

Validação da Temperatura da Superfície do Mar a partir de medições de satélite

Luis C. O. Carvalheiro⁽¹⁾, Sergio de Oliveira Bernardo⁽¹⁾, Pedro Daniel Costa⁽¹⁾, Maria Dolores J. M. Orgaz⁽¹⁾, Yoshihiro Yamasaki⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Física, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal. ⁽²⁾ Universidade Federal de Pelotas, Brasil

lcarvalheiro@ua.pt; sob@ua.pt; pedrodanielcosta@ua.pt; maria.dolores@ua.pt; yamasaki@fis.ua.pt

Introdução

A temperatura da superfície do mar (TSM) desempenha um papel preponderante na determinação do tempo e do clima global, pois é responsável pela troca de calor entre o oceano e a atmosfera, sendo que o seu gradiente horizontal se relaciona com os processos de trocas oceânicas internas, dando origem às correntes marítimas. Adicionalmente, desempenha um papel importante como dado de entrada no processo de inicialização de modelos numéricos de previsão tempo, clima e circulação oceânica, propiciando um melhor refinamento nos resultados de previsão e consequente contribuição para um melhor entendimento na dinâmica oceânica e atmosférica.

O instrumento AVHRR/3 (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), a bordo dos satélites da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17 e NOAA-18, é um radiómetro de varrimento que detecta energia proveniente do solo, do oceano e da atmosfera com seis bandas¹ situadas nas regiões do visível e do infravermelho (próximo, médio e térmico) do espectro electromagnético (Goodrum et al., 2000).

Nas bandas do infravermelho térmico, a radiação captada, pode, por sua vez, ser convertida em temperatura de brilho.

A utilização deste tipo de instrumentos para fins de determinação da TSM remonta à década de 70 do século XX, muito embora só com o lançamento do satélite NOAA-7, em 1981, se tenha dado início à determinação da TSM sob o ponto de vista operacional (McClain et al., 1985).

Actualmente, os dados obtidos pelos sensores AVHRR têm possibilitado inúmeras aplicações (Hochleitner, 2007; Emery et al., 2001; Oliveira, 2001; Araujo, 1997; Cheng, 2001) e constituem uma fonte para obtenção de dados de temperatura de superfície, tanto de regiões continentais como oceânicas, pois, dada a sua resolução espacial e temporal, a par com as características da órbita do satélite, possibilitam

a cobertura de áreas nem sempre abrangidas por estações convencionais ou bóias flutuantes.

Objectivos

Neste trabalho, pretende-se mostrar os procedimentos inerentes à aquisição e processamento dos dados AVHRR/NOAA, visando a obtenção de dados de TSM e consequentemente validar os resultados obtidos através de medidas reais de um sistema de bóia fixa, procedentes da rede de estações de medida dos *Puertos del Estado*, um órgão público afecto ao Ministério do Fomento Espanhol.

Dados e Metodologia

a) Dados de Satélite

Os dados brutos do sensor AVHRR foram obtidos a partir da estação de recepção de informação de satélite *High Resolution Picture Transmission* (HRPT) do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, em funcionamento operacional desde 23 de Maio de 2006, utilizando o software para extracção dos dados de AVHRR, gentilmente disponibilizado após comunicação pessoal com Peter Hollemans, da *Terrenus Earth Sciences*². Para este estudo foram utilizados dados dos satélites NOAA-17 e NOAA-18, no período compreendido entre 6 de Julho de 2007 e 31 de Agosto de 2007.

Após calibração radiométrica, foi calculada a TSM, segundo os algoritmos *non-linear split window* (NLSST_SPLIT) para imagens adquiridas durante o dia e *linear triple window* (Andy MCSST Triple), para imagens adquiridas em período nocturno. As equações dos algoritmos utilizados, bem como os respectivos coeficientes de calibração foram os constantes na página web do serviço de informações dos satélites NOAA.³

A máscara utilizada para a eliminação de pixeis da imagem ocupados por nuvens, baseou-se no esquema de processamento *Clouds from AVHRR* (CLAVR) (Stowe et al., 1999), que se baseia em um conjunto de testes (baseados em limiares

¹ Muito embora, em termos operacionais, sejam só disponibilizados cinco canais.

