

Estudo da variabilidade do campo de temperatura de superfície da água no reservatório de Furnas, Minas Gerais por meio de dados termais MODIS e Landsat 8

Leandro Salmagi Coutinho¹
João Antônio Lorenzetti¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{ salmagi, loren }@inpe.br

Abstract. A very important physical parameter of a lake or reservoir is its surface temperature. Among other uses, it is a fundamental parameter to calculate the surface energy flux that controls the water temperature and vertical and horizontal stratifications. One way of obtaining the surface temperature is to install in the water body a floating platform collecting this data (among other ones). A severe limitation of such approach is that the data is a point data, and normally one is not sure about its validity for other regions of the lake. To fill this data gap a good option is to use satellite thermal infrared data images. The limitation in this case is the coarse spatial resolution. In this paper we explore the possibility of using remote sensing thermal data of the MODIS and LANDSAT 8 together with an *in situ* data for the Furnas hydroelectric reservoir in Brazil. The MODIS data due to its 1km resolution was mostly used to assess the temporal variability of the surface lake temperature; due to its good quality control, it was also used as a control to the LANDSAT 8 temperature. The Landsat 8 thermal data at a resolution of 100m was used to assess the spatial variability of the surface temperature field.

Keywords: Remote Sensing, Image Processing, Limnology.

1. Introdução

A temperatura é uma das variáveis físicas primárias de diversos fenômenos físicos, químicos e biológicos. A dissolução de gases, degradação de compostos químicos, taxas de evaporação e dinâmicas meteorológicas, por exemplo, dependem profundamente da distribuição de temperatura no meio. No estudo da natureza física de lagos e reservatórios, a temperatura tem papel fundamental na taxa de evaporação da água de superfície e na estratificação do corpo de água, regulando a troca de água com o ambiente e a mistura entre as diferentes massas de água que compõem o corpo de água. Muitos estudos fazem uso de sensores instalados nos lagos e reservatórios, coletando dados diretamente do corpo de água. Embora esses sensores produzam dados de alta precisão e frequência, eles fornecem pouca, ou quase nenhuma informação acerca da variabilidade espacial da temperatura ao longo do corpo de água. (LOFGREN e ZHU, 2000; SCHERTZER et al., 2003; STEISSBERG et al., 2005)

O uso de sensores orbitais é particularmente útil por produzir dados periódicos e espacializados da temperatura de superfície, podendo evidenciar heterogeneidades na temperatura entre regiões distintas do corpo de água.

O sensor MODIS, a bordo dos satélites *Terra* e *Aqua* da agência americana USGS (*United States Geological Survey*) fornece dados diários de temperatura de superfície da Terra, na resolução espacial de 1km. O sensor TIRS, a bordo do recente Landsat8, oferece dados de radiância em comprimentos de onda da região do infravermelho termal, em resolução próxima a 100m, com um período de 16 dias.

O uso conjunto de dados limnológicos e meteorológicos coletados por estações fundeadas no corpo d'água, e imagens dos sensores MODIS e TIRS pode oferecer uma visão mais acurada acerca da variabilidade espaço-temporal da temperatura de lagos e reservatórios.

Neste trabalho utiliza-se de dados coletados *in-situ* por uma boia do Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental (ou plataforma SIMA) (ALCÂNTARA et al., 2010), localizada no reservatório de Furnas, no município de Guapé-MG; do produto de temperatura do sensor MODIS; e de imagens termais Landsat 8-TIRS para estudo da natureza da variabilidade de

temperatura da superfície da água, tendo como objetivo analisar a variabilidade espaço-temporal da temperatura de superfície da água.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

A área de estudo (Figura 1) se localiza no município de Guapé-MG, em uma porção do braço Leste do Reservatório de Furnas. O reservatório se estende por uma área estimada de 1440km², com mais de 220km de extensão, e possui largura entre margens média inferior a 1km. A região sudeste do Brasil vem passando por um período de estiagem atípica desde 2012, refletindo na queda constante do nível do reservatório.

