

Análise espectral da temperatura da superfície do mar global no período de 1884 a 2014

Carlos Batista Silva¹

Maria Elisa Siqueira Silva²

Resumo: O presente trabalho tem por objetivo verificar a evolução temporal da variância global da temperatura da superfície do mar, TSM, obtida pela aplicação da transformada de ondeletas aos dados mensais, e de sua tendência linear para o período de 1884 a 2014. A aplicação da técnica de ondeletas usando dados médios de TSM para várias áreas oceânicas permitiu a identificação de quatro faixas espectrais mais importantes: 1-12 meses, 1-2 anos, 2-4 anos 4-8 anos e 8-12 anos. Com a análise de tendência linear aplicada à variância da TSM em cada faixa espectral foi possível verificar que as oscilações mais rápidas, 1-12 meses, 1-2 anos e 2-4 anos, apresentam tendência linear negativa para o sinal global, enquanto as faixas caracterizadas por oscilações mais lentas, 4-8 anos e 8-12 anos, apresentam tendência positiva ao longo da série temporal. Estes resultados levam à sugestão de que fenômenos oceânicos caracterizados por oscilações mais rápidas estejam, ao longo do período considerado, transferindo energia para fenômenos oceânicos com oscilações mais lentas.

Palavras-chave: análise de ondeletas, temperatura da superfície do mar, tendência linear.

Spectral analysis of the global sea surface temperature from 1884 to 2014

Abstract: The present work aims to verify the temporal evolution of the global variance of sea surface temperature, SST, obtained by applying the wavelet transform to monthly data, and its linear trend for the period 1884-2014. The application of the wavelet technique using mean SST data for several global oceanic areas allowed the identification of four major spectral bands: 1-12 months, 1-2 years, 2-4 years 4-8 years and 8-12 years. The linear trend analysis applied to SST variance for each spectral range allowed the verification of negative trends for faster oscillations in the global mean, 1-12 months, 1-2 years and 2-4 years, and positive trends for slower oscillations, 4-8 years and 8-12 years, throughout the considered time series. These results lead to the suggestion that ocean phenomena characterized by faster oscillations are transferring energy to ocean phenomena with slower oscillations over the considered period.

Keywords: wavelet analysis, sea surface temperature, linear trend.

Introdução

Os estudos dedicados a investigar a tendência temporal de variáveis ambientais permitem entender as alterações de longo prazo, como as associadas às mudanças climáticas globais. A verificação dos padrões de tendência linear de longo prazo de variáveis climáticas em faixas

¹ Doutorando em Geografia Física, Universidade de São Paulo, krlosbatist@gmail.com

² Professora do Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, elisasiq@usp.br

espectrais específicas adiciona maior compreensão à investigação, uma vez que permite a separação do comportamento de fenômenos em escalas distintas. O campo espectral de uma determinada variável pode ser definido através de ferramentas estatísticas específicas, tal como a análise de ondeletas. Em estudos climáticos desenvolvidos em ciências geográficas no Brasil, o uso da técnica de ondeletas vem sendo gradualmente mais explorado. Em outras áreas científicas, como hidrologia (Kang, 2007; Labat et al., 2004), meteorologia (Farge, 1992; Weng e Lau, 1994; Lau e Weng, 1995; Mak, 1995; Gu e Philander, 1995; Torrence e Compo, 1998; Torrence e Webster, 1999; An e Wang 2000; Minobi et al., 2002; Newman et al., 2003, Kayano e Andreoli, 2004, Andreoli e Kayano, 2004; Böttinger et al., 2009), a técnica de ondeletas tem sido usada desde a década de 1980, mesmo considerando sua aplicação em dados de outras localidades.