² <http://www.terrenus.ca>

³ <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/pubs/SST/noaa17sst.txt> e <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/pubs/SST/noaa18sst.txt>, respectivamente, para os satélites NOAA17 e NOAA18.

fixos) a que um pixel na imagem de satélite é sujeito para verificação de presença de nuvens. Desta forma, considerou-se um pixel livre de contaminação por nuvens, aquele em que o resultado de cada um dos testes individuais de detecção fosse falso.

Posteriormente, os dados foram sujeitos a uma reprojeção para uma grelha regular (na projecção de Mercator) de 1,1 km por pixel, obtendo-se um produto final similar ao mostrado na figura 1. O software de processamento utilizado consistiu nas *CoastWatch Utilities*⁴, disponibilizado por cortesia da *Terrenus Earth Sciences* e do Programa *NOAA CoastWatch*.

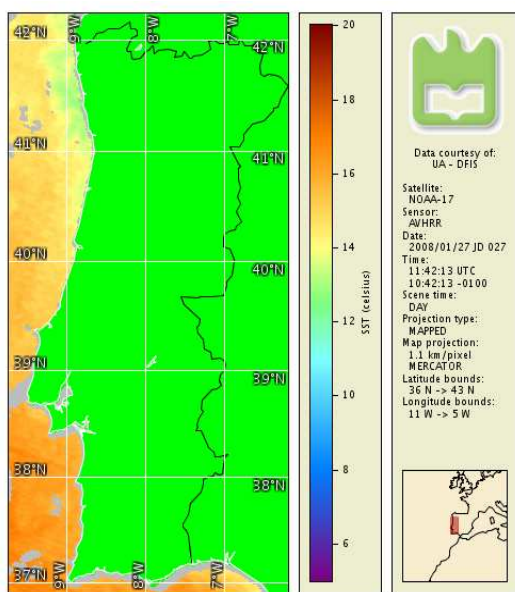


Figura 1 – Exemplo dos resultados finais do processamento dos dados AVHRR/NOAA com vista à obtenção do campo de temperatura da superfície do mar.

b) Dados das Redes de Medição dos *Puertos del Estado*

Para validação dos resultados, foram utilizados dados horários de temperatura da superfície do mar colectados pela bóia fixa de Cabo Silleiro (42.1215° N / 9.3945 °W), obtidos a partir da base de dados dos *Puertos del Estado*. Os dados de temperatura da água do mar utilizados foram coligidos a uma profundidade de 3 m sob a superfície livre.

c) Metodologia de validação

Com o intuito de garantir a coerência entre os dados obtidos por satélite e os dados reais, registados pela bóia, foram utilizados os valores horários de temperatura da superfície do mar mais próximos do horário de aquisição das

imagens de satélite, seleccionando apenas imagens livres de contaminação por nuvens, no ponto escolhido.

Posteriormente, foram construídos dois conjuntos de resultados: o primeiro, relativo aos valores de TSM determinados a partir dos dados do satélite NOAA-17 e respectivas medições efectuadas pela bóia; o segundo, fazendo uso dos valores da TSM determinados por intermédio dos dados colectados pelo satélite NOAA-18 e medições da bóia associadas.

Por último, e fazendo uso das duas fontes de dados, procedeu-se a um ajuste linear entre valores de TSM medidos pela bóia e os determinados a partir do processamento dos dados AVHRR, para os satélites supra-mencionados.

