



Avaliação do Erro dos Algoritmos de Estimativa da Temperatura da Superfície do Mar Utilizando Dados MODIS Durante Eventos de Ressurgência na Costa de Cabo Frio, RJ
Evaluation of the Error of Sea Surface Temperature Estimate Algorithms, Using MODIS Data During Upwelling Events in Cabo Frio Coast, RJ

Gilberto Rodrigues Pimentel Junior; Gutemberg Borges França & Leonardo de Faria Peres

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia, Avenida Athos da Silveira Ramos, 274 – Bloco G – Cidade Universitária – 21941-916, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
E-mails: pimentel@lma.ufrj.br; leonardo.peres@igeo.ufrj.br; gutemberg@lma.ufrj.br
Recebido em: 24/05/2017 Aprovado em: 19/06/2018
DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_31_40

Resumo

Neste trabalho é estudado o comportamento do viés da estimativa da temperatura da superfície do mar, utilizando dados dos sensores MODIS a bordo dos satélites Aqua e Terra, durante a ocorrência do fenômeno de ressurgência, nas proximidades da boia Cabo Frio (23° 37,82' S; 42° 12,15' W). Analisa-se o comportamento das estimativas de temperatura da superfície do mar versus variáveis oceanográficas e meteorológicas medidas na boia Cabo Frio (ou derivadas dessas) para o período de 1 de janeiro de 2014 a 31 de janeiro de 2015. Confirma-se no presente estudo, a exemplos de outros trabalhos desenvolvidos, que o vento à superfície é uma força importante nos eventos de ressurgência e ainda, que o valor da diferença da temperatura do ar e da temperatura da boia e, conseqüentemente, os valores dos fluxos turbulentos, estão sistematicamente correlacionados aos erros na estimativa da temperatura da superfície do mar com base no sensor MODIS. Uma correção para os erros da estimativa da temperatura da superfície do mar é apresentada e discutida. **Palavras-chave:** Temperatura da Superfície do Mar; Ressurgência; MODIS

Abstract

This work studies the uncertainties associated to sea surface temperature (SST) retrievals based on MODIS data, during the upwelling that normally occur alongside of coast of Cabo Frio, Brazil. The SST results versus the physical variables collected (or calculated from them) by Cabo Frio buoy (installed at 23° 37,82' S; 42° 12,15' W), from 1 January 2014 to 31 January 2015, were analysed. Results have indicated that upwelling occurrence – in the study area – is highly correlated with wind direction and also that the error in the estimation of sea surface temperature using satellite data is dependent on the difference between the air temperature and the *in situ* sea surface temperature (collected by buoy at 30 cm). An attempt to correct the mentioned error estimations suggested and discussed.

Keywords: Sea surface temperature; Upwelling; MODIS

1 Introdução

O conhecimento preciso da temperatura da superfície do mar (TSM) é de fundamental importância no bom desempenho de modelos climáticos e de previsão numérica de tempo, onde a TSM é considerada tanto como condições iniciais, como uma das condições de contorno. Valores de TSM com precisão de $\pm 0,2$ K são necessários para estimar o balanço de calor do oceano superior com a precisão de 10 W/m^2 (Fairall *et al.*, 1996).

No passado, o campo da temperatura da superfície do mar era composto somente pela denominada temperatura bulk (TSM_{bulk}), medida na camada de mistura oceânica, representada pelos primeiros 10 metros de profundidade, por termistores instalados em navios e/ou boias. Essas antigas medidas de TSM_{bulk} , além das suas descontinuidades temporais e espaciais, não seguiam nenhum padrão de coleta quanto à profundidade, e não eram acompanhadas de outras medidas simultâneas como a velocidade do vento à superfície, o que permite como hoje, estabelecer a relação entre a TSM_{bulk} e a TSM_{skin} (temperatura da pele da superfície do mar, medida por radiômetros infravermelhos). Esta última temperatura, medida em escala global por satélites, é de primordial importância na determinação do campo de fluxo de calor em toda a superfície marítima.

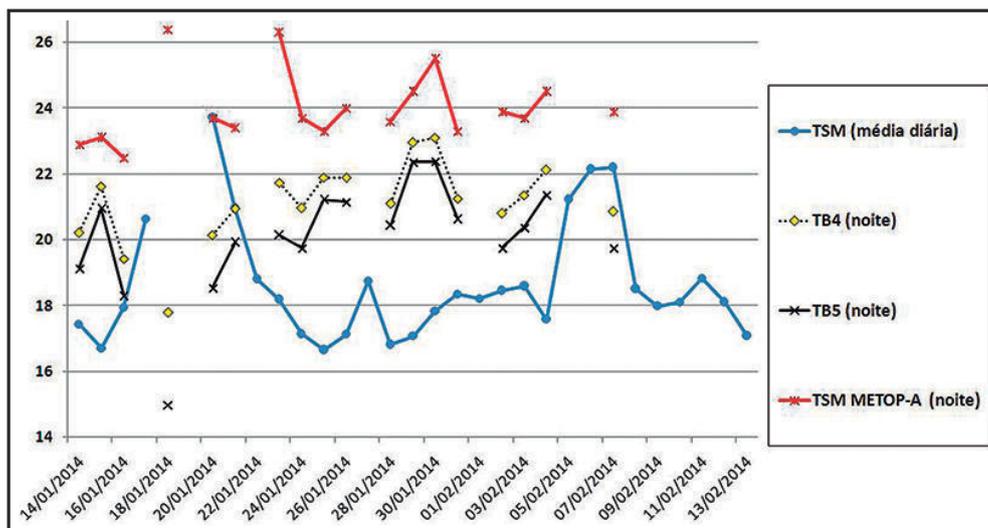
Atualmente, o sensoriamento remoto orbital preenche as lacunas das descontinuidades mencionadas e disponibiliza regularmente dados com alta resolução temporal, permitindo a estimativa global diária da TSM. Esta estimativa, quando obtida por sensores no infravermelho, representa a TSM_{skin} mencionada acima e é referente a uma camada de cerca de $500 \mu\text{m}$ de profundidade. A TSM_{skin} é estimada atualmente por algoritmos operacionais baseados em dois ou mais canais espectrais denominados de Multi-Channel Sea Surface Temperature (MCSST), proposto por Anding & Kauth (1970) e testado inicialmente por Prabhakara *et al.*, (1974), tendo sido seguido por diversos outros trabalhos até o presente (Deschamps & Phulpin, 1980; Llewellyn-Jones *et al.*, 1984 & MacClain *et al.*, 1985). Esses algoritmos estimam a TSM_{skin} através de curva de mínimos quadrados entre dados de TSM in situ obti-