O uso da técnica de ondeletas em pesquisas voltadas à investigação de fenômenos da natureza ganhou maior destaque a partir da publicação do artigo "Sampling theory and wave propagation" por Jean Morlet, em 1983. A aplicação da técnica de ondeletas permite a análise de variáveis com características não-estacionárias, variáveis que apresentam mudanças da média e do desvio padrão ao longo da série temporal considerada, como é o caso de variáveis que representam fenômenos da natureza. A análise de ondeletas permite a identificação de sinais em toda a série temporal (excluindo-se as extremidades de acordo com a periodicidade analisada), diferentemente da análise de Fourier, técnica espectral comumente usada para análise de sinal, mas que permite apenas a identificação das faixas espectrais com maior potência em toda a série temporal, sem a identificação da evolução temporal do sinal espectral.

Em estudos climáticos, a vantagem da aplicação da transformada de ondeletas está na possibilidade de identificação da evolução temporal do sinal espectral, que constitui parte da variável climática considerada e variação temporal brusca ou suave (Weng e Lau, 1994; Torrence e Compo;1998; Whitcher et al., 2000; Vitorino et al., 2006; Setoh et al., 1999; Minobi et al.,2001; Kayano e Andreoli, 2004 e Andreoli e Kayano, 2004), incluindo as amplitudes e fases de cada faixa espectral (Morentin, 2014). Fisicamente, a vantagem em se verificar as várias frequências de oscilação de uma determinada variável é poder identificar fenômenos físicos não facilmente identificáveis a partir da série temporal de dados originais, como oscilações de longo prazo (Weng e Lau, 1994), por exemplo.

A aplicação da técnica de ondeletas a dados meteorológicos foi realizada por diversos autores, como Farge (1992), Torrence e Webster (1998) e Vitorino et al. (2006). Farge (1992), com o objetivo de descrever matematicamente a técnica para o uso de dados atmosféricos, utilizou dados de vorticidade relativa para identificar mudanças de fase em oscilações do fluxo turbulento. Torrence e Webster (1998), com o objetivo de verificar a variabilidade e coerência do sistema ENOS-moção asiática nos últimos 125 anos, observaram que este sistema sofreu mudanças significativas na escala interdecadal, com variações mais importantes na faixa espectral de 2 a 7 anos, nos períodos 1875-1920 e 1960-1990. Vitorino et al. (2006), com uso de dados de radiação de onda longa e vorticidade relativa da alta troposfera, investigaram a variabilidade submensal e intrasazonal da convecção sobre a América do Sul, no período 1979-1996, e concluíram que enquanto as regiões tropicais apresentaram maior intensidade energética durante a primavera e o verão, as regiões subtropicais e extratropicais apresentaram maior intensidade energética nas estações de inverno e outono. Em áreas do Pacífico tropical, para o período de verão do hemisfério sul, os autores identificaram oscilações importantes na escala de 25 a 45 dias, sugerindo sua associação à propagação de ondas de Rossby ao longo do Pacífico tropical oriental. Durante o inverno do hemisfério sul, os autores identificaram oscilações mais importantes na escala de 7 a 15 dias, associando-as às trajetórias de tempestades.

Os estudos destacados anteriormente foram realizados com o propósito de identificação de faixas espectrais importantes da variabilidade atmosférica, tomando como base o uso de apenas uma série temporal localizada no espaço. Com o objetivo de compreender a distribuição espacial e temporal da variância dos oceanos globais em faixas espectrais distintas, aplicou-se a análise de ondeletas à temperatura da superfície do mar no domínio global, entre janeiro de 1854 e dezembro de 2014.

Dados e métodos

Os dados mensais de temperatura da superfície do mar (TSM) foram obtidos do Earth System Research Laboratory - ESRL da NOAA (EUA) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.ersst.html>), e apresentam resolução espacial de 2,5 graus. Os dados foram obtidos para o período de janeiro de 1854 a dezembro de 2015. O ciclo sazonal foi retirado dos dados originais de forma a manter apenas a variabilidade interanual nos dados. A tendência linear de longo prazo foi também

