

Validação da TSM estimada pelo MODIS na região Nordeste do Oceano Atlântico Sul

Arcilan Trevenzoli Assireu¹
Ramon Morais de Freitas²
João Antônio Lorenzetti²

¹ Instituto de Recursos Naturais – Universidade Federal de Itajubá
Av. BPS, 1303 – B. Pinheirinho, Itajubá – MG.
arcilan@ltid.inpe.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{ramon, loren}@ltid.inpe.br

Abstract. Sea surface temperature (SST) from infrared satellite measurements are compared to SST measured by satellite tracked drifters, in the Northwest region of the South Atlantic, taken as reference values. Previous studies indicate that SST variability observed in this region has important influence on the seasonal and longer term precipitation changes on the Northeast Brazil. Mean SST RMSE between MODIS and drifter data are 0.40 °C and 0.52 °C during day and night, respectively. At night time the SST must be corrected by considering the bias (skin-subsurface) of 0.5°C.

Palavras-chave: MODIS, Sea Surface Temperature, Northwest Atlantic Ocean, Produtos MODIS, Temperatura da Superfície do Mar (TSM), Validação da TSM e Oceano Atlântico Nordeste.

1. Introdução

A temperatura da superfície do mar (TSM), uma das mais importantes variáveis relacionadas ao sistema oceano-atmosfera, é rotineiramente medida ou estimada a partir de navios, bóias e imagens de satélite. Os mapas de TSM obtidos por satélite fornecem informação importante neste contexto, pois representam uma visão sinótica de uma grande área. Os principais sensores utilizados são os de infravermelho termal e de microondas. Os dados de TSM mais amplamente utilizados são provenientes do Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) e do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). O AVHRR tem uma longa história (em torno de 20 anos) e é amplamente utilizado em vários estudos (Lorenzetti et al., 2010; Lentini et al., 2006; Souza et al., 2006). O MODIS é um satélite aplicado em estudos de processos terrestres e oceânicos, que possui boa resolução espacial e temporal. Ambos os produtos fornecem medidas de TSM com cobertura global e amplamente utilizada pela comunidade científica.

Entretanto, os dados de TSM dos satélites ainda necessitam ser validados para confirmar a aplicabilidade destes dados gerados por sensoriamento remoto. A calibração é necessária porque o instrumento infravermelho do satélite (e seus sistemas de calibração a bordo) deriva ao longo do tempo e existe uma atmosfera bastante variável que afeta a radiação desde a superfície da Terra até o satélite (Emery et al., 2001). A forma mais freqüente de validação é a comparação entre a TSM obtida por satélites com medidas in situ realizadas por navios, bóias ancoradas ou derivadores lagrangianos.

Vários estudos têm indicado a influência de diversos fenômenos atmosféricos sobre a precipitação na região nordeste do Brasil (Hastenrath & Heller, 1977; Moura & Shukla, 1981; Hastenrath, 1984; Mechoso et al., 1990; Souza et al., 1997; Uvo et al., 1998; Moscati & Gan, 2007). Também, estudos climatológicos têm indicado uma forte relação entre a distribuição de TSM ao longo da bacia do Atlântico Tropical e a precipitação sobre o Semi-árido do NEB (Moura e Shukla, 1981; Rao et al., 1999). Assim, a disponibilidade de dados de TSM de boa qualidade é fundamental para o estudo do clima na região nordeste do Brasil. Para isso, é

necessário validar os dados de TSM obtidos por satélite, ao longo do Oceano Atlântico Nordeste.

Assim, o objetivo deste trabalho é comparar os dados de TSM obtidos pelo sensor MODIS com os dados de TSM medidos por derivadores rastreados por satélite, considerados como medidas in situ. A hipótese de que os dados de derivadores podem ser utilizados como “verdade de campo” para este tipo de estudo é suportada pelos estudos de Reverdin et al. (2010) que analisaram a acurácia dos dados de TSM medidos por derivadores. Os resultados destes autores indicaram uma deriva no sensor de $-0,10^{\circ}\text{C}/\text{ano}$. Considerando que a vida média dos derivadores não ultrapassa um ano, a deriva do sensor de TSM dos derivadores pode ser assumida negligenciável.