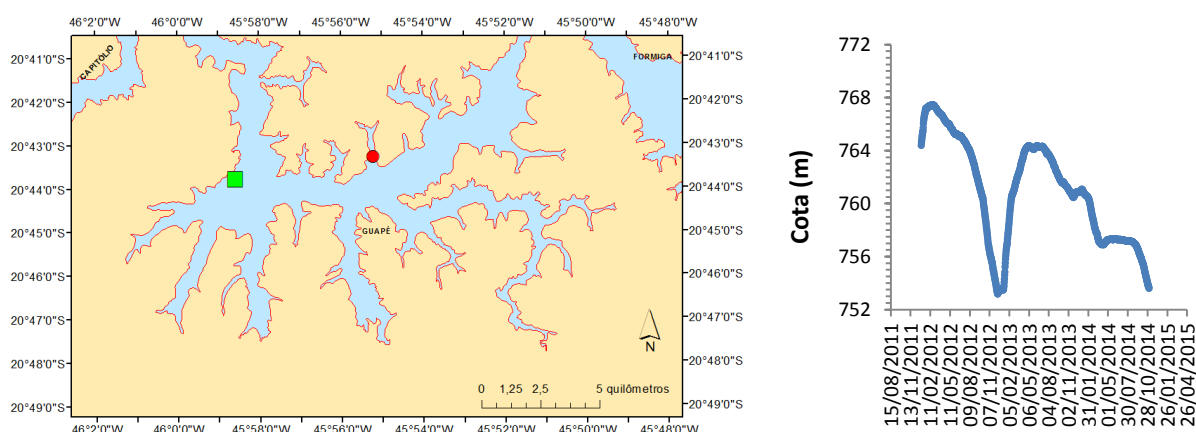


Figura 1. Localização da área de estudo específica, no município de Guapé-MG. (20°44'11''S ; 45°55'42'' O). O ponto vermelho representa a posição da plataforma de coleta de dados SIMA, e o retângulo a posição do pixel do produto MODIS sobreposto à água. À direita está o histórico recente do nível do reservatório, em relação ao nível do mar.

2.2 Dados utilizados

Por meio das plataformas do Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental (SIMA) instaladas em braços secundários do corpo de água, foram coletados dados de radiação solar de ondas curtas, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, temperaturas do ar e da água e intensidade e direção do vento, no período recente de 27 de Julho de 2013 até 2 de Agosto de 2014.

Apesar de estarem presentes seis plataformas SIMA na região, apenas a plataforma mais antiga coletou dados meteorológicos; as demais foram instaladas para coletar dados de temperatura da coluna d'água e de qualidade da água. Os dados de temperatura da água são obtidos à profundidade de 0,5m, e dados de temperatura do ar, vento, umidade e pressão foram obtidos à altura de 3m, em intervalo regular de 10 minutos.

Dos dados de sensoriamento remoto, foram utilizadas imagens do produto termal MODIS MOD11A1, que fornece diariamente temperatura de superfície diurnas (às 10h) e noturnas (às 23h), abrangendo o período de 5 de Março de 2000 a 13 de Outubro de 2014, período de aproximadamente 14 anos, em resolução espacial aproximada de 1km.

Foram obtidas, também, 8 imagens do satélite Landsat 8, de 31 de julho de 2013 a 4 de Setembro de 2014, em condição de céu limpo ou com poucas nuvens, em resolução de 100m, porém reamostradas e distribuídas pela USGS em grade matricial de 30m.

2.3 Processamento dos dados.

Devido a pouca largura do reservatório, apenas um pixel da grade regular do produto termal MODIS se localizou consistentemente sobre a água da região. O valor desse pixel foi extraído de cada imagem, gerando uma série de 1975 valores de temperaturas diurnas. A localização deste pixel e sua série temporal de valores são referenciadas adiante como “Pixel MODIS”. Foi aplicada a Transformada Rápida de Fourier sobre a série suavizada por uma janela de suavização de Tukey, com raio de 5 dias (largura exata de 11 dias).