Como critérios estatísticos na validação, a fim de se avaliar o grau de ajuste entre os dados observados e estimados, foram quantificados os erros através das medidas do Erro Médio Quadrático (Root Mean Squared Error - RMSE), do Erro Absoluto Médio (Mean Absolute Error - MAE) e do desvio médio (MBE - Mean Bias Error) (Zacharias; Heatwole; Coakley, 1996). As medidas RMSE, MAE, MBE são expressas, respectivamente, por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - o_i|}{n} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)}{n} \quad (3)$$

Onde:

- p_i : é o valor *estimado* ou *previsto*;
- o_i : é o valor *observado* ou *medido*;
- n : número de observações.

O MBE indica o desvio médio dos valores previstos (estimados) em relação aos valores observados (medidos), enquanto que o RMSE mede a variação dos valores estimados ao redor dos valores medidos. Já o MAE indica o afastamento (desvio) médio absoluto dos valores previstos em relação aos valores observados. O ideal seria que os valores de MBE, MAE e de RMSE fossem o mais próximo de zero.

O índice de concordância (d) é uma medida do grau em que os dados estimados estão ou não livres de certos erros. Esse índice varia de 0 a 1, sendo que $d=1$ indica uma perfeita concordância entre os valores observados e os estimados, e

⁴ <http://coastwatch.noaa.gov>

$d=0$ significa total discordância (Willmott, 1981).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|p_i - \bar{p}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad (4)$$

onde \bar{o} e \bar{p} são as respectivas médias aritméticas dos valores observados e previstos (ou estimados).

Fazendo uso de outra forma adicional de quantificar os erros entre as medidas dos dados dos satélites e os dados da bóia, procurou-se calcular a anomalia normalizada percentual das TSMs, conforme a equação 5, onde cada medida ε representa o erro (afastamento) percentual entre o valor real medido *in situ* (bóia) e inferido por dados do satélite.

$$\varepsilon = 100\% \cdot \frac{(p_i - o_i)}{o_i} \quad (5)$$

Onde:

p_i : é o valor *estimado* ou *previsto*;
 o_i : é o valor *observado* ou *medido*;

Resultados obtidos

Na figura 2, podem observar-se as curvas de TSM obtidas a partir do sinal do satélite NOAA-17 e os valores observados. Na figura 3, é apresentada a anomalia normalizada percentual de TSM determinada a partir dos dados da bóia e do sinal do satélite NOAA-17. Os valores de TSM obtidos por dados do satélite NOAA-17, de forma geral, sobrestimaram os de TSM registados *in situ* (bóia). Salienta-se que, mesmo com valores sobrestimados, os dados apresentam qualidade significativa, com uma magnitude de erro inferior a 10% (em módulo) e respectivos erro médio (MBE), erro médio absoluto (MAE) e erro médio quadrático (RMSE) de 0.10 °C, 0.42°C e 0.54 °C.

Na figura 4, apresenta-se ainda a análise da regressão linear entre as TSM observada e determinada a partir do satélite NOAA-17, na qual se obteve um coeficiente de correlação (r) de 0.92 ($R^2 \approx 0.85$) e um índice de concordância (d) de 0.96, o que demonstra que os dados do satélite NOAA-17 se encontram em consonância com os valores observados.

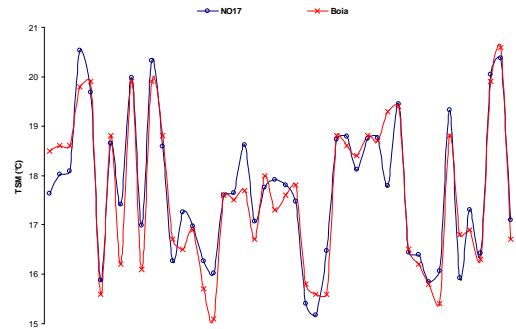


Figura 2 – Comparação entre os valores de TSM determinados por medições do satélite NOAA-17 e os dados observados de TSM.