2. Materiais e Métodos

2.1 Dados de TSM obtidos por derivadores rastreados por satélite

Embora o objetivo principal dos derivadores sejam medidas lagrangianas das correntes de superfície ou sub-superfície, o derivador é equipado também com um termistor que é capaz de fornecer dados de temperatura entre -5°C a 45°C . Os dados relativos à temperatura são transmitidos em 10 bits, o que resulta em uma resolução em $^{\circ}\text{C}/\text{bit}$ igual a:

$$\Delta T/210=[45^{\circ}\text{C}-(-5^{\circ}\text{C})/210]=50^{\circ}\text{C}/1024\approx 0,048^{\circ}\text{C}/\text{bit}. \quad (1)$$

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes de 210 derivadores lançados na região Nordeste do Atlântico Sul, entre os anos de 1995 e 2009 (Fig. 1a). A distribuição espacial dos dados em caixas de $0,5^{\circ}\times 0,5^{\circ}$ indica a boa cobertura espacial (Fig. 1b).

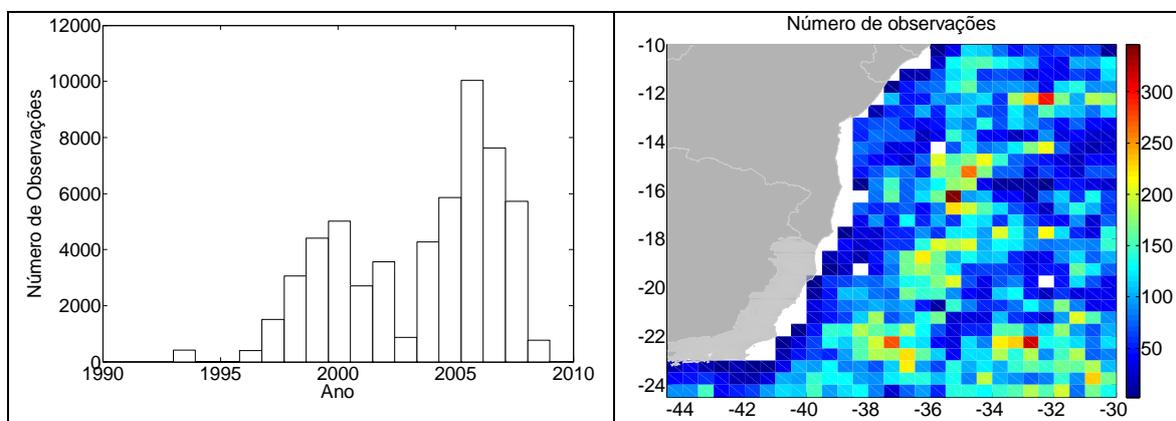


Figura 1 – Histograma anual de observações de TSM realizadas por derivadores (a) e distribuição espacial destas observações em caixas de $0,5^{\circ}\times 0,5^{\circ}$ (b).

A triagem dos dados de derivadores a serem utilizados nas análises foi baseada na inspeção visual das imagens diárias do MODIS no ano de 2006 (ano de maior cobertura de derivadores – Fig. 1a) de forma a identificar imagens com significativas porções desprovidas da presença de nuvens. Após isto, os valores de temperatura correspondentes ao pixel da imagem foram mapeados de forma a encontrar os correspondentes nos dados de TSM dos derivadores. Os dados foram comparados com o pixel central (posição do derivador) e também com valores máximos de uma janela da imagem constituída de 3×3 pixel cujo pixel central é a posição do derivador. O intervalo de horas entre as medidas do satélite e do derivador foi de no máximo uma hora e trinta minutos.

2.2. Dados MODIS

O sensor MODIS a bordo dos dois satélites EOS AQUA e EOS TERRA estimam a temperatura da superfície do mar a partir da radiação medida em duas bandas relativas ao infravermelho centradas em torno de 11 μm e 12 μm – usadas para as estimativas diurnas, e uma faixa usada para estimativas noturnas – em torno de 3.9 μm e 4 μm . O algoritmo para esta região do espectro não é usado para estimativas diurnas, pois os comprimentos mais curtos do infravermelho são contaminados pela reflexão solar. As imagens MODIS podem ser adquiridas gratuitamente no endereço eletrônico <http://disc.gsfc.nasa.gov/data/datapool/>. Foram utilizados dados com nível 3 de processamento, que corresponde a dados corrigidos dos efeitos atmosféricos e com resolução média de 4km.

