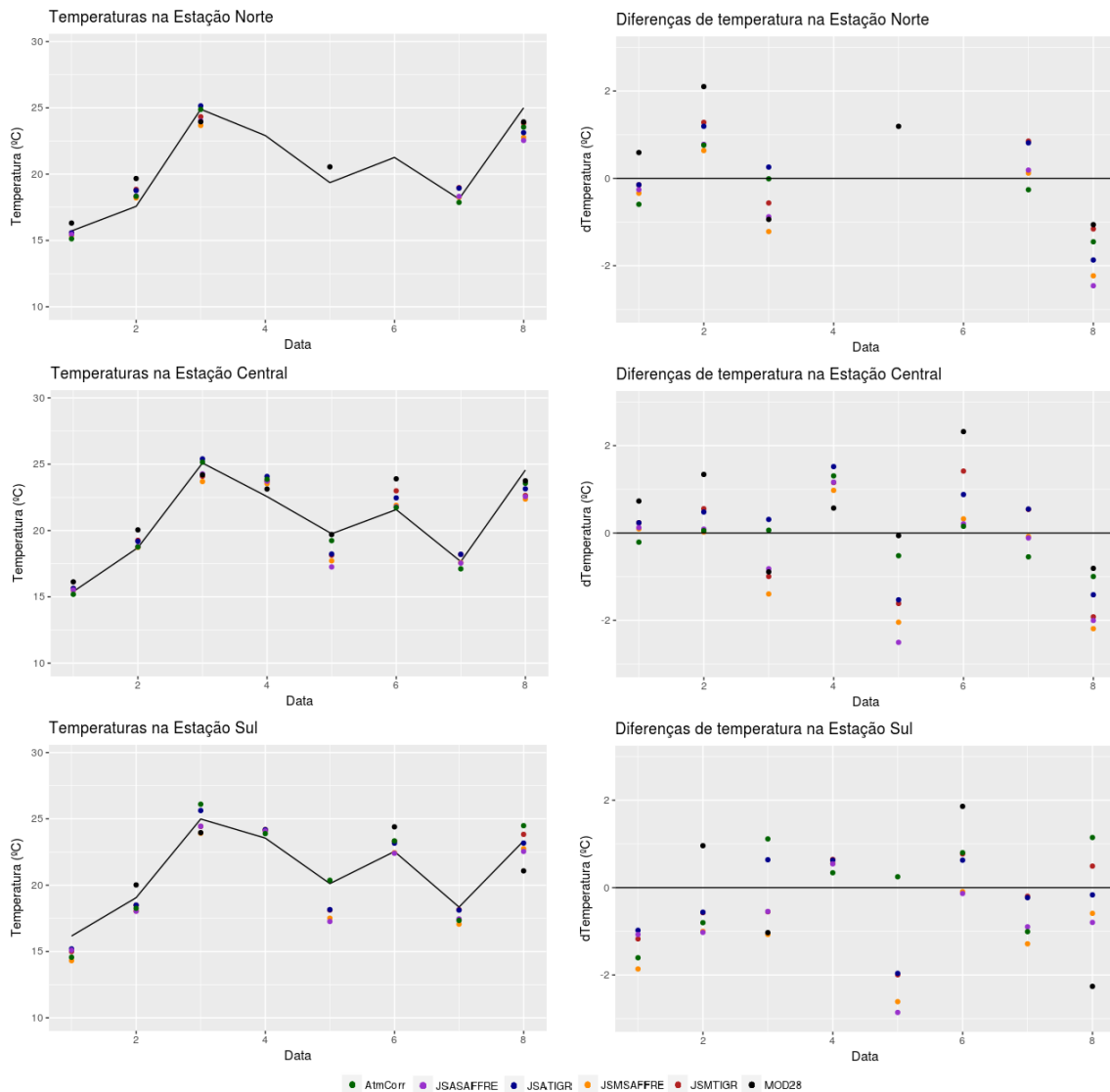


Figura 2 – Gráficos com as temperaturas estimadas (esquerda) e de diferenças (direita) entre a temperatura estimada e a medida em cada estação na Lagoa Mangueira. Os pontos representam a temperatura estimada por cada estimador, e as linhas em preto representam as temperaturas medidas em cada estação. AtmCorr é a estimativa usando os parâmetros atmosféricos calculados na plataforma AtmCorr; JSASAFFRE é a estimativa usando a quantidade de vapor d’água estimado pela AtmCorr e usando as constantes da base SAFREE; JSATIGR usa o mesmo valor de vapor d’água, mas as constantes da base TIGR3; JSMSAFFRE é a estimativa usando a quantidade de vapor d’água do produto MOD07L2 e usando as constantes da base SAFREE; e JSMTIGR usa o mesmo valor de vapor d’água, mas a base TIG3.

