

Reconstrução dos dados faltantes em imagens orbitais de temperatura da superfície do mar para a região Sudoeste do Atlântico Sul

Reconstruction of missing data in orbital images of sea surface temperature in the southwest region of the Atlantic Ocean

Elaine Aparecida de Oliveira*
Leandro Calado**
Alexandre Macedo Fernandes***

Um método baseado em Função Ortogonal Empírica foi utilizado para reconstrução de imagens de Temperatura da Superfície do Mar (TSM). Foram adotadas abordagens univariada, utilizando somente dados TSM, e multivariada, combinando TSM e Mapas de Anomalia da Altura da Superfície Mar (MSLA). Com a abordagem multivariada foram testados e avaliados os benefícios da inédita adição dos MSLA na recuperação de feições oceanográficas ao largo da região sudoeste do Atlântico Sul. Ambas as abordagens apresentaram resultados qualitativos satisfatórios. Análises estatísticas verificaram melhora de ~5% da reconstrução multivariada em relação à univariada, ambas representaram corretamente as feições de mesoescala da Corrente do Brasil.

An empirical orthogonal function-based technique was used to reconstruct missing data of Sea Surface Temperature (SST) images. Sea surface temperature data was used to assess the benefits of a univariate reconstruction, and the combination of both SST and Maps of Sea Level Anomalies (MSLA) data was used in a multivariate approach. In the multivariate approach the effect of addition of MSLA data in the reconstruction of Brazil Current (BC) features was assessed. Results were satisfactory in both approaches. The combination of SST plus MSLA significantly improves results obtained by reconstruction; statistical analyses found an improvement of ~ 5%. All experiments correctly represent the mesoscale features off the southwest South Atlantic.

Palavras-Chave: Reconstrução de Imagens. Imagens de Satélite. Corrente do Brasil. Função Ortogonal Empírica.

Keywords: Reconstruction of Image. Satellite Images. Brazil Current. Empirical Orthogonal Function.

1 Introdução

As imagens captadas por sensores orbitais a bordo de satélite vêm sendo amplamente utilizadas em oceanografia e permitindo um novo olhar sobre o oceano. A partir de imagens de satélite é possível a realização de estudos em geral das características

* Possui graduação em Oceanografia pela Universidade Federal do Paraná (2012). Atualmente é estudante de mestrado da Universidade do Estado do Rio de Janeiro e bolsista no Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM). E-mail: elaineoceanografia@gmail.com.

** Doutor em Oceanografia Física pela Universidade de São Paulo – USP. Pesquisador Encarregado do Grupo de Sensoriamento Remoto – IEAPM. E-mail: leandro_calado@hotmail.com.

*** PhD. Na área de Oceanografia Física pela Florida State University-EUA. Prof. Adjunto – Departamento de Oceanografia Física – Faculdade de Oceanografia – UERJ. E-mail: alxmfr@gmail.com.

da superfície do mar (SOUZA, 2005); como também estudos de processos na coluna d'água que apresentem sinais na superfície, tais como as ondas internas (SILVA et al., 1998; LIU et al., 1998). A ampla utilização das imagens orbitais deve-se, sobretudo, à sua larga cobertura espaçotemporal e à possibilidade da aquisição de dados de forma contínua e tridimensional (ROBINSON, 1985; ROBINSON, 1996). O imageamento por satélite é um método de aquisição de dados que oferece cobertura e precisão rápida e eficiente, o que o torna muito útil tanto para a oceanografia operacional quanto para estudo em tempo real.

Devido a fatores como a facilidade de obtenção de dados, menor custo e baixo esforço amostral, imagens orbitais na região sudoeste do Atlântico Sul são comumente utilizadas na determinação da frente térmica e feições relacionadas à atividade de mesoescala (meandros e vórtices) como o da Corrente do Brasil (CB). Entretanto os estudos realizados a partir de dados orbitais na região ao largo da costa sul-americana, frequentemente relatam as dificuldades enfrentadas devido à alta cobertura de nuvens, que tem como consequência um baixo aproveitamento das imagens disponíveis (MELLO FILHO, 2006).

Os parâmetros oceanográficos medidos por sensores orbitais dependem diretamente do tipo de sensor empregado, estes captam a energia eletromagnética proveniente de um objeto em determinadas faixas do espectro eletromagnético. Parâmetros como clorofila e Temperatura da Superfície do Mar (TSM), por exemplo, são obtidos através dos comprimentos de onda na gama do visível e infravermelho, enquanto a Altura da Superfície do Mar (ASM), inferida a partir da altura média da superfície do oceano com referência ao elipsoide, obtida por sensores de microondas (DONG et al., 2002). Uma limitação dos receptores ópticos (visível e infravermelho) é a susceptibilidade a interferências atmosféricas como chuva e presença de nuvens e/ou mesmo falhas nos sensores, que comprometem total ou parcialmente a utilização desse tipo de dado. Mesmo os dados de sensores baseados em microondas, que não são afetados por interferências atmosféricas, podem apresentar grandes lacunas nos dias em que a faixa de satélite não cobre completamente a zona de interesse em estudo (GENTEMANN et al., 2004). Um conjunto completo de dados é crucial em muitas aplicações que utilizam imagens de satélite, como por exemplo, no estudo das zonas oceânicas com alta variabilidade espacial e temporal; e na utilização desse tipo de dados como forçantes em modelos numéricos hidrodinâmicos. Mesmo em estudos onde não é necessário haver um preenchimento completo das imagens, é sempre preferível ter um máximo de informações possíveis. Vários métodos têm sido utilizados na recuperação de dados faltantes em imagens orbitais e até mesmo em séries de dados *in situ*. Um dos métodos mais difundidos na recuperação de dados faltantes é o método Interpolação Ótima (IO – *Optimal Interpolation*) (BENNETT, 2002). O método IO tem sido amplamente utilizado para a reconstrução de conjuntos de dados orbitais de TSM e Anomalia do Nível do Mar (ANM) (HOYER; SHE, 2007; MARTIN et al., 2012; FIEGUTH et al., 2005; FIEGUTH et al., 1998), como também nas reconstruções de conjunto de dados históricos

de TSM coletados *in situ*. (REYNOLDS; SMITH, 1994; SMITH et al., 1996; KAPLAN et al., 1997, KAPLAN et al., 1998; REYNOLDS et al., 2002).