2.3. Análise dos dados

A preocupação inicial quanto a escolha dos dados baseou-se em uma análise visual nos produtos MODIS AQUA de forma a selecionar imagens com considerável fração desprovida de nuvens. Com o intuito de investigar possíveis diferenças entre os valores noturnos e diurnos, foram utilizados os valores de dois horários de TSM dos derivadores, correspondentes aos horários de passagem do sensor (01:30h e 10:30h). A partir daí foram construídos dois conjuntos de dados: o primeiro relativo aos valores de TSM estimados pelo sensor MODIS e o segundo com valores de TSM medidos pelos derivadores. Como critérios estatísticos na validação, a fim de se avaliar o grau de ajuste entre os valores observados e estimados, os erros foram quantificados por meio das medidas do Viés (bias) e do RMSE (Root Mean Squared Error). O Viés indica o desvio médio dos valores estimados pelo sensor em relação aos valores medidos pelos derivadores e o RMSE mede a variação dos valores estimados (satélite) em relação aos valores observados (derivadores). O cálculo do RMSE e do Viés podem ser feitos a partir das Equações 2 e 3, respectivamente.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [ts(i) - td(i)]^2} \quad (2)$$

$$\text{Viés} = \frac{\sum [ts(i) - td(i)]}{n} \quad (3)$$

Onde ts é o valor de TSM estimado pelo sensor, td é o valor de TSM estimado pelos derivadores e o índice i , de 1 a n , onde n é o número de pares de dados.

3. Resultados e Discussão

Análises de regressão foram efetuadas sobre os dados de TSM estimadas a partir do sensor MODIS e os dados de TSM estimados pelos derivadores. Foram selecionadas datas no ano de 2006, devido a maior cobertura por derivadores, cujas imagens apresentavam reduzido percentual de cobertura de nuvens. Assim foram utilizadas imagens dos dias (número de regiões): 21/03(01), 15/04(03), 12/05(04), 20/09(12), 24/09(12), 20/11(08), 25/11(08) e 04/12(04). No intuito de investigar a melhor abordagem comparativa entre pixel da imagem e valor “pontual” medido pelo derivador, as análises foram feitas considerando janelas 3 x 3 cujo pixel central corresponde à posição do derivador, onde foram efetuadas as seguintes comparações: derivador versus pixel central (Fig. 2-a,c) e derivador versus o valor máximo da janela de pixel 3 x 3 (Fig. 2-b,d). Também, tendo em vista investigar variações intra-diurnas da relação entre estas grandezas, as análises foram realizadas considerando o período diurno (Fig. 2-a,b) e noturno (Fig. 2-c,d). Apesar da boa correlação entre os dados, percebe-se que os valores de TSM medidos pelo derivador encontram-se sempre abaixo da

linha diagonal que descreve a condição ideal: TSM estimada pelo satélite igual a medida pelo derivador (Fig. 2-a,b,c,d). Este viés negativo na relação entre satélite e derivador é confirmado a partir da Tabela 1. A comparação entre os valores de RMSE considerando os dois casos analisados, pixel central e máximo valor da janela 3x3 (Tabela 1), mostra que a análise considerando o valor máximo levou a menores valores de RMSE, o que confirma que o método de escolha do pixel mais quente, para janelas de 3 x 3 pixels, centrado na posição da bóia, é o mais adequado para este tipo de análise. Conforme descrito por vários autores (Barbieri et al., 1983; Araújo 1997), a finalidade deste método é a de minimizar os erros provocados pela presença de nuvens de sub-pixel e minimizar a influência das áreas de frentes oceânicas, onde os gradientes horizontais superficiais são intensos, podendo superar 0,5°C por quilômetro. Assim, as discussões a partir de agora serão desenvolvidas em torno dos valores obtidos a partir da comparação entre os valores de TSM estimados pelo satélite com os valores obtidos a partir do pixel mais quente na respectiva janela 3x3 cujo pixel central é a posição do derivador.