Os resultados menos precisos foram obtidos nos dias 5, 6 e 8. Nos dias 5 e 6, houve uma diferença considerável na estimativa do vapor d’água do MODIS e do AtmCorr, com grande variabilidade espacial destes parâmetros, além de haver uma alta cobertura de nuvens na região, podendo haver cobertura de nuvens finas, que não são detectadas pela banda de qualidade dos pixels, resultando na subestimação observada da temperatura. No dia 8 houve uma grande variabilidade da temperatura dentro dos polígonos, o que pode ter sido causado por ventos mais intensos, gerando

ondas na lagoa e interferindo na radiância captada pelo sensor, além de aumentar o efeito de pele fria na superfície do lago, refletindo então no maior erro das estimativas.

Tabela 2 – Métricas calculadas entre a temperatura estimada por cada método e a temperatura medida nas estações da Lagoa Mangueira.

Estimador	Erro absoluto (°C)	Viés (°C)	REQM (°C)	R²
JSMSAFREE	0,987	-0,728	1,267	0,900
JSMTIGR	0,897	-0,140	1,037	0,902
JSASAFREE	0,927	-0,632	1,241	0,894
JSATIGR	0,809	-0,035	0,980	0,916
AtmCorr	0,666	-0,096	0,818	0,955
MOD28	1,169	0,288	1,328	0,852

Os valores encontrados para o produto MOD28 estão semelhantes com o que é encontrado na literatura. Enquanto aqui se encontrou valores de erro absoluto, viés e R² de 1,17°C, 0,29°C e 0,85, respectivamente, Crosman e Horel (2009) encontraram viés de -1,5°C na estimativa da temperatura do Great Salt Lake, nos Estados Unidos, enquanto que Reinart e Reinhold (2008) encontraram um coeficiente de correlação R² de 0,993 e um viés de 0,41°C. Com relação à diferença de temperatura estimada entre o MODIS e o Landsat, além do fato da resolução do MOD28 ser muito mais grosseira, isto pode se dever também a emissividade adotada neste produto, de 1, valor este que pode ser aplicado à água do mar, mas não à água doce (Jiménez-Muñoz e Sobrino, 2003). Esta diferença de apenas 0,01 na emissividade de superfície da água pode causar uma superestimação de até 0,4°C na temperatura, resultando no viés positivo e na menor precisão encontrada.

Para os valores encontrados pelas imagens Landsat, os valores obtidos com os parâmetros do AtmCorr são comparáveis aos encontrados por Schneider e Mauser (1996), que encontraram erro médio de -0,09°C e REQM de 0,73°C usando imagens do Landsat 5 TM, mas usando dados de radiossonda próximos à área do lago como entrada para o código Lowtran-7, para gerar os parâmetros de correção atmosférica para cada data, e aos de Allan *et al.* (2016), que também compararam bases de dados, mas apenas como entrada para o modelo MODTRAN, chegando então a valores mais precisos de parâmetros de correção atmosférica para os lagos estudados, obtendo valores de REQM de 0,48°C, quando usando o produto MOD07L2 como entrada, e de 0,94°C usando o AtmCorr.

No estudo de Lamaro *et al.* (2013), que também fizeram uma comparação entre estimativas usando o Landsat 7 ETM+, os autores encontraram valores de R² e REQM de 0,943 e 1,225°C quando

aplicando o algoritmo de canal único, e de 0,958 e 1,04°C quando usando o AtmCorr, bastante similares aos obtidos aqui. Se ressalta, então, o bom desempenho da plataforma AtmCorr para se estimar os parâmetros de correção atmosférica para estimativas da temperatura de superfície usando imagens Landsat, e também da melhor precisão das constantes calculadas para a base de dados TIGR3 em relação a SAFREE para aplicação do algoritmo de Jiménez-Muñoz e Sobrino (2003) para a região da lagoa Mangueira. Na comparação entre as estimativas feitas por Landsat 7 ETM+ e MOD28, é recomendado utilizar o produto MODIS apenas nos casos em que a precisão não seja tão necessária, dada a facilidade de uso dos produtos MODIS (contra a necessidade de algoritmos para as imagens Landsat), ou caso seja necessário uma grande frequência de dados de temperatura de superfície, até mesmo de forma a complementar uma série de dados de temperatura de superfície advindas do Landsat, para validar modelos ecológicos, por exemplo (Munar, 2017).