O *GHRSSST* (*Group for High Resolution Sea Surface Temperature*) utiliza a IO na reconstrução de imagens do campo TSM global de forma operacional, a partir de dados satélites de microondas ou uma composição de dados infravermelhos e de microondas de diferentes satélites combinados, que são integradas com observações *in situ* para determinação da TSM (DONLON et al., 2007; MARTIN et al., 2011).

Em determinadas regiões como sudoeste do Atlântico Sul, em períodos de alta cobertura de nuvens, os campos de temperatura das imagens GHRSSST podem apresentar resultados suavizados. Em estudos a respeito da CB, por exemplo, a suavização do campo de TSM pode dificultar o estudo de feições de mesoescala (PAES, 2010). Uma hipótese para explicar esse fato pode estar relacionada com a falta de dados apropriados para a IO. De acordo com BENNETT (2002), a IO baseia-se fortemente em dados *in situ* (informações *a priori*) e, certamente, não há dados suficientes ao largo da costa sul-sudeste brasileira, o que pode comprometer o método e a qualidade das imagens.

Uma metodologia alternativa de reconstrução de imagens chamada de DINEOF (*Data Interpolating Empirical Orthogonal Functions*) foi apresentada por Beckers e Rixen (2003) e Alvera-Azcárate et al. (2005). Segundo os autores, o DINEOF apresenta-se como uma técnica sem parâmetro autoconsistente para a reconstrução dos dados, com a vantagem de não precisar de informações *a priori* e um menor custo operacional quando comparado a IO. Alvera-Azcárate et al. (2005) em um estudo comparativo verificaram que o DINEOF foi até 30 vezes mais rápido do que a IO para resolver o problema de dados em faltantes e apresentou precisão semelhante quando comparado com dados *in situ*.

Alvera-Azcárate et al. (2007) promoveram uma evolução do método DINEOF em uma abordagem multivariada (TSM – Clorofila e Vento) para preenchimento de dados faltantes em imagens de satélite. Esses autores encontraram uma melhora significativa dos resultados quando comparado com o uso exclusivo do método em uma série univariada (apenas TSM). Os autores se basearam no pressuposto de que as variáveis oceanográficas são frequentemente inter-relacionadas pela dinâmica dos oceanos, o que torna potencialmente útil considerar essas relações na reconstrução de dados faltantes como forma de obter campos mais realistas e uma melhor compreensão da sua inter-relação (GOMIS et al., 2001; PARIS et al., 2002; COLLINS et al., 2004). A ASM, por exemplo, revela a quantidade de calor armazenado em determinadas regiões do oceano, fornecendo informação importante sobre a dinâmica e a termodinâmica dos oceanos (POLITO et al., 2000). Dessa forma a utilização da ASM como dado para reconstrução de imagem no contexto de mesoescala pode ser uma boa opção, uma vez que, esses tipos de dado provêm de sensores que não são afetados por interferências atmosféricas.

No presente estudo a técnica DINEOF foi aplicada em abordagens univariada e multivariada para o domínio que cobre a região ao largo do sudoeste do Atlântico Sul.

O objetivo foi comparar e avaliar a eficiência da técnica DINEOF aplicada a partir de método de combinação de dados de TSM e ASM na recuperação e delimitação das feições oceanográficas das imagens em relação à utilização apenas de dados de TSM, estabelecendo assim uma metodologia de identificação das frentes oceânicas através de TSM sem dados faltantes.

2 Materiais e Métodos

2.1 Imagens de Satélite

Para criar a condição passível de reconstrução de dados faltantes em imagens de TSM pelo método DINEOF, foram utilizados nesse estudo um total de 150 imagens de satélites, delimitadas entre os limites 20°S e 28°S e 48°W e 38°W, recobrando a região sudoeste do Atlântico Sul. Tais imagens foram compostas por três conjuntos de 50 imagens, obtidas de três diferentes fontes de dados (TSM/GHRSSST, MSLA/AVISO e TSM/MODIS-AQUA).

O primeiro conjunto de imagens foi composto por dados TSM gerados pelo grupo GHRSSST, com resolução espacial de 1km (GISST) . O produto GISST não apresenta contaminação por interferências atmosféricas, ou seja, mapas completos sem píxeis ausentes, gerados a partir da combinação de dados *in situ* com dados de multisensores que incluem: *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), *Advanced Along Track Scanning Radiometer* (AATSR), *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI) *Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS* (AMSRE), *Tropical Rainfall Measuring Mission Microwave Imager* (TMI), *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) e o *Multi-Functional Transport Satellite 1R* (MTSAT-1R) (CHAO, 2009).