dos via boias (ancoradas ou de deriva) e temperaturas de brilho dos canais termais dos sensores a bordo das plataformas orbitais.

A principal limitação do MCSST e dos sensores infravermelhos é com relação à cobertura de nuvens. Por essa razão, recentemente, criou-se a técnica de fusão de dados de sensores orbitais de micro-ondas passivos e termais (França *et al.*, 2013; Wentz *et al.*, 2000; Reynolds & Smith, 1994; Wick *et al.*, 2005), uma vez que a radiação em micro-ondas emitida pela superfície do mar não sofre atenuação significativa pelas nuvens em geral. A TSM-micro-onda (TSM_{subskin}) que representa a temperatura da sub-pele da superfície do mar (à profundidade de aproximadamente 1 mm) (Donlon *et al.*, 2002) é estimada por modelo geofísico por diferentes frequência e polarizações e é baseado no método proposto por Waters *et al.*, (1975). Neste contexto, embora a validação da análise da TSM produzida atualmente seja de alta precisão na região das águas profundas (França *et al.*, 2013), na região das águas costeiras ainda há desafios em várias partes do globo, em especial naquelas onde ocorrem o fenômeno da ressurgência, onde quase sempre a TSM é mal estimada. Por exemplo, durante o período de janeiro a março de 2014, observou-se forte viés na estimativa de TSM_{skin} dos algoritmos tradicionais em relação a TSM_{bulk} mediada pela boia do Programa Nacional de Boias (PNBOIA) em Cabo Frio, localizada próxima à costa do Estado do Rio de Janeiro. Na Figura 1, são apresentadas comparações entre a TSM_{bulk} tomada in situ (TSM_{boia}) obtida via boia Cabo Frio (BCF) e TSM (MCSST) utilizando dados do satélite dos sensores infravermelhos do METOP-A, que é um dos três satélites do programa EUMETSAT Polar System (EPS), lançado em 19 de outubro de 2006. Observa-se que, com exceção dos períodos em que não ocorre a ressurgência, ou melhor, quando na Figura 1 a TSM da boia é maior do que 22°C , os resultados do algoritmo de TSM superestimaram significativamente a TSM medida pela boia, chegando a ser superior a 4°C .

Dessa forma, esse trabalho pretende analisar as causas dos erros dos algoritmos e de que forma esses erros de estimativa se relacionam às variáveis atmosféricas e oceânicas durante a ocorrência do fenômeno da ressurgência na região da BCF.

Figura 1 Comparação da TSM_{bulk} medida na boia CABO FRIO e a estimativa MCSST (TSM_{skin}) utilizando dados do satélite METOP-A do programa EUMETSAT Polar System (EPS), para o período de 01/14/14 a 02/13/14. TB4 e TB5 são respectivamente as temperaturas de brilho dos canais 4 e 5 canais com 11 μm e 12 μm de comprimento de onda, respectivamente.



2 Dados

Para este estudo, foram utilizadas como fontes de dados, a BCF e sensores orbitais, a saber: 1) A BCF, boia do PNBOIA, localizada em águas costeiras, próxima ao município de Cabo Frio; e 2) estimativas de TSM obtidas utilizando os sensores infravermelhos MODIS a bordo das plataformas Terra e Aqua.

2.1 Dados da Boia Cabo Frio

A BCF (Argos ID: 69009), é a fonte base de dados do trabalho em questão e trata-se de uma boia meteo-oceanográfica modelo *Wave Scan* posicionada nas coordenadas 22° 59,62' de latitude sul; e 042° 11,65' de longitude oeste, ou seja, cerca de 10 km à oeste da Ilha do Cabo Frio, e aproximadamente 5 km do litoral mais próximo em Arraial do Cabo. A boia foi instalada pelo Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) e entrou em operação em 1 de agosto de 2013. Os dados encontram-se disponíveis no endereço eletrônico Programa Nacional de Boias (PNBOIA) (<http://www.goosbrasil.org/pnboia/>). Os dados da BCF incluem os seguintes parâmetros atmosféricos, medidos a 3 metros da superfície do mar: temperatura do ar (T_{ar} em Celsius), irradiância global (W/m^2), direção (magnética) do vento ($^\circ$), intensidade da rajada de vento (m/s), intensidade do vento (m/s) e pressão atmosférica (hPa). Abaixo

do nível do mar os seguintes registros são feitos: temperatura da superfície do mar (TSM_{boia}) a 30cm de profundidade (em Celsius) e ainda temperatura do mar em 5, 10, 15, 20, 25, 35 e 45 metros de profundidade, também em Celsius. Os dados da BCF foram completados com dados horários da umidade relativa da estação meteorológica de Arraial do Cabo, devido à necessidade desta variável nos cálculos dos fluxos turbulentos de calor sobre a BCF. A direção do vento foi convertida para ao referencial do norte verdadeiro (geográfico) considerando a declinação magnética de 22,53° oeste para efeito de comparação com dados antigos. Ou seja, os valores medidos na BCF foram subtraídos da declinação magnética.