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi feita uma comparação de estimativas de temperatura superficial da lagoa Mangueira usando MODIS, com seu produto MOD28 de temperatura superficial oceânica, e usando Landsat 7 ETM+, utilizando diferentes métodos para estimação de parâmetros de correção atmosférica. Se observou que as estimativas do Landsat foram mais precisas do que as do MODIS por todos os métodos, e que a plataforma AtmCorr se destacou, com erro absoluto de 0,666°C e REQM de 0,818°C. Para a aplicação do algoritmo de Jiménez-Muñoz e Sobrino (2003), é recomendado o uso das constantes da base de dados TIGR3 para a região estudada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelas bolsas concedidas a Matheus Henrique Tavares e a Augusto Hugo Farias da Cunha, a CAPES/PROCAD pelo apoio através do projeto “Qualidade e circulação de água em ecossistemas costeiros: monitoramento e modelagem para tomada de decisão” e ao CNPq através do projeto “Impacto das mudanças climáticas em ambientes fluviais e lacustres do Rio Grande do Sul”, a Maurício Munar pela compilação dos dados das estações na lagoa, e ao Global Lake Ecological Observatory Network – GLEON por prover recursos para discussão de estudos focados em lagos.

REFERÊNCIAS

ALLAN, J. D.; CASTILLO, M. M. (2007). *Stream ecology: structure and function of running waters*. Springer Science & Business Media.

- ALLAN, M. G.; HAMILTON, D. P.; TROLLE, D.; MURAOKA, K.; MCBRIDE, C. (2016). “*Spatial heterogeneity in geothermally-influenced lakes derived from atmospherically corrected Landsat thermal imagery and three-dimensional hydrodynamic modelling*”. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 50, 106–116.
- BARSI, J. A.; BARKER, J. L.; E SCHOTT, J. R. (2003). “*An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth-sensing instrument*” in *Proceedings of the 2003 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS’03)*, volume 5, pgs. 3014–3016.
- CROSMAN, E. T.; HOREL, J. D. (2009). “*MODIS-derived surface temperature of the Great Salt Lake*”. *Remote Sensing of Environment* 113(1):73–81.
- DENG, C.; WU, C. (2013). “*Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: A spectral unmixing and thermal mixing approach*”. *Remote Sensing of Environment* 131:262–274.
- DÍAZ-DELGADO, R.; AMEZTOY, I.; CRISTÓBAL, J.; BUSTAMANTE, J. (2010). “*Long time series of Landsat images to reconstruct river surface temperature and turbidity regimes of Guadalquivir Estuary*” in *Proceedings of the 2010 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS’10)*, pgs. 233–236.
- FAIRALL, C.; BRADLEY, E. F.; GODFREY, J.; WICK, G.; EDSON, J. B.; YOUNG, G. (1996). “*Cool-skin and warm-layer effects on sea surface temperature*”. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 101(C1):1295–1308.
- HANDCOCK, R.; GILLESPIE, A.; CHERKAUER, K.; KAY, J.; BURGESS, S.; KAMPF, S. (2006). “*Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales*”. *Remote Sensing of Environment* 100(4):427–440.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; CRISTOBAL, J.; SOBRINO, J. A.; SORIA, 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* 47(1):339–349.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; SOBRINO, J. A. (2003). “*A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data*”. *Journal of Geophysical Research* 108:D22.
- KAY, J. E.; KAMPF, S. K.; HANDCOCK, R. N.; CHERKAUER, K. A.; GILLESPIE, A. R.; BURGESS, S. J. (2005). “*Accuracy of lake and stream temperatures estimated from thermal infrared images*”. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 41(5):1161–1175.
- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. (2006). “*World map of the Köppen-Geiger climate classification updated*”. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3):259–263.
- LAMARO, A. A.; MARIÑELARENA, A.; TORRUSIO, S. E.; SALA, S. E. (2013). “*Water surface temperature estimation from Landsat 7 ETM+ thermal infrared data using the generalized single-channel method: Case study of Embalse del Río Tercero (Córdoba, Argentina)*”. *Advances in Space Research* 51(3):492–500.
- MUNAR, A. M. (2017). “*Pareamento Bacia-Lagoa usando modelagem hidrológica hidrodinâmica e sensoriamento remoto*”. Tese de Doutorado, Programa de PósGraduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 139 p.
- REINART, A.; REINHOLD, M. (2008). “*Mapping surface temperature in large lakes with MODIS data*”. *Remote Sensing of Environment* 112:603–611.
- SCHNEIDER, K.; MAUSER, W. (1996). “*Processing and accuracy of Landsat Thematic Mapper data for lake surface temperature measurement*”. *International Journal of Remote Sensing* 17(11):2027–2041.