O segundo conjunto de imagens são dados ASM, obtidos a partir de Mapas de Anomalia do Nível do Mar (MSLA-*Maps of Sea Level Anomalies*) distribuídos pela AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*). O MSLA é calculado através da diferença da ASM instantânea e uma referência temporal, possuem resolução espacial de 1/3° e são gerados a partir dos dados satélites Altimétricos Topex/Poseidon, Jason-1, ERS-1, ERS-2 e EnviSat. No presente trabalho, as imagens ASM passaram pela interpolação linear 2-D, para adequarem-se à mesma resolução espacial (1020x890 pixels) das imagens TSM geradas a partir dos dados GISST.

O terceiro conjunto de dados, imagens TSM L2 MODIS/AQUA, foi utilizado para recriar sinteticamente lacunas por ausência de dados no primeiro conjunto de imagens (GISST), simulando assim a presença de nuvens e/ou ausência de dados. Para isso, a posição espacial de píxeis referentes às lacunas presentes no conjunto imagens

TSM L2 MODIS/AQUA foi utilizada com base para remoção dos píxeis no conjunto de imagens G1SST. Dessa forma foi gerado um novo conjunto de dados denominado aqui de TSM contaminado (TSMc), a partir das imagens G1SST contaminadas por lacunas obtidas nas imagens MODIS/AQUA. Esse processo é exemplificado na Figura 1. Já na Figura 2 é apresentada percentagem espacial de lacunas devido à ausência de dados gerada pela remoção de píxeis na sequência de imagens TSMc.

Para evitar qualquer tipo de dependência entre os conjuntos de dados G1SST e TSM MODIS-AQUA, optou-se por conjuntos de dados obtidos em períodos diferentes. Tanto as imagens G1SST quanto MSLA correspondem ao período de 24/07/2010 a 13/09/2010, enquanto as imagens MODIS-AQUA compreendem o período de 13/06/2004 a 06/08/2004.

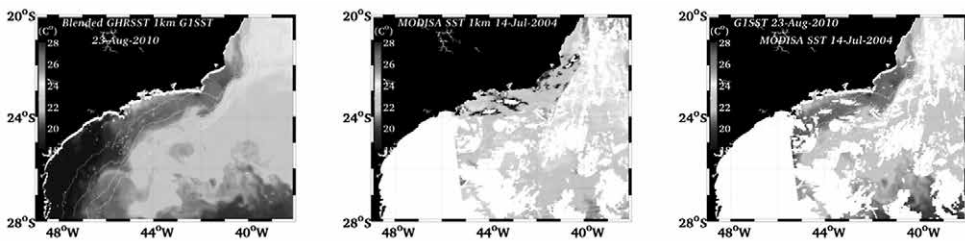


Figura 1 - Imagens G1SST, 23 de agosto de 2010 (painel esquerdo); Imagem TSM MODIS-AQUA, 14 de julho de 2004 (painel central); Imagens TSMc, nuvens MODIS (14 de julho de 2004) sobrepostas (pixel removidos) à imagem G1SST (23 de agosto de 2010)

Fonte: TSM/GHRSSST, MSLA/AVISO e TSM/MODIS-AQUA

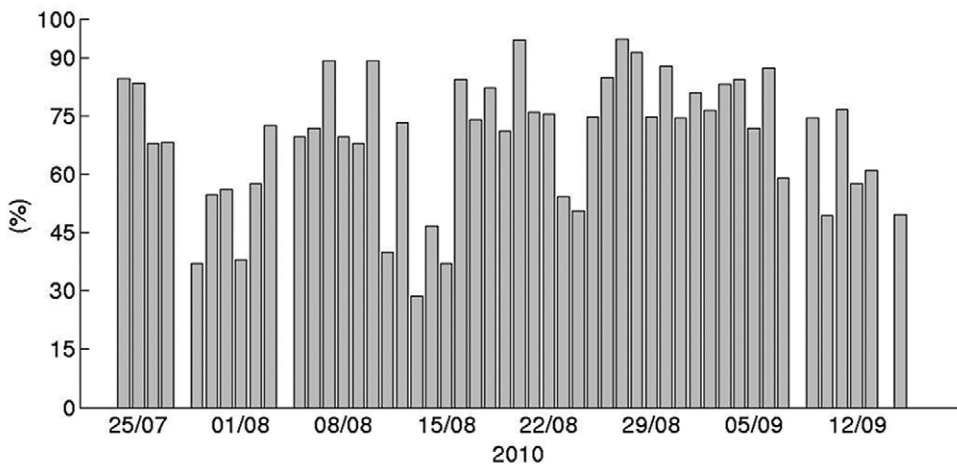


Figura 2 - Percentagem espacial de lacunas criadas (remoção de píxeis válidos) na sequência de imagens TSMc

2.2 O Método DINEF -Data Interpolating Empirical Orthogonal Functions

O conjunto de imagens TSMc, por sua vez foi criando com objeto de ser utilizado com dado de entrada no método de reconstrução de imagens DINEOF.

O DINEOF foi desenvolvido e aprimorado pelo Grupo GHER (Geo-Hidrodinâmica e Pesquisas Ambientais) da Universidade Liège, Bélgica. As bases desse método estão estabelecidas em Beckers e Rixen (2003).