As imagens Landsat 8 foram convertidas para temperatura de brilho através dos coeficientes e algoritmos sugeridos pela documentação oficial da USGS. A temperatura de brilho foi convertida para a temperatura de superfície da água segundo o algoritmo de Qin e Karnieli (2001), utilizando-se uma emissividade da água de $\epsilon = 0.98$. Esse algoritmo requer o conhecimento do conteúdo de vapor na atmosfera (água precipitável). Para tal, foi utilizada a relação de Smith (1966), que descreve o conteúdo de vapor em função da pressão de vapor de superfície, que é definida por Chapra (1997), conforme as equações 1, 2 e 3.

$$U = \frac{0.01 p_0 \omega_0}{g(\lambda - 1)} \quad (1)$$

$$\omega_0 = \epsilon \frac{e}{p_0} \quad (2)$$

$$e = r \cdot 4,596 \cdot \exp^{\frac{17,27 T_a}{237,3 + T_a}} \quad (3)$$

Onde U é o conteúdo de vapor na atmosfera (em kg/m^2), p_0 é a pressão atmosférica na superfície (em mbar), ω_0 é a razão de mistura, g é a gravidade (m/s^2), ϵ é uma constante 0.622, e é a pressão de vapor (em mbar), r é a umidade relativa (%), e T_a é a temperatura do ar (K). Estes parâmetros básicos foram extraídos dos dados meteorológicos da plataforma SIMA. λ é um parâmetro de curvatura do perfil de umidade tabelado por Smith (1966), dependente da latitude de estação do ano. O valor utilizado neste trabalho foi a média anual de latitude 20-30N, igual a 3,12.

É importante ressaltar que o algoritmo de Qin e Karnieli (2001) foi elaborado para a banda 6 do sensor TM Landsat 5, que possuía banda termal de largura diferente. O algoritmo teve suas constantes ajustadas conforme valores sugeridos no trabalho de Rozenstein et al., (2014) para se adequar a largura da banda 10 do sensor TIRS Landsat 8. A tabela 1 demonstra as constantes utilizadas no algoritmo original e as utilizadas neste trabalho.

Tabela 1: Coeficientes de regressão utilizados no Algoritmo original de estimativa de temperatura de superfície, e coeficientes adaptados para este trabalho.

Qin e Karnieli (2001) (TM6 Landsat 5)	Rozenstein et al., (2014) (TIRS 10 Landsat 8)
$a_6 = -67.355351$	$a_{10} = -59.1391$
$b_6 = 0.458606$	$b_{10} = 0.4213$
$T_a = 17.9769 + 0.91715 T_o$	$T_a = 17.9769 + 0.91715 T_o$
$\tau_6 = 0.974290 - 0.08007 w$	$\tau_{10} = 1.0286 - 0.1146 w$

A estimativa e conteúdo de vapor de Smith (1966) pressupõe um perfil médio logarítmico de umidade atmosférica que não é bem representativo do perfil instantâneo. Esta incerteza do algoritmo pode justificar o viés obtido nos resultados, que, portanto, não deve ser interpretado como medições precisas e acuradas da temperatura da superfície.

As imagens foram mascaradas pelo fatiamento da reflectância no infravermelho próximo, através da banda 5 do Landsat 8 (0,85µm a 0,88µm). Pixels com reflectância acima de 0.03% foram considerados como solo, e abaixo ou igual como água. O valor de corte foi relativamente baixo para minimizar a classificação de pixels de solo como água.

Foram gerados mapas de correlação entre cada pixel e os dados de temperatura da água da plataforma SIMA. Cada pixel de água apresenta um valor para cada uma das oito datas. A comparação entre esses valores e as temperaturas medidas *in situ* permite a geração de estatísticas próprias para cada pixel. Para a geração das estatísticas, a imagem do dia 08/02/2014 foi omitida, por possuir pequenas nuvens sobre o reservatório, que atrapalhavam a interpretação dos resultados.

Também foi gerado um mapa de diferença à média. Para cada imagem foi calculada a média dos pixels válidos, que foi subtraída de cada pixel. A média das oito imagens resultantes representa a diferença típica de temperatura que cada pixel apresenta em relação à média da região.

3. Resultados e Discussão

A série temporal obtida pela extração do Pixel MODIS na região é mostrada na figura 2. Como esperado, o ciclo anual predomina, porém com grande intensidade de variação diária, e considerável variação interanual.

A transformada de Fourier da série suavizada é exibida na figura 3, onde se observa a presença de picos de energia de período anual (365 dias) e semestral (182 dias). É notável a alta energia em comprimentos de onda maiores, característico das flutuações interanuais, porém nenhum pico interanual aparece explicitamente no espectro.