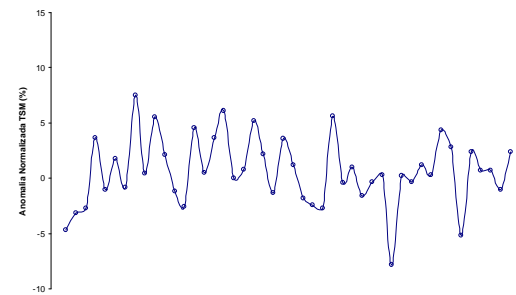


Figura 3 – Anomalia normalizada percentual de TSM determinada a partir dos dados da bóia e do satélite NOAA-17.

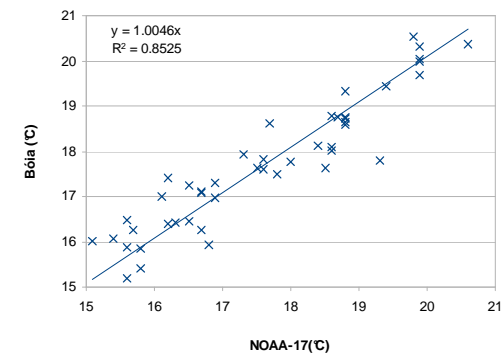


Figura 4 – Regressão linear entre as TSM observada (ordenadas) e determinada a partir do satélite NOAA-17 (abscissas).

No gráfico da figura 5, pode visualizar-se um tratamento análogo ao anteriormente descrito, mas para os dados obtidos por meio do satélite NOAA-18 e respectivos valores registados pela bóia. De igual modo, a figura 6 apresenta a anomalia normalizada percentual de TSM determinada a partir dos dados da bóia e do satélite NOAA-18. Verifica-se que, de um modo geral, também os valores de TSM obtidos por dados do satélite NOAA-18 sobrestimaram os de TSM obtidos *in situ* (bóia). Todavia, e em comparação com gráfico da figura 3, pode verificar-se que a magnitude de erro é ligeiramente maior, chegando a superar os 10%. Os respectivos erro médio (MBE), erro médio absoluto (MAE) e erro médio quadrático

(RMSE) obtidos foram de 0.84 °C, 0.12°C, 0.55°C e 0.69 °C.

Na figura 7, apresenta-se ainda a análise da regressão linear entre as TSM observada e determinada a partir do satélite NOAA-18, na qual se obteve um coeficiente de correlação (r) de 0.88 ($R^2 \approx 0.78$) e um índice de concordância (d) de 0.95.

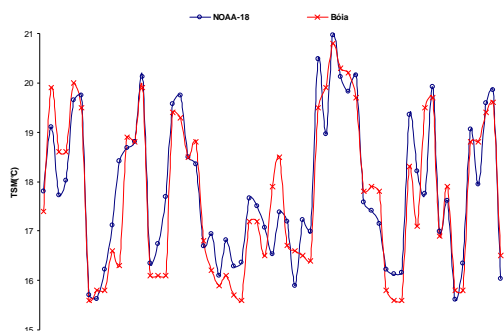


Figura 5 – Comparação entre os valores de TSM determinados por medições do satélite NOAA-18 e os dados observados de TSM.

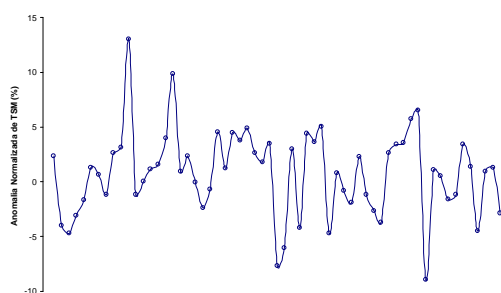


Figura 6 – Anomalia normalizada percentual de TSM determinada a partir dos dados da bóia e do satélite NOAA-18.