O processamento DINEOF segue do seguinte protocolo: Inicialmente é realizada uma média espacial e temporal do conjunto de dados analisados e os dados faltantes são inicializados para zero, para garantir que eles sejam imparciais em relação ao conjunto de dados; em seguida, a primeira Função Ortogonal Empírica (EOF - *Empirical Orthogonal Function*) ($k=1$) é calculada a partir desse campo e os dados em faltantes são substituídos com os valores obtidos pela *Singular Value Decomposition* (SVD) da EOF calculada; Com os novos valores para os dados em falta, a SVD é realizada novamente. Esse procedimento é repetido até que um critério de convergência de dados que faltam seja atingido; Em seguida, todo o procedimento iterativo é realizado por $k = 2, 3, \dots, K_{\max}$ EOFs, onde k_{\max} é um número pré-definido pelo operador e deve variar de acordo com as características iniciais de matriz. O número total de EOFs calculado é determinado pela validação cruzada, onde alguns dados válidos (geralmente 1% do total de dados) são removidos no início do procedimento e sinalizado como ausentes. A cada iteração EOF, o valor calculado a partir da série de EOF é comparado com o valor real desses dados sinalizados. O número k de EOFs que minimiza essa diferença é mantido como o número ideal para reconstruir o conjunto de dados. Alvera-Azcárate et al. (2005) aprimoraram o método DINEOF, incluindo um eficiente solucionador de EOF, desenvolvido por Toumazou e Cretaux (2001). Essa adição permitiu a reconstrução de grandes conjuntos de dados.

A abordagem multivariada DINEOF utiliza a análise EOFs estendida (ExEOFs), uma forma generalizada de EOF clássico em que mais do que um conjunto de dados são usados simultaneamente para efetuar a análise EOF (Alvera-Azcárate et al., 2005). O uso de matrizes estendidas para calcular ExEOFs tem muitas vantagens sobre o uso de EOFs clássicos na recuperação de dados ausentes em reconstrução de imagens. Primeiro, eles podem resolver os padrões de movimento mais precisamente devido ao defasamento temporal da matriz (GHIL et al, 2002; JOLLIFFE, 2002; KIM; WU, 2000). Além disso, a correlação entre diferentes variáveis fisicamente relacionadas pode favorecer a reconstrução dos dados faltantes (GOMIS et al., 2001).

3 Análise Estatística

Testes estatísticos de comparação das médias foram utilizados para avaliar a existência de diferença significativa entre o conjunto de imagens original G1SST e

os conjuntos de imagens reconstruídos pelo método DINEOF. Os testes estatísticos, incluindo o cálculo do Erro Médio (EM), foram também usados para comparar a eficiência entre as abordagens de reconstrução univariada e multivariada.

A princípio, o teste de normalidade de distribuição de dados *Jarque bera* (JARQUE; BERA, 1987) constatou que nenhum dos conjuntos de dados (G1SST, MSLA e reconstruções DINEOF univariada e multivariada) apresentou normalidade na distribuição espacial. Essa característica deve-se, provavelmente, à grande variabilidade latitudinal apresentada da TSM e MSLA na região de abrangência deste estudo.

Sendo assim, optou-se por comparar as variações temporais dos dados. A série temporal de cada pixel válido ($TSM > 16^{\circ}\text{C}$) foi considerada uma amostra (X_{mn}^i) individual. Dessa forma foram realizadas análises de amostras pareadas (X_{mn}^i Y_{mn}^i), onde X e Y representam os píxeis respectivos, imagens G1SST e imagem reconstruída; i é a variação temporal ($i=1...50$) e mn são as variações espaciais, onde $n=1...1020$ e $m=1...890$ correspondem à posição espacial para cada par de pixel.

O teste *Jarque bera* foi então aplicado, individualmente, em cada amostra, em todos os conjuntos de dados. Em seguida, o teste *t-Student Pareado*, com nível de significação de 5% ($p > 0.05$), foi aplicado nos pares onde ambas as amostras apresentaram distribuição normal. Nos demais pares, onde pelo menos uma das amostras não apresentou distribuição normal, foi aplicado o teste não paramétrico *Kolmogorov-Smirnov* descrito por Massey (1951).

4 Resultados e Discussão

Os resultados desses estudos são representados num caráter ilustrativo pelas imagens dos dias 29 de Julho de 2010 (a), 30 de Julho de 2010 (b) e 31 de Julho de 2010 (c). A Figura 3 (a, b e c) apresenta imagens G1SST originais, nas quais nota-se a frente térmica da CB fluindo sobre a quebra da plataforma até a região do Cabo de São Tomé ($\sim 22^{\circ}\text{S}$), a partir desta região, o fluxo desenvolve um meandro, ocasionando um deslocamento da frente interna do da CB em direção a leste sobre o talude continental. Um desprendimento mais pronunciado é observado ao largo de Cabo Frio ($\sim 24^{\circ}\text{S}$ e $\sim 41.5^{\circ}\text{W}$), com uma migração brusca da frente térmica para a isóbata superior a 2000 m, onde é claramente observado um vórtice frontal da CB, que evolui ao longo da sequência de imagens. Essas feições já foram descritas anteriormente em estudos como o de Calado (2006) e Silveira (2007). Ao sul do Embaimento de Santos, sobre a plataforma continental, é possível observar águas superficiais mais frias ($< 19^{\circ}\text{C}$), descritas como sendo o avanço da frente estuarina do Rio da Prata por Piola et al. (2000) e Piola et al. (2005).

A Figura 4 (a, b e c) apresenta as imagens TSMc, respectivas imagens G1SST (Figuras 3 [a, b e c]) com sobreposição de lacunas (ausência de dados válidos) obtidas a

partir de imagens MODISA dos dias 17, 18 e 19 de julho de 2004. Ao longo de todo o conjunto de imagens (não ilustradas aqui) a cobertura de nuvens cobriu quase que total ou parcialmente as feições de meso escala observadas nas imagens originais. A cobertura média de nuvens ou ausência e/ou falhas de registros ao longo de todo o conjunto de dados foi de 69.3% (Fig. 2).