2.2 Dados do Sensor MODIS

O radiômetro MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua, possui 36 bandas espectrais para estudos de uso do solo, nuvens, aerossóis, cor da água (oceanos e lagos), vapor d'água, temperatura da superfície continental e do mar, temperatura da atmosfera, propriedades e altitude das nuvens e ozônio. Os algoritmos de estimativa de TSM aplicada neste trabalho utilizam-se das bandas termais 22, 23, 31 e 32 que possuem, respectivamente, intervalos espectrais entre 3,929-3,989, 4,020-4,080, 10,780-11,280 e 11,770-12,270 μm , resumindo-se em dois produtos MODIS distintos, o SST e o SST4 (Brown & Minnett, 1999) (equações 1 e 2), sendo que, o primeiro

algoritmo (SST), é aplicado nos períodos diurno e noturno das passagens dos satélites Terra e Aqua, enquanto o segundo algoritmo (SST4), é somente aplicado no período noturno das passagens dos satélites. Os coeficientes A1, A2, A3 e A4 de cada uma das equações são diferentes e podem ser derivados de regressão, comparando os valores do sensor infravermelho com os valores já validados de outros sensores infravermelhos a bordo de satélite ou com medidas feitas em boias ou navios. T_{sfc} é a temperatura referente à climatologia esperada para o local de medida. T_{11} , T_{12} , $T_{3,9}$ e $T_{4,0}$ são as temperaturas de brilho dos canais centrados em 11; 12; 3,9 e 4,0 μm , e θ é o ângulo azimutal.

$$\text{SST} = A1 + A2 * T_{11} + A3 * (T_{11} - T_{12}) * T_{sfc} + A4 * (\sec(\theta) - 1) * (T_{11} - T_{12}) \quad (1)$$

$$\text{SST4} = A1 + A2 * T_{3,9} + A3 * (T_{3,9} - T_{4,0}) + A4 * (\sec(\theta) - 1) \quad (2)$$

3 Área de Estudo

O município de Cabo Frio está localizado na costa nordeste do Estado do Rio de Janeiro (latitude 23°S), onde a plataforma continental sofre um es-

treitamento com forte gradiente batimétrico sendo a geografia marcada pela mudança brusca de direção da costa brasileira, de N-S para NE-SW. A região sofre forte influência de um fenômeno conhecido por ressurgência, que se manifesta com maior intensidade nesse ponto da costa brasileira e que causa o esfriamento da coluna de água por dezenas de milhares de quilômetros quadrados (Lorenzetti & Gaeta, 1996), conforme apresentado na Figura 2, onde as manchas em tons verdes e amarelos, a partir do litoral, representam as águas afloradas, bem mais frias que seu entorno com tons vermelhos.

4 Metodologia

A metodologia utilizada nesse estudo foi descrita em quatro partes detalhadas, a saber:

- i) Selecionam-se as passagens dos satélites Terra e Aqua no período de 1 de janeiro de 2014 a 31 de janeiro de 2015, cujo pixel sob a BCF não está contaminado por nuvem. O critério aqui usado, para passagens diurnas, é análise do comportamento da irradiância global registrada na

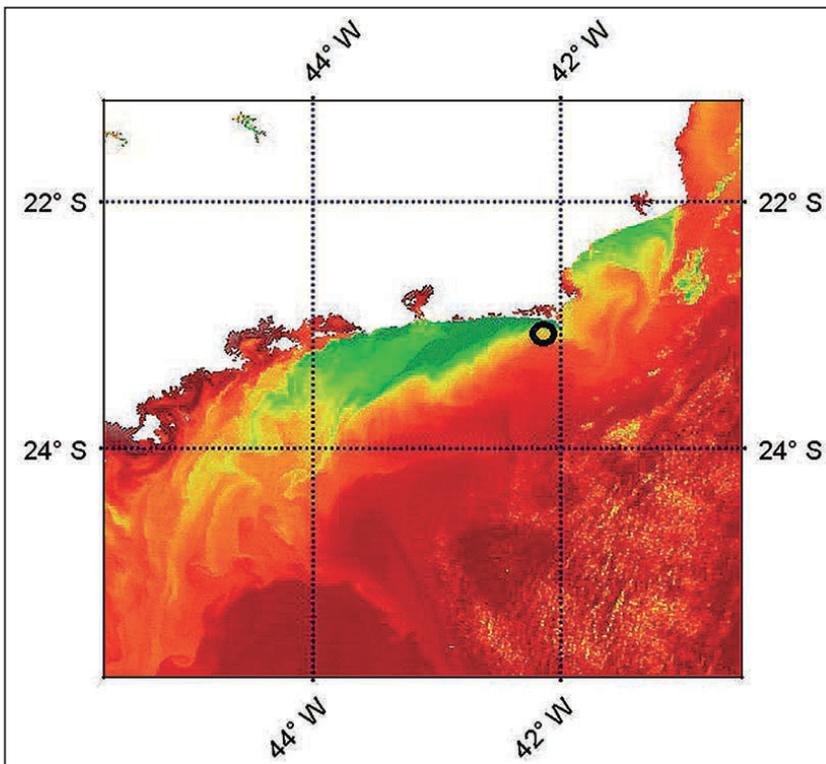


Figura 2 Imagem da TSM_{MODIS} referente ao satélite Aqua de resolução espacial de 1 km, obtida às 16:43Z, em 10 de fevereiro de 2014. Um círculo negro representa a localização da boia Cabo Frio.