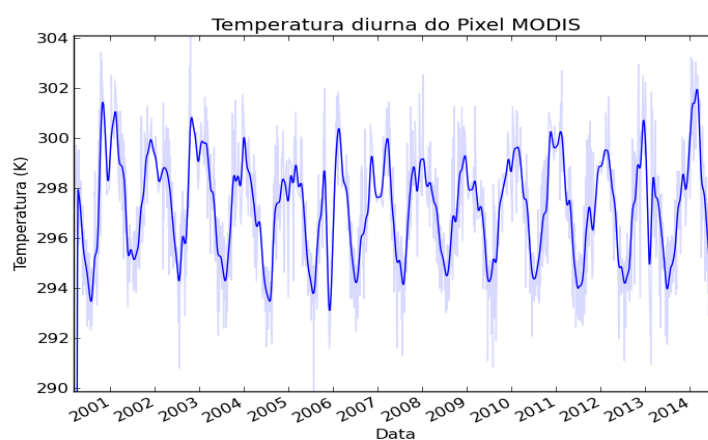


Figura 2. Série de temperatura diurna do pixel puro MODIS na região de Guapé-MG. Uma série suavizada por janela Tukey de raio de 30 dias está sobreposta à série diária original. Média: 296.6K (23.5°C), Variância 5.15 °C², coeficiente angular de regressão linear: -0.03 K/ano.

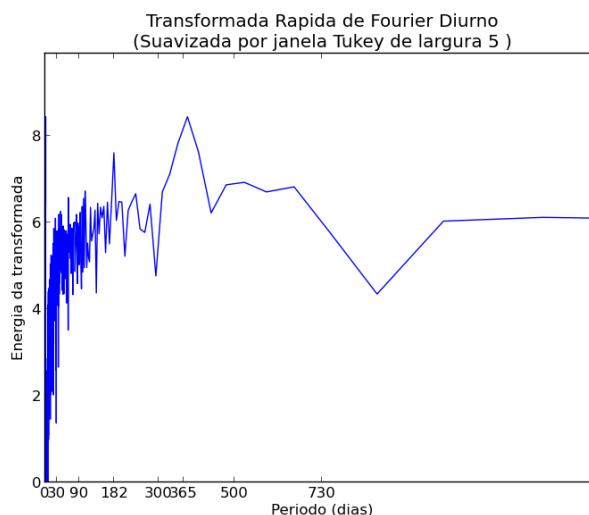


Figura 3. Transformada rápida de Fourier da série temporal do Pixel MODIS na região de Guapé-MG, na série diurna.

A tabela 2 apresenta as estatísticas dos dados obtidos a partir das imagens Landsat 8 corrigidas para temperatura de superfície da água pelo algoritmo de Qin e Karnieli (2001), utilizando dados da plataforma SIMA no local. As estatísticas foram computadas sobre a região de Guapé. O horário típico de passagem do satélite é próximo das 13h03 (GMT), então foram utilizadas as medições da plataforma SIMA de horário mais próximo, isto é, 13h00 (GMT).

Tabela 2. Estatísticas da temperatura de superfície da água obtida pelo algoritmo Qin (2001) sobre as imagens Landsat 8.

Data e hora (GMT)	Parâmetros do algoritmo			Temperaturas estimadas pelas imagens processadas (°C)			
	Conteúdo de vapor (g/cm ²)	Temp. do ar (°C)	Temp. da água na SIMA (°C)	Média	Variância	Máxima	Mínima
31/07/2013 13:05	2.115	18.4	21.09	23.31	0.22	27.08	18.75
08/02/2014 13:04	2.462	26.0	28.03	28.79	2.10	38.60	13.23
15/05/2014 13:03	2.546	19.2	23.64	26.14	0.56	31.49	21.71
16/06/2014 13:03	2.619	20.0	22.32	23.40	0.48	27.91	18.65
02/07/2014 13:03	2.640	18.4	22.11	23.88	0.70	29.82	21.52
03/08/2014 13:03	2.096	17.6	21.2	24.05	0.66	29.66	22.92
19/08/2014 13:03	2.451	20.2	21.35	24.38	2.08	33.22	22.63
04/09/2014 13:03	2.083	21.4	22.62	24.52	0.68	30.31	23.46