Os campos de TSM reconstruídos pelo método DINEOF com abordagem univariada (TSMu), ou seja, a partir apenas do conjunto de dados TSMc, são apresentados na Figura 5 (a, b e c). Já os campos de TSM reconstruídos pelo método DINEOF com abordagem multivariada (TSMm), gerados pela combinação de dados de TSM e MSLA são apresentados na Figura 6 (a, b e c). As linhas contínuas (Fig. 6) representam anomalias negativas, enquanto as linhas tracejadas ilustram anomalias positivas de altura da superfície oceânica.

Uma comparação qualitativa entre as imagens G1SST (Fig. 3 [a b e c]) e suas respectivas imagens reconstruídas (Fig. 5 e 6 [a b e c]) mostram que ambas as abordagens (TSMu e TSMm) apresentam resultados satisfatórios. Embora a cobertura artificial de nuvens tenha sobreposto parcialmente as estruturas do vórtice na maior parte das imagens apresentadas nas Figuras 4 (a e c). Nas demais imagens não ilustradas aqui, é possível observar que o vórtice, em Cabo Frio, foi perfeitamente reconstruído, quando analisado comparativamente ao dado original G1SST. Os resultados foram ainda melhores na recuperação da posição da frente da CB acima do Cabo de São Tomé e no ramo de água fria ao sul que avança sobre a plataforma continental em sentido ao norte-nordeste até o Embaimento de Santos.

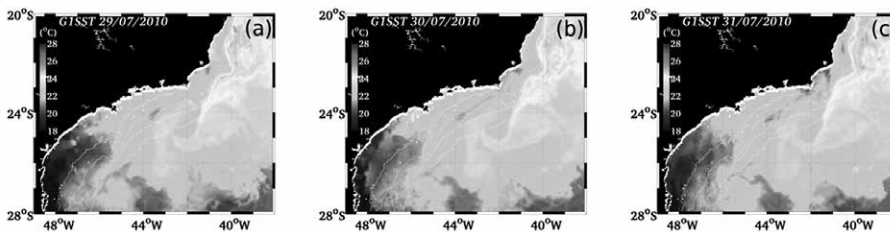


Figura 3 – Imagens G1SST dos dias 29/07/2010 (a), 30/07/2010 (b) e 31/07/2010 (c)

Fonte: TSM/GHRSST, MSLA/AVISO e TSM/MODIS-AQUA

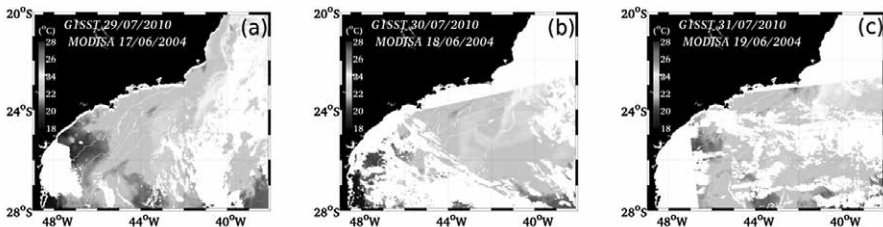


Figura 4 – Imagens TSMc resultado da cobertura artificial de nuvens MODIS sobreposta às imagens G1SST dos dias 29/07/2010 (a), 30/07/2010 (b) e 31/07/2010 (c)

Fonte: TSM/MODIS-AQUA

A combinação entre TSM e MSLA nas sequências de imagens da Figura 6 revelou-se representativa na identificação e no posicionamento de meandros e vórtices, favorecendo, sobretudo, a identificação dos vórtices anticiclônicos, que, por possuírem um baixo gradiente de temperatura, são de difícil identificação em imagens de TSM.

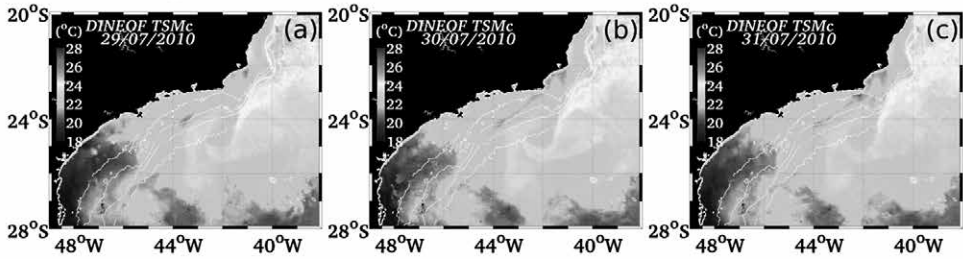


Figura 5 – Reconstrução DINEOF das imagens TSMc com abordagem univariada dos dias 29/07/2010 (a), 30/07/2010 (b) e 31/07/2010 (c)

Fonte: TSM/GHRSS, MSLA/AVISO e TSM/MODIS-AQUA

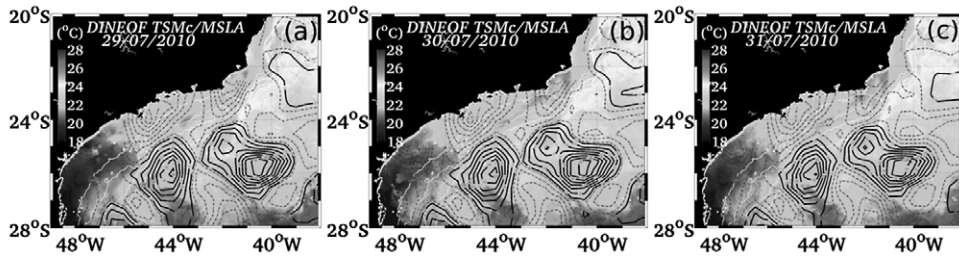


Figura 6 – Reconstrução DINEOF de imagens TSMc com abordagem multivariada com a sobreposição dos respectivos dados MSLA (cm) dos dias 29/07/2010 (a), 30/07/2010 (b) e 31/07/2010 (c)