BCF conjuntamente com a inspeção visual das imagens MODIS (aplicando a técnica de contraste) na região estudada, e para passagens noturnas, apenas a inspeção visual mencionada;

- ii) Constrói-se registros dos horários/datas das passagens (diurna e noturna) de TSM_{MODIS} , TSM_{boia} , erro ($TSM_{MODIS} - TSM_{boia}$), contraste, aqui definido como T_{ar} menos TSM_{boia} ($T_{ar} - TSM_{boia}$), vento (direção e intensidade) e demais dados registrados pela BCF conforme descritos em item 2.1;
- iii) Calcula-se, usando o algoritmo COARE 3.0, proposto e desenvolvido para regiões equatoriais por Fairall *et al.* (1996, 2003), os fluxos turbulentos de calor e estes são incorporados aos registros em ii; e,
- iiii) Avaliam-se os erros ($TSM_{MODIS} - TSM_{boia}$) versus variáveis medidas e calculadas nos itens ii e iii.

5 Resultados

Estes são divididos em duas partes, onde na primeira realiza-se uma análise do comportamento temporal das variáveis TSM_{boia} , T_{ar} , ($T_{ar} - TSM_{boia}$), TSM a 10 metros (TSM_{10}), e fluxos de turbulentos de calor latente (H_l) e sensível (H_s) para ano 2014 e a segunda refere-se a análise dos erros ($TSM_{MODIS} - TSM_{boia}$) conforme o passo metodológico iv.

Para a análise foram selecionadas 631 passagens dos satélites Terra e Aqua, sobre a região da BCF, distribuídas por todos os meses de 2014, obedecendo ao critério de seleção quanto à contaminação de nuvens.

5.1 Eventos de Ressurgência Segundo a Interpretação dos Dados da Boia Cabo Frio

5.1.1 Temperatura do Ar (T_{ar}) e Temperatura da Superfície (TSM_{boia})

A característica fundamental da região marítima de Cabo Frio sempre foi o registro de valores baixos de TSM_{bulk} em comparação a outras regiões

costeiras do Brasil (Coe *et al.*, 2007), além disso os dados da BCF mostram que o valor quase sempre maior de T_{ar} em relação a TSM_{boia} é um fator importante a se considerar. Como se pode observar na Figura 3, o contraste ($T_{ar} - TSM_{boia}$), alcança seus maiores valores nos períodos do ano característicos da ocorrência da ressurgência, ou seja, nos meses de verão e primavera (Mächel *et al.*, 1998; Rodrigues & Lorenzetti, 2001).

Observa-se na Figura 3, que há três períodos distintos com relação ao comportamento do contraste. O primeiro período, nos meses de janeiro a março, o contraste é quase sempre positivo e de alto valor absoluto. No segundo período, nos meses de abril a agosto, o contraste equilibra-se entre valores positivos e negativos, porém com valores absolutos relativamente menores. Já em um terceiro período entre os meses de setembro a dezembro de 2014, o contraste apresenta grande variabilidade, transitando entre valores positivos e negativos, com valores absolutos relativamente altos. Em geral, os maiores valores do contraste coincidem com os períodos de ressurgência.

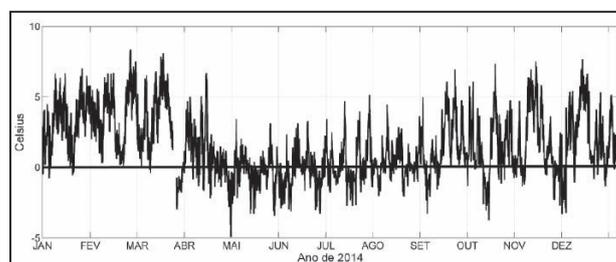


Figura 3 Medições horárias do contraste ($T_{ar} - TSM_{boia}$) da boia Cabo Frio para o ano de 2014.

5.1.2 Temperatura do Mar na Superfície (TSM_{boia}) e a 10 metros de Profundidade (TSM_{10})

A literatura define a ressurgência quando as águas mais profundas e frias são deslocadas para a superfície, desfazendo, assim, a estratificação natural causada pelo aquecimento solar (Allard, 1955). Considerando as características do fenômeno da ressurgência, frequentes na região de estudo, conhecer essas temperaturas medidas em profundidade ajudam a identificar o momento e a intensidade da

ocorrência dos fenômenos, visto que nos momentos de ressurgência, a tendência é que a estratificação vertical e natural da temperatura na coluna d'água seja bastante reduzida e em temperaturas abaixo dos 20°C. Na Figura 4, estão traçadas as médias diárias de T_{ar} , TSM_{boia} e TSM_{10} , onde se pode observar o comportamento dessas três temperaturas no decorrer do período dos dados.

Considerando que a proximidade das curvas de TSM_{boia} e TSM_{10} em temperaturas menores que 20°C, significa a ocorrência de ressurgência, dentro dos três períodos observados no comportamento do contraste, podemos observar, pelo menos, dois comportamentos distintos entre as TSM_{boia} e TSM_{10} . No primeiro período de janeiro a março de 2014, quando o fenômeno da ressurgência é frequente, ocorrem diversos descolamentos da curva da TSM_{boia} no sentido de aquecimento, acompanhando o aquecimento do ar. Já no período de setembro a dezembro, o descolamento da TSM_{boia} em relação à TSM_{10} , quase não ocorre.

A proximidade da TSM_{boia} e TSM_{10} também significa ausência de estratificação de temperatura no intervalo de 0 a 10 metros de profundidade. Sendo assim, conforme a ressurgência começa a se formar essas temperaturas tendem a se aproximar em temperaturas abaixo dos 20°C. O afastamento, em parte, significa que a ressurgência perdeu força ou que a incidência da radiação solar está sendo capaz de aquecer as camadas mais superficiais.

No período de janeiro a meados de março, a TSM_{10} permaneceu quase sempre entre as temperaturas de 16 a 18°C. Esse comportamento difere

dos períodos de primavera, quando a TSM_{10} , varia com intensidade, quase sempre com valores próximos a TSM_{boia} .

5.1.3 Os Fluxos Turbulentos de Calor

Com base no algoritmo COARE 3.0, proposto e desenvolvido para regiões equatoriais por Fairall *et al.* (1996, 2003), foram calculados os fluxos de calor sensível e latente usando a TSM_{boia} para o período dos dados, conforme Figura 5.