Observa-se na tabela 2 que os valores de conteúdo de vapor estimados se encontram em torno de 2.4g/cm². As imagens de 8 de fevereiro e 19 de agosto de 2014 apresentam alta variância e temperatura máxima. A primeira advém da presença de pequenas nuvens sobre a área de estudo, causando a presença de pixels anormalmente frios, e temperatura mínima muito baixa. A segunda não apresenta causa especial, senão o contraste particularmente alto entre as temperaturas nas bordas e no centro do corpo de água. Os pixels de máxima temperatura são pixels de bordas nas extremidades dos braços, onde é de se esperar eventual

contaminação pela temperatura do solo. Observa-se também que as temperaturas médias obtidas nas imagens são consistentemente maiores que as medidas pela plataforma SIMA.

A figura 4 apresenta a diferença típica de temperatura de cada pixel em relação à média da imagem, e o viés de cada pixel em relação à temperatura medida na plataforma SIMA. Pode-se observar que as margens do reservatório apresentam temperaturas tipicamente 0.7K maiores que as regiões centrais do corpo d'água, que tendem a estar cerca de 0.5K abaixo da temperatura média da imagem. Este fenômeno de aquecimento da borda é conhecido, e é devido à distribuição de calor solar em uma camada de água rasa, que aquece mais rapidamente que as regiões centrais (Imberger e Patterson, 1990)

Como o reservatório é bastante estreito, sua temperatura é bastante afetada pelo aquecimento diferenciado das margens, de modo que se observa temperaturas maiores nos braços (mais estreitos e rasos) do que nas porções centrais do corpo de água (mais largas e profundas).

A figura 5 demonstra a raiz do erro médio quadrático (RMSE) das temperaturas medidas em cada pixel, e sua correlação aos dados SIMA. A distribuição do RMSE e o viés sobre valores positivos demonstra que as imagens Landsat 8 tendem a apresentar temperaturas cerca de 2,15K acima das medidas pela plataforma SIMA. No entanto, o mapa de correlação demonstrou uniformidade na variabilidade da temperatura de superfície, de modo que as regiões centrais apresentam correlação levemente maior com a plataforma SIMA localizada em um dos braços.

O caso particular do pixel sobre a plataforma SIMA é exibido na figura 6, onde se observa a tendência de superestimação da temperatura estimada nas imagens LS8.

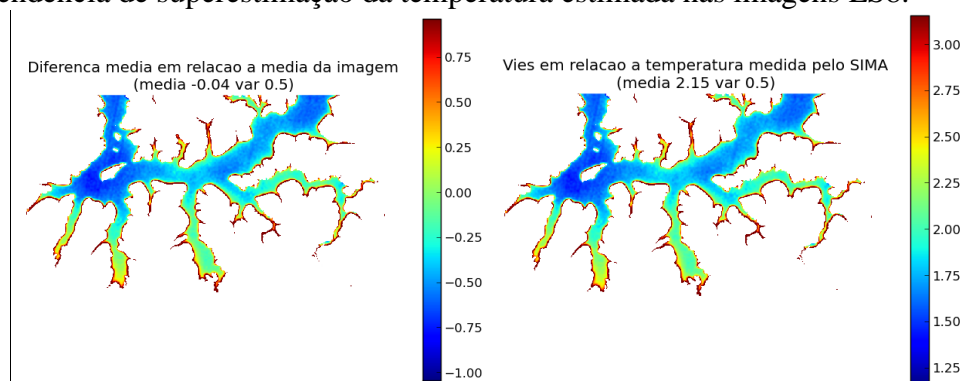


Figura 4. Diferença média em relação à média de cada imagem, e viés em relação aos dados da plataforma SIMA.