Fonte: MSLA/AVISO

4.1 Validação qualitativa

Os resultados dos cálculos do EM estimaram a diferença entre as imagens originais (FIGURA 3 [a, b e c]) e os conjuntos de imagens reconstruídas TSMu e TSMm são apresentados respectivamente pelas Figuras 7 e 8 (a, b e c). Nota-se que a abordagem multivariada apresentou menor variação quando comparada à abordagem univariada.

A Tabela 1 apresenta a percentagem de amostras temporais de dados com distribuição normal. A menor percentagem apresentada pelo conjunto MSLA provavelmente está relacionada à baixa resolução desses dados, a qual foi responsável pela redução de normalidade na distribuição dos dados da reconstrução multivariada.

Tabela 1 - Porcentagem (%) de amostra que apresentaram distribuição normal

| MSLA | G1SST | Reconstrução DINEOF | | Amostra Pareadas | |
|-------|-------|---------------------|-------|------------------|------------------|
| | | TSMu | TSMm | GHRSSST/ TSMu | GHRSSST/ TSMm |
| 58.17 | 91.41 | 90.93 | 74.41 | 85.67 | 70.15 |

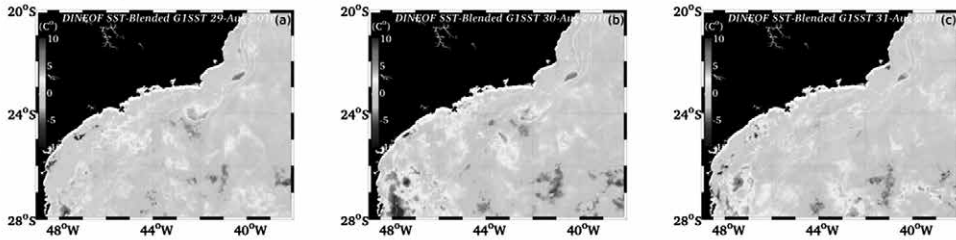


Figura 7 - Erro Médio percentual calculado entre as imagens G1SST e respectiva reconstrução univariada pelo método DINEOF dos dias 29/07/2010 (a); 30/07/2010 (b) e 31/07/2010(c)

Fonte: TSM/GHRSSST, MSLA/AVISO e TSM/MODIS-AQUA

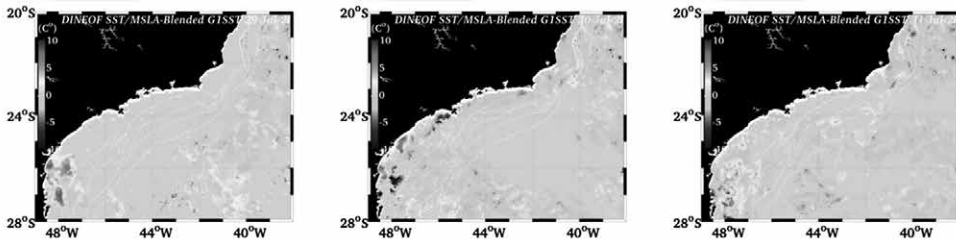


Figura 8 - Erro Médio percentual calculado entre as imagens G1SST e respectiva reconstrução multivariada pelo método DINEOF dos dias 29/07/2010 (a); 30/07/2010 (b) e 31/07/2010(c)

Fonte: TSM/GHRSSST, MSLA/AVISO e TSM/MODIS-AQUA

A Figura 9 ilustra os resultados da investigação da diferença significativa entre o conjunto de dados originais e o conjunto de imagens reconstruídos pela abordagem univariada (painel esquerdo) e multivariada (painel direita). As regiões em preto (valores iguais a 1) indicam a coerência de diferença significativa entre o conjunto de dados originais e o conjunto de dados reconstruídos, enquanto nas áreas em cinza (valores iguais a 0) não foram verificadas tais diferenças significativas. Quantitativamente a combinação entre os testes *t-Student* e *Kolmogorov-Smirnov* indicaram que o conjunto de imagens reconstruídas pelo método DINEOF com abordagem univariada e o conjunto G1SST não apresentam diferenças significativas em 67.01% (FIG. 9 painel esquerdo), o mesmo procedimento aplicado ao conjunto de imagens com abordagem

multivariada (FIG. 9 painel direito) apresentou uma diferença não significativa em 71.93% das amostras de dados válidos.