Da mesma forma que na análise anterior das medidas de temperatura, percebem-se três comportamentos distintos para o conjunto dos fluxos turbulentos de calor no decorrer do ano de 2014. Nos três primeiros meses do ano, os fluxos de calor sensível (H_s) e latente (H_l), são positivos e de valores elevados. Nos meses seguintes, no outono e inverno, os fluxos de calor sensível são frequentemente negativos e de magnitude relativamente baixa. Nesse mesmo período, os H_l são quase que na totalidade negativos e de magnitude elevadas. Finalmente, nos meses de primavera, os fluxos retornam às feições do verão, porém com valores absolutos de H_l bem maiores.

5.2 Análise do Erro Significativo na TSM_{MODIS}

Para fins da análise discorrida nesta seção, baseando-se em Legeckis & Zhu (1998), onde algoritmos MCSST possuem uma precisão global da ordem de 0,5°C, define-se para efeitos deste trabalho, como erro significativo, quando a diferença $TSM_{MODIS} - TSM_{boia} \geq 0,8^\circ C$. Aplicando o critério de

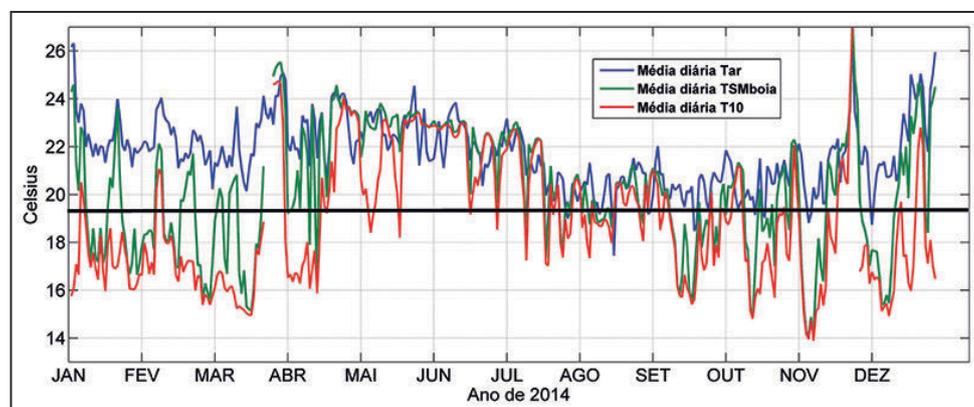


Figura 4 Médias diárias da temperatura do ar (T_{ar}) em azul, temperatura da superfície (TSM_{boia}) em vermelho, temperatura a dez metros de profundidade (TSM_{10}) em verde, no decorrer do ano de 2014. A linha horizontal em negro traça à temperatura de 20°C é indicadora do fenômeno da ressurgência.

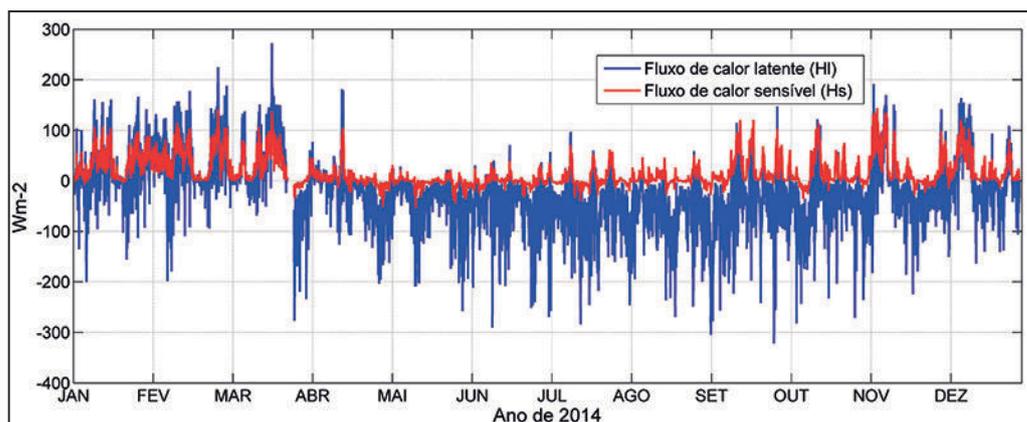


Figura 5 Fluxos turbulentos de calor sensível (H_s) e latente (H_l) no decorrer do ano de 2014 na boia Cabo Frio.

detecção de pixels não contaminados por nuvens em 4.ii, 631 estimativas de TSM_{MODIS} foram selecionadas para o período dos dados. Na Tabela 1 é apresentada a distribuição das passagens selecionadas para cada mês de 2014. Em seguida, os dados da BCF foram interpolados no tempo para os horários de cada uma das passagens e então se formou o banco de registro, conforme descrito em 4.ii e 4.iii.

Duas abordagens na análise e comparação dos dados da boia e dos satélites foram consideradas na tentativa de melhor compreender a relação da ressurgência com os erros. A primeira abordagem foi a observação das variáveis do banco de dados que contém os erros na ordem cronológica dos acontecimentos. A segunda abordagem foi a observação e a análise dos dados na ordem crescente dos erros. Ambas as abordagens se complementam na compreensão.

Sendo assim, a Figura 6 apresenta os erros, significativos ou não, na ordem cronológica das passagens dos satélites que foram coletadas e aproveitadas em função das melhores condições de nuvens. Apesar de não cobrir homogêneo os meses de 2014 (Tabela 1), ou seja, de não conter dados de todos os dias do ano e de também não haver o mesmo número de passagens para cada mês, pode-se observar que a Figura 6 guarda relação razoável com variáveis já analisadas, assim como a TSM_{boia} , o contraste e o fluxo de calor sensível (H_s).