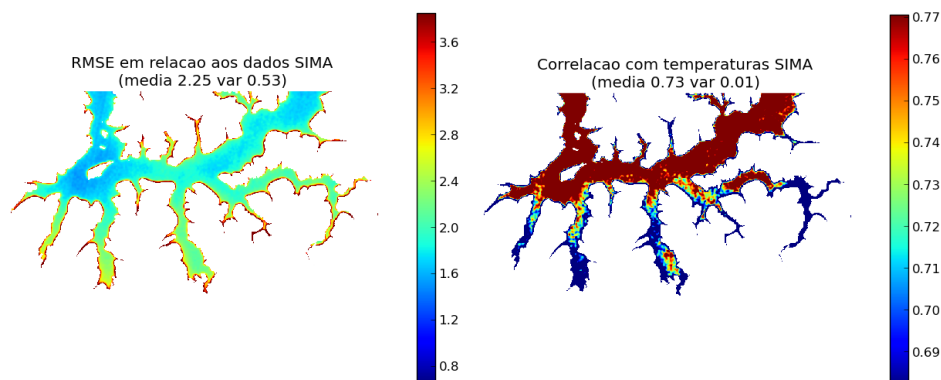


Figura 5. RMSE e correlação da temperatura de superfície estimada, em Kelvin, em relação à temperatura medida pela plataforma SIMA.

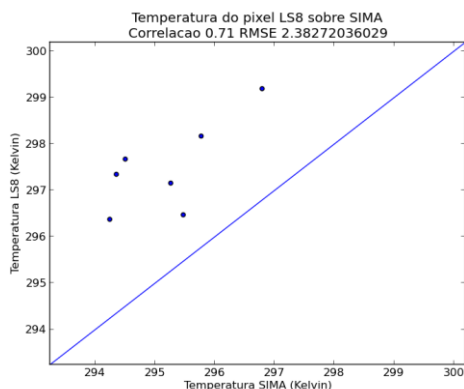


Figura 6. Diagrama de dispersão da temperatura do pixel sobre a plataforma SIMA e a temperatura medida por ela.

Um recorte de 8x8 pixels do Landsat 8, sobrepostos ao Pixel MODIS puro, foi comparados com sua série temporal interpolada, apresentando uma correção de 0.92, com RMSE de 1,29K, e viés de +0.92K (Figura 7). É interessante notar que, embora exista viés positivo entre as temperaturas medidas pelo Landsat 8, a série do Pixel MODIS, e os dados da plataforma SIMA, todas as séries apresentam a sazonalidade de amplitude próxima de 3K. O algoritmo de Qin e Karnieli (2001) converteu a temperatura de brilho das imagens Landsat 8 em temperatura de superfície, levando-as de um estado de subestimativa para o de superestimativa da temperatura. A falta de precisão na estimativa do conteúdo de vapor da atmosfera é uma das possíveis causas desta superestimativa.