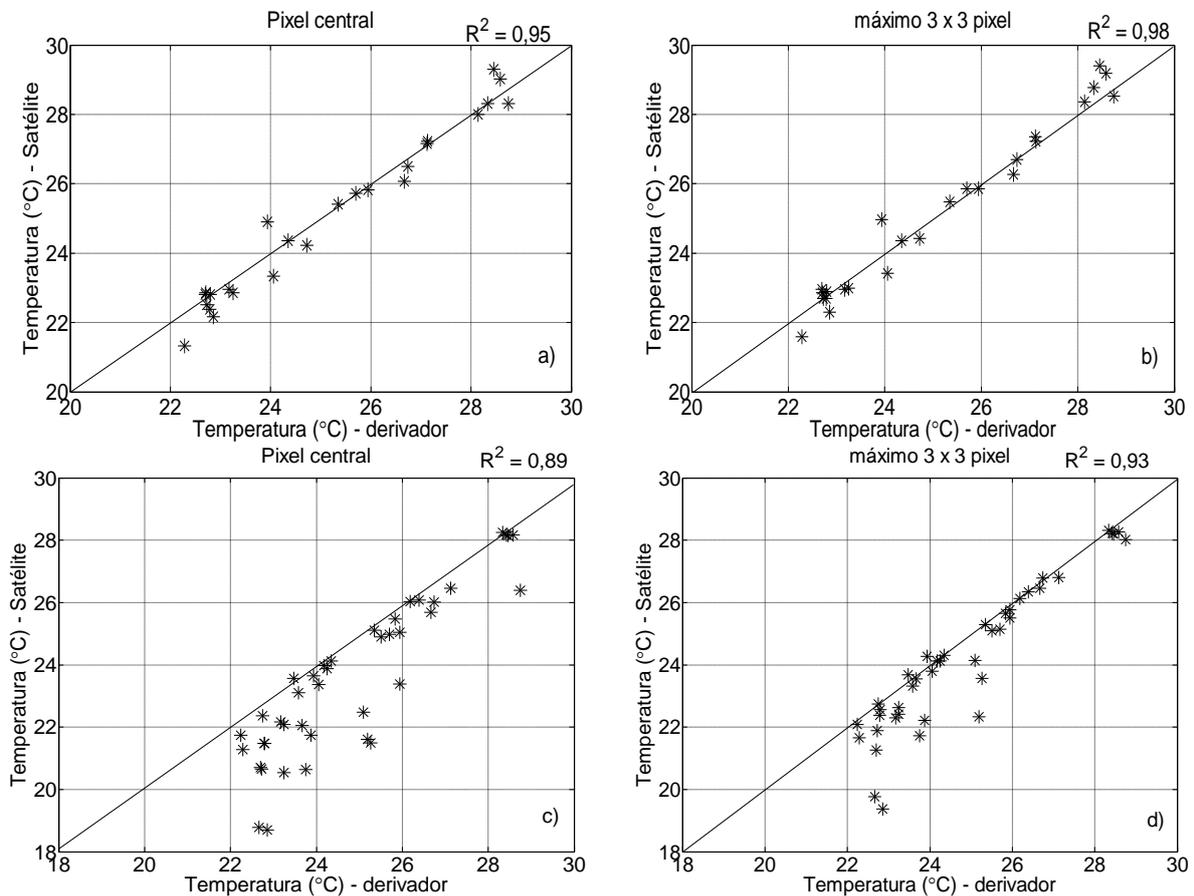


Figura 2 – Gráficos de dispersão da correlação entre os dados estimados pelo sensor e observados pelos derivadores considerando o pixel central da imagem 3x3 (a,c) e o pixel mais quente da janela 3x3 (b,d). Os painéis superiores (a,b) correspondem ao período diurno e os painéis inferiores (c,d) correspondem ao período noturno.

Tabela 1. Estatística básica para a relação entre a TSM medida pelo satélite e a TSM medida pelo derivador.