Nas primeiras 159 passagens que abrangem os meses de janeiro e fevereiro, justamente quando os casos de ressurgência são mais frequentes, os erros são positivos e altos. Por outro lado, nos meses

de maio a agosto, entre as passagens de número 259 a 514, os erros positivos são normalmente menores que um.

A análise do último trimestre do ano de 2014 ficou bastante deficiente em função da pouca quantidade de passagens aproveitáveis.

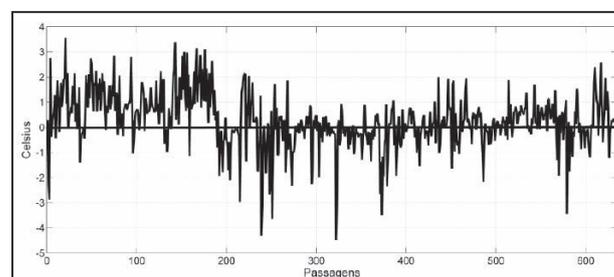


Figura 6 Erros relacionados na ordem cronológica das passagens dos satélites.

Mês	Passagens	Mês	Passagens
Janeiro	1-85	Julho	416-434
Fevereiro	86-159	Agosto	435-514
Março	160-215	Setembro	515-548
Abril	216-294	Outubro	549-611
Maio	295-350	Novembro	612-615
Junho	351-415	Dezembro	616-631

Tabela 1 Distribuição das passagens-satélite, selecionadas considerando o critério de detecção de pixel contaminado por nuvens, por mês de 2014.

Na Figura 7 são apresentados os erros em ordem crescente. Verifica-se que, dos 631 casos selecionados, 250 apresentaram erros menores ou iguais a zero que são aqui atribuídos aos casos em que o critério para detecção de pixels contaminados por nuvens falhou e assim não serão analisados. Restando, assim, 381 casos em que os erros são maiores que zero.

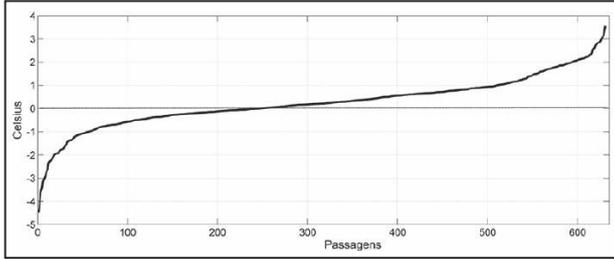


Figura 7 Erros referentes às 631 passagens-satélite, dispostos em ordem crescente.

A distribuição dos erros, conforme a Figura 8 é normal e levemente assimétrica, tendendo para os erros positivos, com destaque na concentração de valores aqui definidos como significativos, isto é, $TSM_{MODIS} - TSM_{boia} \geq 0,8^{\circ}C$.

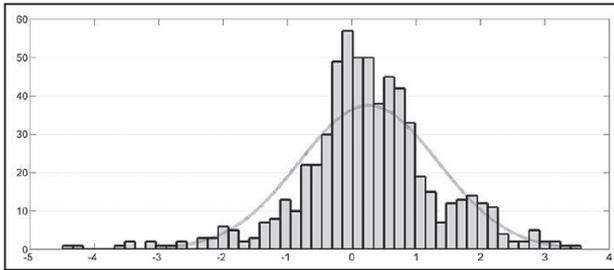


Figura 8 Distribuição dos erros e a curva normal de distribuição.

5.3 Erros Versus Contraste e Fluxos Turbulentos

A Figura 9 mostra o comportamento da T_{ar} e TSM_{boia} em ordem crescente dos erros para as passagens selecionadas dos satélites, e se percebe o franco afastamento das curvas na medida em que o valor do erro positivo aumenta. Observa-se também na Figura 10 que o erro positivo é fortemente correlacionado com o contraste ($T_{ar} - TSM_{boia}$).

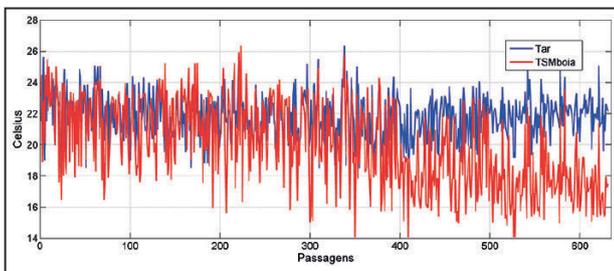


Figura 9 Temperatura do ar (T_{ar}) da superfície (TSM_{boia}) conforme a ordem crescente dos erros.

Com relação aos fluxos turbulentos de calor (Figura 11), podemos observar que, para os erros

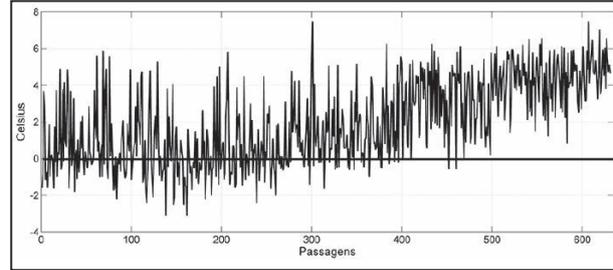


Figura 10 Valor da diferença T_{ar} menos TSM_{boia} (contraste) correspondente a cada erro, conforme a ordem crescente dos erros.

negativos (passagens de 1 a 250) os fluxos de calor sensível (H_s), são normalmente positivos no intervalo de 0 a $50W/m^2$, enquanto que os fluxos de calor latente (H_l) são normalmente negativos e com maior variabilidade de valor, atingindo em algumas ocasiões, valores entorno de $-250W/m^2$. Na medida em que os valores dos erros positivos aumentam, ambos os fluxos tendem a valores positivos, indicando a transferência de energia da atmosfera para o oceano.