retirada do dado original de forma que o resultado final apresentasse apenas a indicação de possíveis trocas de energia entre fenômenos de distintas faixas espectrais, identificadas com a aplicação da transformada de ondeletas. Inicialmente, a técnica de ondeletas (Torrence e Compo, 1998) foi aplicada à média global da temperatura da superfície do mar com o objetivo de identificar globalmente as escalas de oscilação mais importantes. Posteriormente, o mesmo cálculo foi realizado para a TSM média de grandes áreas oceânicas (trópicos, áreas subtropicais e extratropicais), com o objetivo de se conhecer as principais faixas espectrais para áreas distintas. O cálculo das ondeletas foi efetuado com o uso do software Matlab (versão R2009b) (Torrence e Compo, 1998). Com base na análise inicial, as seguintes escalas de frequência foram estudadas para a TSM mensal: 1 a 12 meses, 1 a 2 anos, 2 a 4 anos, 4 a 8 anos e 8 a 12 anos, como mostram os espectros globais nos quadros do lado direito da Figura 1, na seção de Resultados. Após a identificação das faixas espectrais mais importantes para áreas oceânicas distintas, a transformada de ondeletas foi aplicada aos dados de TSM para todos os pontos de grade geograficamente localizados com o uso do modelo descrito em Torrence e Compo (1998), escrito em linguagem Fortran. Com o objetivo de se evitar o chamado efeito de borda pela aplicação da transformada de ondeletas aos dados (decaimento da função Morlet), capaz de interferir na análise final, tal como discutem Weng e Lau (1994), assim como pensando na qualidade dos dados de TSM do início da série histórica, os primeiros 30 anos foram eliminados dos resultados. Assim, os resultados foram analisados para o período de janeiro de 1884 a dezembro de 2014. A tendência linear e a evolução temporal da variância de TSM para cada uma das faixas de frequência consideradas também foram avaliadas.

Resultados

Os resultados são analisados para o período de janeiro de 1854 a dezembro de 2014, em duas seções distintas: primeiramente, é analisada a variância espectral da TSM para áreas específicas dos oceanos globais, sendo também apresentados os principais modos e as possíveis influências sobre a América do Sul na seção (a). Na seção (b), é analisada a tendência linear da variância de TSM em cada faixa espectral.

Variância espectral de TSM nas áreas oceânicas tropicais, subtropicais e extratropicais

O espectro global de potência da TSM, para o período 1854-2014, nas áreas tropicais (23,5° N-23,5° S), subtropicais (23,5° N-66,33° N) e (23,5° S-66,33° S) e extratropicais (66,33° N-90° N) e (66,33° S-90° S) dos hemisférios sul e norte são mostrados na Figura 1. O cálculo do espectro global, tal como sugerido em vários estudos, Torrence e Compo (1998), Torrence e Webster (1999), Kayano e Andreoli (2004) e Vitorino et al. (2006), permitiu verificar as faixas espectrais mais importantes para cada área oceânica considerada.