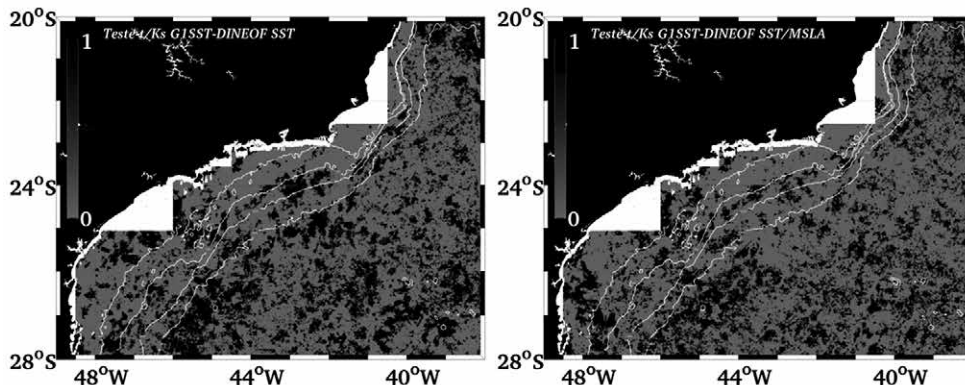


Figura 9 - Teste de diferença significativa entre o conjunto de imagens GISST e as reconstruções com abordagem univariada (painel direito) e multivariada (painel esquerdo) pela combinação dos Testes t-Student e Kolmogorov-Smirnov

Fonte: TSM/GHRSS, MSLA/AVISO e TSM/MODIS-AQUA

Os resultados encontrados como também os estudos realizados em diferentes lugares do mundo demonstraram que o método DINEOF pode ser utilizado no preenchimento de lacuna devido a dados ausentes de diversas variáveis, com diferentes combinações de variáveis, usada em conjunto a fim de aumentar a informação de um dado fenômeno. O DINEOF foi utilizado por Beckers e Rixen (2003), Alvera-Azcárate et al. (2005), Beckers et al. (2006) e MAURI et al. (2008) em estudo com TSM nos mares Adriático e Lígure. Mauri et al. (2007) utilizaram o método DINEOF na recuperação de dados de clorofila-a no norte do Mar Adriático. Já Alvera-Azcárate (2008) aplicou o método na recuperação de imagens de material particulado total em English Channel. Alvera-Azcárate et al. (2007) utilizaram concomitante de SST, concentração clorofila e dados de vento no oeste da Flórida e identificaram uma melhora na reconstrução de eventos como a ressurgência de águas frias superficial gerada pela ação do vento. Tais estudos deixam clara a importância das características regionais na definição das variáveis escolhidas, como também o foco de estudo. A utilização de dados de vento e clorofila-a são claramente mais adequadas para estudo de eventos de ressurgência costeira como o realizado por Alvera-Azcárate et al. (2007). No entanto, a variação da técnica aplicada no presente estudo, utilizando da combinação de dados de TSM com MSLA mostrou-se eficiente e adequada para as características dinâmicas oceanográficas da região sudeste do Atlântico Sul, levando-se em consideração que o foco deste estudo foi a recuperação de informações de estruturas de mesoescala como os vórtices e meandros da CB.

5 Considerações Finais

A aplicação do método DINEOF para reconstrução de imagens de TSM foi utilizada em duas abordagens: univariada, isto é, utilizando somente um conjunto de dados de TSM; e multivariada, onde são combinados dois conjuntos de dados, TSM e MLSA, tendo como foco principal as feições de mesoescala. Este estudo destaca-se pela inédita utilização de dados MLSA na reconstrução de imagens pelo método DINEOF.

Os resultados mostram qualitativamente que as séries de imagens foram perfeitamente reconstruídas em ambas as abordagens. Entretanto, as análises quantitativas dadas pelos testes de estatísticos de comparação revelaram que abordagem multivariada obteve um sucesso de ~72% de semelhança com o conjunto de imagens originais, corroborando a análise qualitativa. Esse resultado supera em aproximadamente 5% o resultado da abordagem univariada indicando que a inclusão do dados de MLSA é uma boa alternativa para melhorar a reconstrução de imagens, principalmente quando o foco são as feições de mesoescala. Com os resultados foi possível observar que, apesar de haver cobertura artificial de nuvens sobreposta total ou parcialmente à estrutura do vórtice da CB e da sua região da frente térmica, a reconstrução da imagem original foi satisfatória. O desenvolvimento e evolução das feições oceânicas reconstruídas (seqüências de figuras 5 e 6) foram claramente vistos ao longo da seqüência das demais imagens do conjunto de dados.

Esse método mostrou-se eficiente na solução dos problemas quando há falta de dados em séries de imagens devido à cobertura de nuvens possibilitando o desenvolvimento de uma nova abordagem nos métodos de reconstrução de imagens de TSM para diversas aplicações, como assimilação de dados orbitais em modelos numéricos hidrodinâmicos, análise e acompanhamento de feições de mesoescala em tempo quase-real.

Referências

ALVERA-AZCÁRATE, A. et al. Multivariate reconstruction of missing data in sea surface temperature, chlorophyll, and wind satellite fields. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 112, n. C3, mar. 2007.

ALVERA-AZCÁRATE, A. et al. Reconstruction of incomplete oceanographic data sets using empirical orthogonal functions: application to the Adriatic Sea surface temperature. *Ocean Modelling*, v. 9, n. C4, p. 325-346, 2005.

CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES. *SSALTO/DUACS user handbook: (M)SLA and (M)ADT near-real time and delayed time products*. *Stellite Altimetry Data*, n. C4, jun. 2015.

BECKERS, J. M.; RIXEN, M. EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic data sets. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 20, n. C12,

p. 1839-1856, 2003.

BECKERS, J. M.; RIXEN, M. EOF Calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 20, n. C12, p. 1839-1856, 2003.

CALADO, L. *Dinâmica da interação da atividade de mesoescala da Corrente do Brasil com o fenômeno da ressurgência costeira ao largo de Cabo Frio e Cabo de São Tomé*. 2006. Tese (Doutorado)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

COLLINS, D. C.; REASON, C. J. C.; TANGANG, F. Predictability of Indian Ocean sea surface temperature using canonical correlation analysis. *Climate Dynamics*, v. 22, n. C5, p. 481-497, 2004.