	$(T_{\text{sat}} - T_{\text{der}}) (^{\circ}\text{C})$	$ T_{\text{sat}} - T_{\text{der}} (^{\circ}\text{C})$	RMSE	
			Pixel central	Máximo 3 x 3

Dia	$\mu = -0,16$ $\sigma = 0,44$	$\mu = 0,35$ $\sigma = 0,30$	0,45	0,40
Noite	$\mu = -0,63$ $\sigma = 0,87$	$\mu = 0,66$ $\sigma = 0,85$	1,92	1,06

Os valores de RMSE entre dia (0,40) e noite (1,06) apontam para uma diferença importante no nível de ajustes dos dados, indicando uma diferença bastante preocupante nos dados noturnos. Esta diferença também foi observada para os valores de viés (segunda coluna da Tabela 1). Na tentativa de entender estas diferenças, é importante se ter em mente que a temperatura estimada pelo satélite é a temperatura de pele enquanto a medida pelo derivador é tipicamente entre 10 e 15 cm abaixo da linha d'água, sendo pois, a rigor, uma temperatura integrada ao longo de uma pequena coluna que varia em função dos movimentos ondulatórios da superfície do oceano a que os derivadores experimentam. Como pode ser visto a partir da Figura 3a, a temperatura de pele (círculo) pode variar de até $0,5^{\circ}\text{C}$ para a temperatura medida a 5 cm (cruz), às 06:55h. Dentre os perfis mostrados na Figura 3, este é o que melhor representa o comportamento noturno. Vários autores têm estudado a influência do vento para esta análise. Durante períodos de ventos modestos ($< 6 \text{ m/s}$), existem diferenças significativas entre a temperatura de pele e a de sub-superfície. Se o vento é mais intenso ($> 6 \text{ m/s}$), estas diferenças tornam-se negligenciáveis (Donlon, 2002; Barton, 2001). Portanto, a informação sobre a condição de vento pode ser muito importante, inclusive para esclarecer os pontos de outliers.

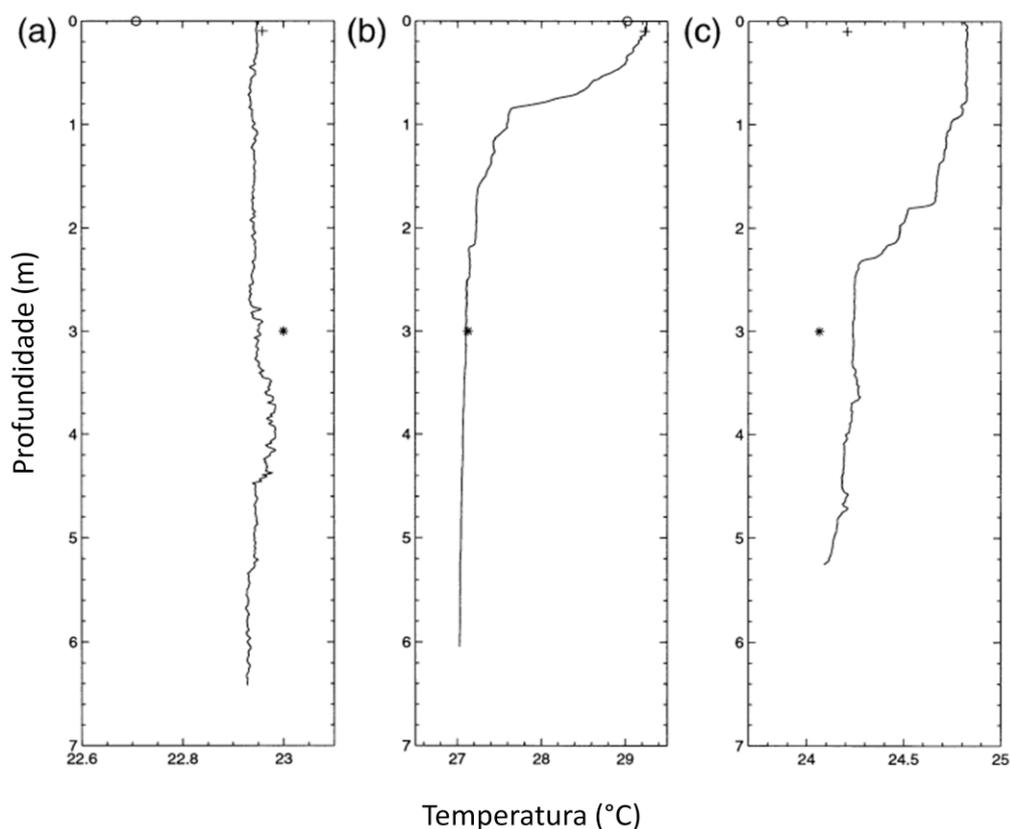


Figura 3 – Perfis verticais de temperatura durante do dia e noite para o Golfo da Califórnia obtida a partir do perfilador SkinDeEP. Em cada gráfico, o círculo (na superfície) indica a