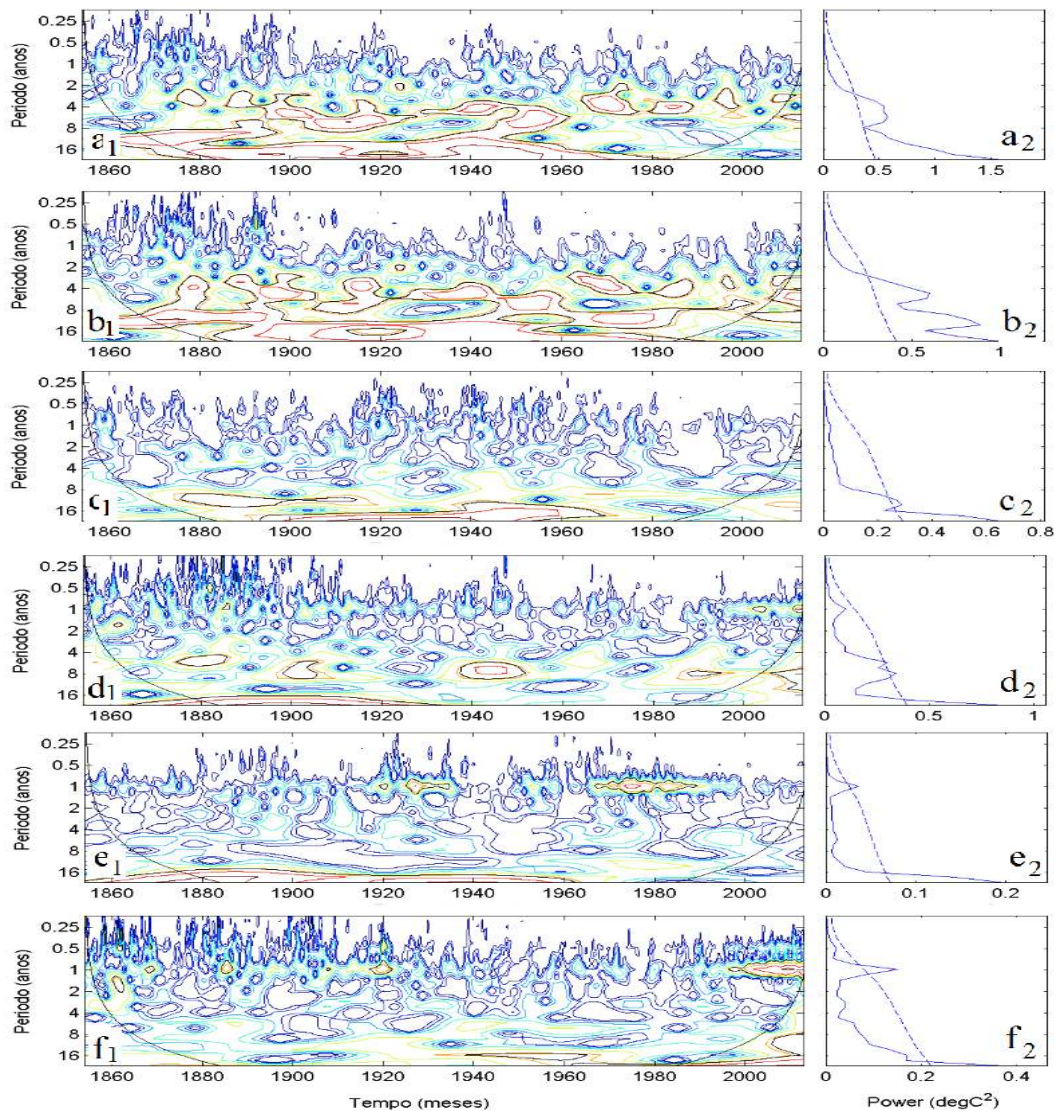


Figura 1: a1) Espectro de potência da TSM média mensal (oC2) nos oceanos tropicais do hemisfério sul, entre janeiro de 1854 e dezembro de 2015. As áreas circuladas com as linhas pretas representam períodos com significância estatística superior a 95% (t-Student). (a2) Espectro de potência global para a TSM dos oceanos tropicais do hemisfério sul para o mesmo período. A linha tracejada azul indica faixas de frequência significativas para o nível de 95%. (b1) e (b2) idem a (a1) e (a2), mas para os oceanos tropicais do hemisfério norte. (c1) e (c2) idem a (a1) e (a2), mas para os oceanos subtropicais do hemisfério sul. (d1) e (d2) idem a (a1) e (a2), mas para os oceanos subtropicais do hemisfério norte. (e1) e (e2) idem a (a1) e (a2), mas para os oceanos extratropicais do hemisfério sul. (f1) e (f2) idem a (a1) e (a2), mas para os oceanos extratropicais do hemisfério norte. As figuras foram elaboradas a partir de scripts de Torrence e Compo (1998).

A interpretação que se pode fazer dos resultados da Figura 1 é relativamente simples. Os painéis mostram quais as faixas espectrais (escalas de oscilação) a variável apresenta sinais mais significativos de variância, considerando-se toda a série temporal. Em estudos geofísicos, o aspecto mais interessante da aplicação da transformada de ondeletas é a possibilidade de se identificar algum fenômeno físico que esteja associado a uma escala de oscilação significativa. A consideração dos valores médios de TSM em grandes áreas oceânicas permite identificar as faixas espectrais mais significativas para cada área. Em grande parte das vezes, fenômenos oceânicos em escalas características estão associados a oscilações climáticas importantes. Assim, como o clima é, em grande parte, controlado pelos oceanos, que detém a maior parte do calor armazenado pelo sistema terra-atmosfera, a compreensão das oscilações oceânicas de forma estratificada torna-se importante.