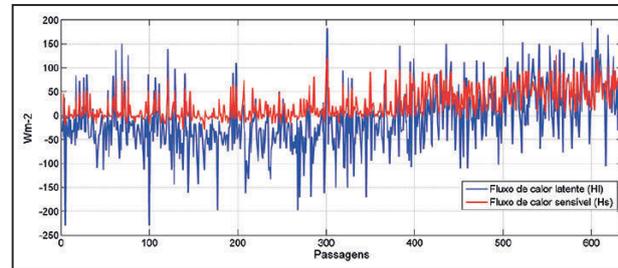


Figura 11 Fluxos turbulentos de calor latente e sensível dispostos na ordem crescente dos erros.

Observando os erros aqui definido como significativos, isto é, aqueles que $TSM_{MODIS} - TSM_{boia} \geq 0,8^{\circ}C$, 116 eventos são selecionados como sendo eventos que o algoritmo de estimativa de TSM_{MODIS} , usando obviamente os dados MODIS, falhou. Talvez, a principal causa seja que o banco de dados utilizado para construção dos coeficientes de regressão dos algoritmos de TSM que não incluem dados das condições atmosféricas locais, para os períodos de eventos de ressurgência. A questão é: Como resolver o problema? Na seção seguinte é apresentada uma alternativa de correção da estimativa de TSM_{MODIS} quando o evento de ressurgência ocorre.

6 Correção

O fato dos erros positivos ocorrerem em determinadas épocas do ano e de também estarem di-

retamente relacionados ao contraste e também aos valores dos fluxos turbulentos, suscita a possibilidade de haver uma regra de correlação entre as TSM_{MODIS} e as TSM_{boia} , que possa ser aplicada para melhorar as estimativas.

Estabelecer uma correlação entre a correção para a TSM_{MODIS} , com alguma das variáveis anteriormente analisadas (contraste, H_1 e H_s), parece não ser tão fácil, porque apesar de haver relação entre o erro e as variáveis, estas oscilam com grande amplitude, o que traria muita incerteza para a correção.

Resta então a alternativa de relacionar diretamente a TSM_{MODIS} e a TSM_{boia} , a exemplo do que é feito no ajuste dos MCSST e outros algoritmos, para as condições de ressurgência na região em estudo.

A correção que se busca, será baseada em uma equação originária de uma regressão linear simples entre TSM_{MODIS} e TSM_{boia} (interpolada no horário do satélite), para o intervalo de erros significativos (maior do que $0,8^\circ\text{C}$), excetuando, o produto SST, para o período noturno, por ter um produto análogo de melhores resultados (SST4). Sendo assim, diante de todo conjunto de 631 passagens satélites, restam 116 passagens aproveitáveis, para regressão linear.

Com os dados selecionados gerou-se então o gráfico da Figura 12 e a Equação 3.

$$TSM_{corrigida} = TSM_{MODIS} * 0,9476 - 0,4157 \quad (3)$$

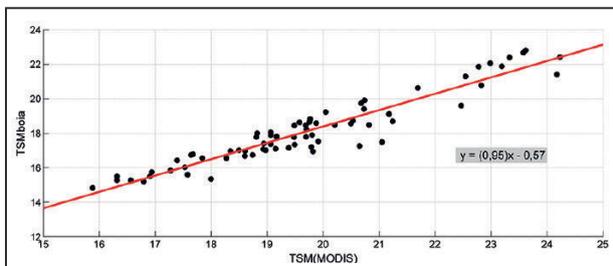


Figura 12 Gráfico de dispersão entre TSM_{boia} e TSM_{MODIS} dos dados do ano base (2014), para os erros $> 0,8$, tendo sido excluído os produtos SST noturnos.

Os dados da Figura 12 apresentaram coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9303 e a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) igual a 0,5711, o que demonstra excelente correlação entre os dados com afastamento relativamente pequeno ao valor ao redor da reta de regressão.

Para testar a eficiência da equação de correção, a mesma foi aplicada aos casos do mês de janeiro de 2015 (Figura 13), em 46 passagens selecionadas em que os erros são maiores que $0,8^\circ\text{C}$.

Comparando os resultados da boia e as estimativas dos satélites (Figura 13), antes da correção (TSM_{boia}), temos que a soma dos erros é igual a 63,24 e o erro médio é igual a 1,37.

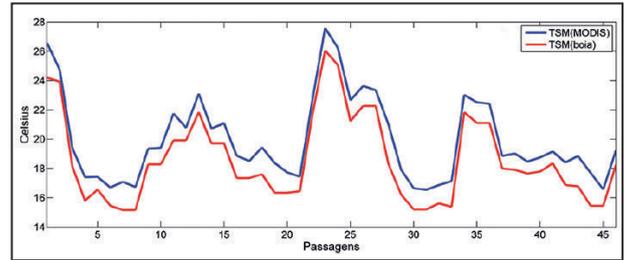


Figura 13 TSM_{MODIS} e TSM_{boia} do mês de janeiro de 2015. Em ordem cronológica, somente os casos em que Erro $> 0,8$.

Após a correção (Figura 14), comparando os resultados da boia com a TSM corrigida, temos que a soma dos erros é igual a 3,97 e o erro médio é igual a 0,09.

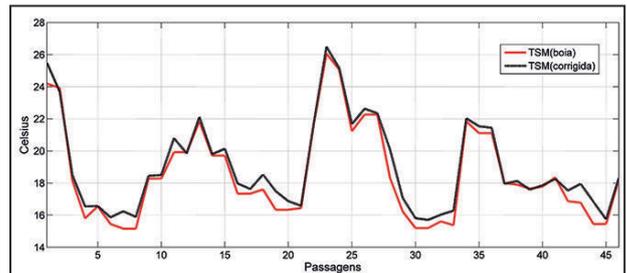


Figura 14 TSM_{boia} e $TSM_{corrigida}$ no mês de janeiro de 2015. Em ordem cronológica, somente os casos em que Erro $> 0,8$.