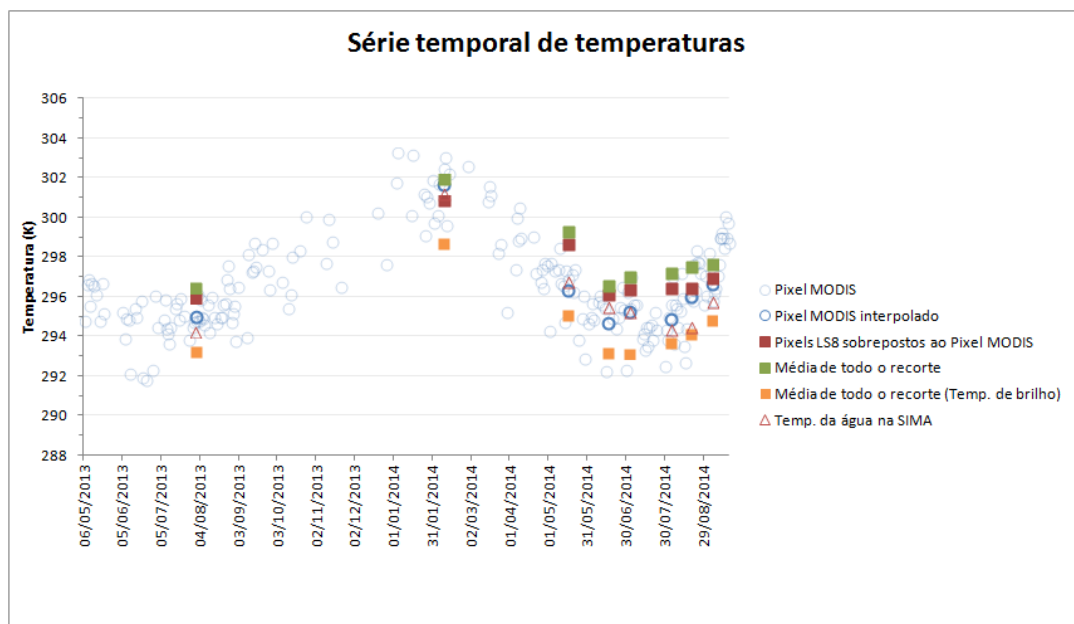


Figura 7. Série temporais de valores de temperatura. A legenda descreve a simbologia para o Pixel MODIS e seus valores interpolados, para comparação aos pixels Landsat 8 sobre a mesma região; a temperatura média de toda a região do recorte, em temperatura estimada e temperatura de brilho, e a temperatura medida pela plataforma SIMA à profundidade de 0,5m.

4. Conclusão

Dados do produto de temperatura de superfície MOD11A1, do sensor MODIS Terra; do sensor TIRS do satélite Landsat 8; e dados in-situ coletados pela plataforma SIMA em Guapé-MG foram utilizados para estudar a variabilidade do campo de temperatura de superfície da água. Os dados MODIS, utilizados principalmente para avaliar a variabilidade temporal e servir de referência de temperatura para os dados termais Landsat8, apresentaram dominância de periodicidade anual e semestral, mas com grande variabilidade interanual, e uma leve tendência de esfriamento de -0.03K/ano . Devido ao baixo valor dessa tendência, ainda é um pouco prematuro se concluir definitivamente num esfriamento desse corpo d'água, podendo essa tendência ser apenas um efeito de imperfeições nos dados.

As temperaturas estimadas dos dados Landsat 8 apresentaram viés de $+0.92\text{K}$ em relação aos dados MODIS, e de $+2.15\text{K}$ em relação à temperatura SIMA, demonstrando uma tendência de superestimação da temperatura. No entanto, as três fontes de dados apresentam grande correlação. As margens do reservatório apresentam, no período próximo das 13h (GMT), temperaturas aproximadamente 1.2K mais quentes que as regiões centrais, e os braços apresentam temperatura média 0.5K maiores que o corpo central. No desenvolvimento dessa investigação, ênfase será dada na tentativa de ajustar os algoritmos disponíveis de modo a reduzir as diferenças observadas entre as bases de dados.

5 Referências Bibliográficas

Alcântara, E. H.; Stech, J. L.; Lorenzetti, J. A.; Bonnet, M. P.; Casamitjana, X.; Assireu, A. T.; Novo, E. M. L. D. M. 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, nov. 2010.

Chapra, S. C. **Surface Water-Quality Modelling**. New York, NY: Waveland Press, Inc., 1997.

Imberger, J.; Patterson, J. C. **Physical Limnology**. [S.l.]: Academic Press, Inc, 1990. 303–475 p.

Lofgren, B. M.; Zhu, Y. Surface energy fluxes on the Great Lakes based on satellite-observed surface temperatures 1992 to 1995. **Journal of Great Lakes Research**, v. 26, n. 3, p. 305–314, jan. 2000.

Qin, Z.; Karnieli, A.; Berliner, P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 18, p. 3719–3746, jan. 2001.

Rozenstein, O.; Qin, Z.; Derimian, Y.; Karnieli, A. Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 14, n. 4, p. 5768–80, jan. 2014.

Schertzer, W. M.; ROUSE, W. R.; BLANKEN, P. D.; WALKER, A. E. Over-lake meteorology and estimated bulk heat exchange of Great Slave Lake in 1998 and 1999. **Journal of Hydrometeorology**, v. 4, p. 649–659, 2003.

Smith, W. Note on the relationship between total precipitable water and surface dew point. v. 5, p. 2, 1966.

Steissberg, T. E.; HOOK, S. J.; SCHLADOW, S. G. Characterizing partial upwellings and surface circulation at Lake Tahoe, California–Nevada, USA with thermal infrared images. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, n. 1-2, p. 2–15, nov. 2005.