De forma geral, os resultados espectrais globais de TSM indicam que as faixas latitudinais tropicais, subtropicais e extratropicais dos hemisférios sul e norte apresentam distintos padrões, tanto na média global (quadros à direita da Fig. 1) como na evolução mensal (quadros à esquerda da Fig. 1). Comparando-se os sinais espectrais da TSM nas faixas tropicais sul e norte (Fig. 1a2, 1b2), é possível notar que são mais significativos nas faixas de oscilações com periodicidades superiores a dois anos. A evolução temporal da variância da TSM para esta mesma faixa tropical (Fig. 1a1 e 1b1) indica que os períodos com valores significativos ocorrem mais frequentemente no hemisfério norte. Modos de variabilidade tropical que podem estar associados à periodicidade maior do que dois anos são, por exemplo, o fenômeno ENOS (Trenberth, 1997, McPhaden, 1997, An e Wang, 2000), a Oscilação de Dipolo no Índico Tropical (Saji, et al., 1999; Webster, et al., 1999, Saji e Yamagata, 1999), medida pelo Índice de Oscilação de Dipolo (IOD), o Indian Ocean basin-wide (IOBW), ou superaquecimento das águas tropicais do Índico (Taschetto e Ambrizzi, 2012) e o Gradiente Meridional do Atlântico Tropical (Pike, 1971; Hastenrath e Heller, 1977 e Moura e Shukla, 1981).

O ENOS, apesar de ser caracterizado desde o início da década de 1980, como um fenômeno muito mais de baixa frequência (com oscilações entre 4-6 anos ou de até 8 anos) (Trenberth, 1997, McPhaden, 1997, An e Wang, 2000), em períodos anteriores, entre 1963 e 1975, por exemplo, já foi considerado como fenômeno de frequências mais altas, com oscilações de 2 a 4 anos, como destacam An e Wang (2000). Esta alteração na escala de

oscilação teria ocorrido após a década de 1970, como destacado por Setoh et al. (1999). O ENOS é o principal modo de variabilidade climática tropical (McPhaden, 1999) e, portanto, um dos fenômenos climáticos que mais promove mudanças na circulação atmosférica de grande escala, e, assim, alterações na distribuição de chuva e temperatura. Nas mais diversas áreas do conhecimento, a organização do espaço geográfico vem sendo associada aos impactos do fenômeno ENOS. Exemplo deste aspecto pode ser visto no trabalho de Berlato et al., (2005) que associou a ocorrência de ENOS à produtividade do milho no sul do Brasil. Alberto et al. (2006) verificaram a importância de eventos ENOS como fenômeno responsável pela disponibilidade hídrica no solo ao rendimento das culturas de soja, milho e trigo no Rio Grande do Sul. Na Geografia, estudos que consideram a importância do ENOS na variabilidade climática regional também vêm sendo desenvolvidos (Costa et al., 2007 e Silva e Silva, 2016). A Figura 2, original de Silva e Silva (2016), permite comparar as anomalias de precipitação sobre a América do Sul para períodos constituídos por episódios de El Niño, La Niña e períodos constituídos por anos neutros, entre 1978 e 2005. É clara a associação entre ocorrência de EN e a intensificação da chuva na região sudeste da América do Sul e sua redução na região norte. Anos classificados como neutros, sem ocorrência de eventos ENOS, não indicam regiões com anomalias predominantes (Fig. 2c). Com isso, verifica-se a importância desses modos de variabilidade tropical nos campos de precipitação da América do Sul, e em análises da climatologia geográfica, uma vez que este elemento do clima desempenha um importante papel na organização dos espaços urbanos e rurais brasileiros (Monteiro, 1976).