7 Conclusão

Neste trabalho, analisaram-se os erros significativos (maiores que $0,8^\circ\text{C}$) do algoritmo de TSM, utilizando dados do sensor MODIS, quando comparados a TSM da BCF, durante os eventos de ressurgência e não ressurgência no ano de 2014. As principais conclusões são as seguintes:

É bem provável que a ocorrência sistemática de valores de TSM_{skin} bem maiores que as medidas *in situ* pela BCF (erro positivo) estejam relacionados às condições climáticas da região da boia. É o que se pode observar comparando os resultados de H_1 , H_s , TSM_{boia} e contraste ao longo do período de dados analisado.

Os valores elevados e positivos dos fluxos turbulentos de calor, justo nos períodos (ressurgência) de maior ocorrência dessas majorações, são um forte indicativo da relação. No entanto, os fluxos de calor carecem na representação, porque, na falta de dados adequados para o cálculo, a TSM_{bulk} , foi usada no lugar da temperatura mais representativa que seria a TSM_{skin} e a variável umidade relativa empregada no cálculo de H_1 é proveniente da estação meteorológica mais próxima à BCF. Mesmo assim, observa-se que há relação dos fluxos com os períodos de maior ocorrência dos erros positivos.

A relação direta dos fluxos turbulentos de calor e do contraste com os erros positivos reforça a possibilidade de haver uma correção possível para toda a área atingida pelas águas mais frias da ressurgência, tendo em vista que, de forma pontual, foram obtidos excelentes resultados por meio uma simples regressão linear, envolvendo a TSM_{skin} e TSM_{boia} .

Sendo assim, compreendendo melhor a variação da TSM ao longo da região de ressurgência, seria possível estender, em um próximo passo, a correção para toda região afetada pela ressurgência.

8 Referências

- Allard, P. 1955. Anomalies dans les températures de l'eau de mer observées au Cabo Frio au Brésil. Bulletin d'Information Comité Central d'Océanographie et d'Étude des Côtes, 7(2): 58-63.
- Anding, D. & Kauth, R. 1970. Estimation of sea surface temperature from space. *Remote Sensing of Environment*, 1: 217-220.
- Brown, O.B. & Minnett, P.J. 1999. MODIS Infrared Sea Surface Temperature Algorithm. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 2.0. ATBD-MOD-25. University of Miami, Miami, FL 33149-1098, 98p.
- Coe, H.H.G.; Carvalho, C.N.; Souza, L.O.F. & Soares, A. 2007. Peculiaridades ecológicas da região de Cabo Frio, RJ. *Revista Tamoios*, 2.
- Deschamps, P.Y. & Pulphin, T. 1980. Atmospheric Correction of infrared measurements of sea temperature using channels at 3.7, 7.11 e 12 μ m. *Boundary-Layer Meteorology*, 18: 131-143.
- Donlon, C.J.; Minnett, P.J.; Gentemann, C.; Nightingale, T.J.; Barton, I.J.; Ward, B. & Murray, M.J. 2002. Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. *Journal of Climate*, 15: 353-369.
- Fairall, C.W.; Bradley, E.F.; Godfrey, J.S.; Wick, G.A.; Edson, J.B. & Young, G.S. 1996. Cool-skin and warm-layer effects on sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, 101:1295-1308.
- Fairall, C.W. & Bradley, E.F. 2003. Bulk parameterization of air-sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm. *Journal of Climate*, 16: 571-591.
- França, G.B.; Paes, R.C.O.V.; Oliveira, A.N.; Ruivo, B.C.; & Sartori Neto, A. 2013. Daily blended microwave and infrared sea surface temperature composition. *Revista Brasileira de Geofísica*, 31: 317-328.
- Wick, G.A.; Ohlmann, J.C.; Fairall, C.W.; & Jessup, A.T. 2005. Improved oceanic cool-skin corrections using a refined solar penetration model. *Journal of Physical Oceanography*, 35: 1986-1996.
- Legeckis, R. & Zhu, T. 1997. Sea Surface Temperature from the GOES- geostationary satellite, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 9: 1971-1983.
- Llewellyn-Jones, D. T.; Minnett, P.J.; Saunders, R.W & Zavadz, A.M. 1984. Satellite multichannel infrared measurements of sea-surface temperature of the N.E. Atlantic Ocean using AVHRR/2. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 110: 613-631.
- Lorenzetti, J.A. & Gaeta, S.A. 1996. The Cape Frio upwelling effect over the South Brazil Bight northern sector shelf waters: a study using AVHRR images. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, Vienna, 1996. p. 448-453.
- Mächel, H.; Kapala, A. & Flohn, H. 1998. Behaviour of the centers of action above the Atlantic since 1881. Part I: Characteristics of seasonal and interannual variability. *International Journal of Climatology*, 18:1-22.
- McClain, E.P.; Pichel, W.G. & Walton, C.C. 1985. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 90: 1587-11601.
- Prabhakara, C.; Dalu, G. & Kunde, V.G. 1974. Estimation of surface temperature from remote sensing in the 11 to 13 μ m window region. *Journal of Geophysical Research*, 79: 5039-5045.
- Reynolds, R.W & Smith, T.M. 1994. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *Journal of Climate*, 7: 929-948.
- Rodrigues, R.R. & Lorenzetti, J.A. 2001. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling. *Continental Shelf Research*, 21:371-394.
- Waters, J.W.; Kunzi, K.F.; Pettyjohn, R.L.; Poon, R.K.L. & Staelin, D.H. 1975. Remote sensing of atmospheric temperature profiles with Nimbus-5 microwave spectrometer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32: 1953-1969.
- Wentz, F.J.; Gentemann, C.L.; Smith D.K. & Chelton, D.B. 2000. Satellite measurements of sea surface temperature through clouds. *Science*, 288(5467): 847-850.