temperatura de pele da água, a cruz indica a temperatura medida in situ a uma profundidade de 5 cm e o asterisco é a temperatura medida por um termosalinógrafo a uma profundidade de 3m. (a) perfil realizado as 06:55h, (b) perfil realizado as 13:09h e (c) perfil realizado as 19:20h, todos em hora local. Fonte: Adaptado de Donlon et al. (2002).

Assumindo a hipótese de que a diferença de temperatura indicada na Figura 3a pudesse explicar a grande diferença observada no período noturno, a temperatura medida pelo derivador foi “corrigida” para o valor esperado de pele pela adição de 0,5°C nos valores noturnos. A estatística da regressão resultante desta correção é apresentada na Figura 4 e Tabela 2. Conforme pode ser observado, tanto o viés quanto o RMSE passaram a ter valores que refletem um melhor ajuste e, portanto, indica a eficiência desta correção para as comparações, no período noturno e, provavelmente, para condições de ventos modestos, para a comparação entre TSM medida pelos derivadores e por satélite.

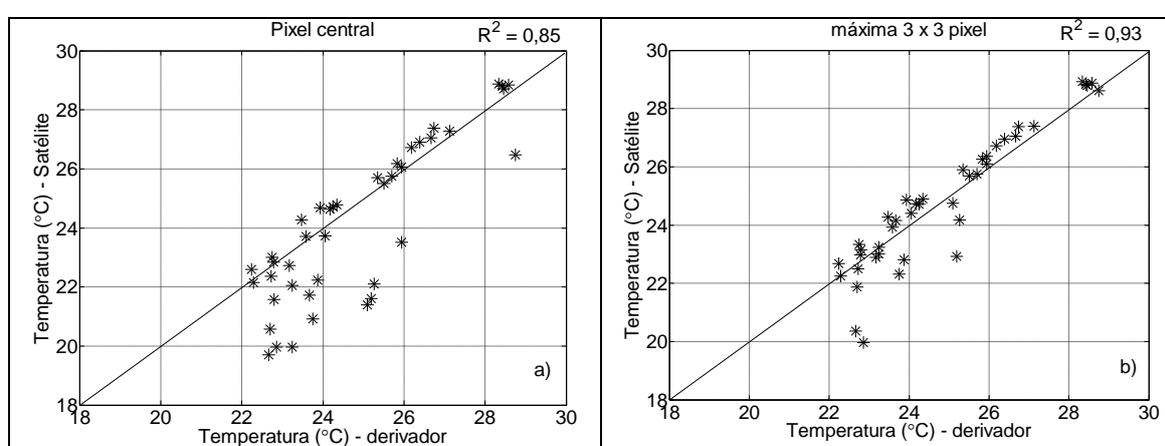


Figura 4 – Gráficos de dispersão da correlação entre os dados estimados pelo sensor e observados pelos derivadores considerando o pixel central da imagem 3x3 (a) e o pixel mais quente da janela 3x3 (b), após a compensação do viés entre a temperatura de pele e a de sub-superfície para o período noturno.

Tabela 2. Estatística básica para a relação entre a TSM medida pelo satélite e a TSM medida pelo derivador, após a compensação do viés entre a temperatura de pele e a de sub-superfície para o período noturno.