CHAO, Y. et al. Blending sea surface temperatures from multiple satellites and in situ observations for coastal oceans. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 26, n. C7, p. 1415-1426, 2009.

SILVA, J. da et al. Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf: 1: short-period internal waves. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, n. C4, p. 8009–8031, 1998.

DONG, X. et al. Absolute calibration of the TOPEX/Poseidon altimeters using UK tide gauges, GPS, and precise, local geoid-differences. *Marine Geodesy*, v., 25, n. C3, p. 189-204, 2002.

DONLON, C. et al. The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 88, n. C8, p. 1197-1213, 2007.

FIEGUTH, P. et al. Mapping Mediterranean altimeter data with a multiresolution optimal interpolation algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 15, n. C2, p. 535-546, 1998.

GENTEMANN, C. L. et al. In situ validation of Tropical Rainfall Measuring Mission microwave sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans* v. 109, n. C4, p. 1978-2012, 2004.

GOMIS, D.; RUIZ, S.; PEDDER, M. A. Diagnostic analysis of the 3D ageostrophic circulation from a multivariate spatial interpolation of CTD and ADCP data. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, v. 48, n. C1, p. 269-295, 2001.

GHIL, M. et al. Advanced spectral methods for climatic time series. *Reviews of geophysics*, v. 40, n. 1, p. 3-11, 2002.

HØYER, J. L.; E SHE, J. Optimal interpolation of sea surface temperature for the North Sea and Baltic Sea. *Journal of Marine Systems*, v. 65, n. C1, p. 176-189, 2007.

KIM, K. Y.; WU, Q. Optimal detection using cyclostationary EOFs. *Journal of Climate*, v. 13, n. C5, 938-950, 2000.

JARQUE, C. M.; BERA, A. K. A test for normality of observations and regression residuals. *International Statistical Review/Revue Internationale de Statistique*, v. 55, n. C1, p. 163-172, 1987.

- JOLLIFFE, I. T.; TRENDAFILOV, N. T.; UDDIN, M. A modified principal component technique based on the LASSO. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, v. 12, n. C3, p. 531-547, 2003.
- LIU, A. et al. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China seas. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, n. C4, p. 7995-8008, 1998.
- MARTIN, M. et al. Group for High Resolution Sea Surface temperature (GHRSSST) analysis fields inter-comparisons: part 1: a GHRSSST multi-product ensemble (GMPE). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 77, p. 21-30, 2012.
- MAURI, E.; POULAIN, P. M.; JUZNICZONTAC, Z. MODIS chlorophyll variability in the northern Adriatic Sea and relationship with forcing parameters. *Journal of Geophysical Research*, v. 112, n. C3. 2007.
- MAURI, E., POULAIN, P. M.; NOTARSTEFANO, G.. Spatial and temporal variability of the sea surface temperature in the Gulf of Trieste between January 2000 and December 2006. *Journal of Geophysical Research*, 2008.
- MELLO FILHO, W. L. Observação de Processos Oceanográficos de Superfície na Costa Sudeste Brasileira através de imagens termais do sensor AVHRR/NOAA. 2006. Dissertação (Mestrado)–Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2006. 85 p.
- KAPLAN, A. Analyses of global sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), v. 103, n. C9, p. 18567-18589, 1998.
- KAPLAN, A. Reduced space optimal analysis for historical data sets: 136 years of Atlantic sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), v. 102, n. C13, p. 27835-27860, 1997.
- MASSEY JR, F. J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, v. 46, n. 253, p. 68-78, 1951.
- PAES, R. C. de O. V. Metodologia de reconhecimento de vórtices a partir de imagens orbitais. 2009. 87 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- PARIS, C. B. et al. Multivariate objective analysis of the coastal circulation of Barbados, West Indies: implication for larval transport. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, v. 49, n. 8, p. 1363-1386, 2002.
- PIOLA, A. R. et al. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, v. 32, n. 1, 2005.
- PIOLA, A. R. et al. Subtropical shelf front off eastern South America. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), v. 105, n. C3, p. 6565-6578, 2000.
- POLITO, P. S.; SATO, O. T.; LIU, W. T. Characterization and validation of the heat storage variability from TOPEX/Poseidon at four oceanographic sites. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), v. 105, n. C7, p. 16911-16921, 2000.
- REYNOLDS, R. et al. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of climate*, v. 15, n. 13, p. 1609-1625, 2002.

- REYNOLDS, R. W., & SMITH, T. M. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *Journal of climate*, v. 7, n. 6, p. 929-948, 1994.
- ROBINSON, I. S. *Satellite Oceanography: an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists*. Chichester, Reino Unido: Ellis Horwood Ltd., 1985. 455 p.
- ROBINSON, I. S. *Oceanography from Space: course notes*: Southampton, Reino Unido: University of Southampton, School of Ocean and Earth Science, 1996.
- SILVEIRA, I. C. A. *O sistema corrente do Brasil na Bacia de Campos*, RJ. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007.
- SMITH, T. M. et al. Reconstruction of historical sea surface temperatures using empirical orthogonal functions. *Journal of Climate*, v. 9, n. 6, p. 1403-1420, 1996.
- SOUZA, R. B. D. Sensoriamento remoto dos oceanos. *Revista Espaço e Geografia*, 2010.
- SOUZA, R. B. D. *Oceanografia por Satélites*. São Paulo: Oficina de textos, 2005. p. 102-116.

Artigo recebido em: 1 ago. 2014
Aceito para publicação em: 22 abr. 2015