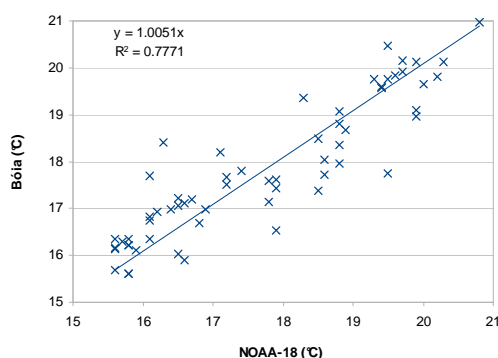


Figura 7 – Regressão linear entre as TSM observada (abscissas) e determinada a partir do satélite NOAA-18 (ordenadas).

Conclusões

A partir das análises aqui abordadas, mostrou-se uma relação satisfatória entre os dados reais observados e os valores de TSM determinados por via de Detecção Remota, apresentando

pequenas intensidades para os índices MBE, MAE e RMSE, inferiores a 1 °C, e com índices de concordância ($d \approx 1$).

No que diz respeito a eventuais fontes de erros, há que ter em conta que, dada a escassez de imagens de satélite livres de cobertura de nuvens no ponto analisado, não foi feita a distinção entre os dois métodos de cálculo da TSM (para imagens captadas durante o dia e imagens captadas em período nocturno). Tal facto pode, efectivamente, contribuir para a justificação de desvios a um ajuste mais fidedigno.

Na justificação dos resultados apresentados, deve também ser levado em consideração o nível de ruído inerente ao próprio radiómetro (AVHRR/3), bem como as diferenças entre os valores da TSM determinados (correspondentes a uma camada a poucos milímetros da superfície do mar) e os valores reais observados (obtidos a uma maior profundidade).

Face aos resultados obtidos, pode considerar-se que a TSM determinada com recurso ao sinal de satélite adquirido na estação HRPT do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, aproxima-se, de forma bastante razoável, dos dados reais observados, o que constitui uma óptima motivação para a operacionalização deste produto. Todavia, dada a escassez de dados observados disponíveis, referente à variabilidade espacial, os resultados apresentados não podem constituir, *per se*, uma validação exaustiva.

Referências Bibliográficas

Araujo, C.E.S. “Avaliação da acurácia das temperaturas da superfície do mar obtidas por satélite para a região sul-sudeste da costa brasileira”. Dissertação de M.Sc., Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, SP, Brasil. 1997.

Cheng, C.M. Applications of Remote Sensing in Weather Forecasting and Warnings. Training Workshop on Natural Disaster Management Using Remote Sensing & GIS Technologies, pp. 6-17. 2001.

Emery, W.J., Castro S., Wick G.A. et al. Estimating sea surface temperature from infrared satellite and in situ temperature data, Bulletin of American Meteorological Society, n. 82, pp. 2773-2785. 2001.

Goodrum, G., Kidwell, K., Winston, W. NOAA KLM User's Guide (September 2000 revision) online em: <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/>

Hochleitner, F. R. Análise de Técnicas de Mascaramento de Nuvens para Estimativa de Parâmetros Físicos da Superfície do Mar via

Dados AVHRR-NOAA. 79 p. (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2007), Dissertação – UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro. 2007.

McClain EP, Pichel WG, Walton CC, Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea-surface temperatures, J.G.R., 90: (c6) 1587-1601, 1985.

Oliveira, E. N. Estimativas de correntes oceânicas superficiais pelo método da máxima correlação cruzada, São José dos Campos: INPE, 102p. (INPE-9583-TDI/839). 2001.

Stowe, L. L., P. A. Davis, and E. P. McClain. Scientific basis and initial evaluation of the CLAVR-1 global clear/cloud classification algorithm for the advanced very high resolution radiometer. J. Atmos. Oceanic Technol., 16, 656-681. 1999.

Willmott, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Norwich, v. 2, n. 2, 1981.

Zacharias, S.; Heatwole, C.D.; Coakley, C.W. Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 1, p. 47-54, 1996.

Agradecimentos

O primeiro e segundo autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia e ao programa Alβan da União Europeia, respectivamente, pela concessão das bolsas de doutoramento.