	$(T_{\text{sat}} - T_{\text{der}})$ (°C)	$ T_{\text{sat}} - T_{\text{der}} $ (°C)	RMSE	
			Pixel central	Máximo 3 x 3
Noite / corrigido	$\mu = -0,14$ $\sigma = 0,57$	$\mu = 0,58$ $\sigma = 0,65$	1,57	0,52

4. Conclusões

Neste estudo foram realizadas comparações entre dados de TSM estimados pelo sensor MODIS e medidos por derivadores rastreados por satélite. As comparações foram realizadas sob duas abordagens tendo-se considerado janelas 3 x 3 cujo pixel central era a posição do derivador em que, numa comparação, foi considerado diretamente o pixel central e a outra foi realizada com o pixel mais quente dentro da janela. Os resultados confirmaram que a utilização do pixel mais quente leva a melhores ajustes refletidos pelos valores de viés e RSME. As análises foram realizadas para períodos noturnos e diurnos. Os resultados indicaram que, para as análises noturnas, uma correção de viés devido a diferenças entre temperatura de pele e a efetivamente medida pelos derivadores, aumenta substancialmente a

significância da análise. Baseado nos resultados e discussão apresentados, conclui-se neste trabalho que os valores de RMSE tanto durante o dia (0,40) quanto a noite (0,52) (após a correção de viés devido a questões amostrais discutidas no trabalho) indicam que os dados de TSM gerados pelo MODIS apresenta acurácia muito próxima das exigidas pelos modelos climatológicos, sendo, portanto, adequado para estudos de monitoramento e previsão de processos oceânicos e de interação oceano-atmosfera. Para estudos futuros sugere-se que o campo de vento, no momento das medidas, seja levado em conta, pois pode fornecer importantes subsídios para a compreensão de prováveis outliers.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece a Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado de Minas Gerais FAPEMIG pelo apoio.

Referências Bibliográficas

Araújo, C. E. S. Avaliação da acurácia das temperaturas da superfície do mar obtidas por satélite para a região Sul-Sudeste da costa brasileira. 1997. 126p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP. 1997.

Barbieri, R.W. ; McClain, C.R. ; Endres, D.L. **Methodology for interpretation of SST retrievals using the AVHRR split window algorithm**. Greenbelt, Maryland:NASA, Sept. 1983. (NASA Technical Memorandum 85100).

Donlon, C. J., P. J. Minnett, C. Gentemann, T. J. Nightingale, I. J. Barton, B. Ward, M. J. Murray. Toward Improved Validation of Satellite Sea Surface Skin Temperature Measurements for Climate Research. **Journal of Climate**, Vol.15, p. 353–369, 2002.

Emery, W. J., D. J. Baldwin, P. Schlüssel, and R. W. Reynolds. Accuracy of in situ sea surface temperatures used to calibrate infrared satellite measurements. **Journal of Geophysical Research**. Vol.106, p. 2387–2405, 2001.

Hastenrath, S. and Heller, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. Quarterly **Journal of the Royal Meteorological Society**. Vol. 102, p. 77 – 92, 1977.

Lentini, C. A. D., Goni, G. J., Olson, D. B. Investigation of Brazil Current rings in the confluence region. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 111, C06013, 2006.

Lorenzetti, J. A. ; Stech, J. L. ; Mello Filho, W. L.; Assireu, A. T. Satellite observation of Brazil Current inshore thermal front in the SW South Atlantic: Space/time variability and sea surface temperatures. **Continental Shelf Research**, Vol. 7, p. 48-59, 2009.

Mechoso, C.R.; Lyons, S.W. and Spahr, J.A. The impact of sea surface temperature anomalies on the rainfall over Northeast Brazil. **Journal of Climate**. Vol. 3, p. 812 – 826, 1990.

Moscato, M. C. L., Gan, M. A. Rainfall variability in the rainy season of semiarid zone of Northeast Brazil (NEB) and its relation to wind regime. **International Journal of Climatology**, . Vol. 27, p. 493–512, 2007.

Moura, A.D. and Shukla, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory e numerical experiments with a general circulation model. **Journal Atmospheric Science**. Vol. 38, p. 2653 – 2675, 1981.

Reverdin, G., and Coauthors. Temperature Measurements from Surface Drifters. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, Vol. 27, 1403–1409, 2010.

Souza, R. B., *et al.* Multi-sensor satellite and *in situ* measurements of a warm core ocean eddy south of the Brazil-Malvinas Confluence region. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 100, p. 52-66, 2006.

Uvo, C.B.; Repelli, C.A.; Zebiak, S.E. and Kushnir, Y. The relationship between tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil monthly precipitation. **Journal of Climate**. Vol. 11, p. 551 – 562, 1998.