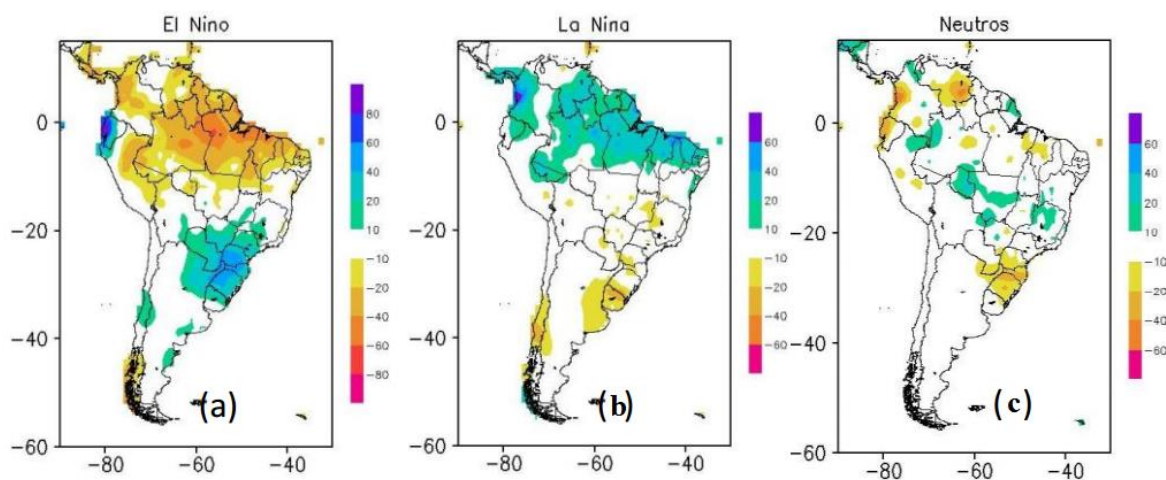


Figura 2: Anomalia absoluta da precipitação mensal (mm mês^{-1}) na América do Sul para eventos (a) EN, (b) LN e (c), entre 1978 e 2005. Fonte: Silva e Silva (2016).

Adicionalmente aos eventos ENOS, outros modos de variabilidade climática destacam-se, por exemplo, no oceano Índico, como é o caso da Oscilação do Índico tropical (IOD) que apresenta, variabilidade interanual de 2 a 5 anos (Saji et al., 1999; Webster et al. 1999 e Yamagata et al., 2003) e o super aquecimento das águas tropicais do Índico, conhecido como IOBW, caracterizado por uma oscilação de aproximadamente três anos (Chu et al., 2014), e por constituir resposta remota ao evento El Niño (Klein et al., 1999). Estes modos de variabilidade do Índico vêm sendo mais explorados na área de Meteorologia. Saji et al. (2005) e Taschetto e Ambrizzi (2012) destacaram o importante papel de ambos, respectivamente, nos campos de temperatura do ar (Fig. 3a) e precipitação (Fig. 3b) na América do Sul. Os resultados da pesquisa de Saji et al. (2005) destacam que as temperaturas sobre o sul-sudeste da América do Sul seriam anormalmente mais altas durante a fase positiva do IOD (Figura 3a). A fase positiva (negativa) do IOD é marcada quando a TSM sobre o oceano Índico equatorial oriental (ocidental) é mais baixa (alta) que a climatologia e a convecção na região, suprimida (reforçada). Com relação ao IOBW, Taschetto e Ambrizzi (2012) mostram que a fase positiva (negativa) do IOBW está associada a anomalia positiva de precipitação na região sudeste da América do Sul e, negativa na região norte (Fig. 3b), indicando um padrão bipolar. Os resultados relativos à variabilidade da temperatura do ar e da precipitação sinalizam a influência que anomalias da TSM do Índico tropical podem exercer no clima da América do Sul. A variabilidade da TSM no Índico e sua influência na América do Sul ilustram a necessidade de estudos mais apropriados para o entendimento de fenômenos climáticos associados a distintas faixas espectrais.

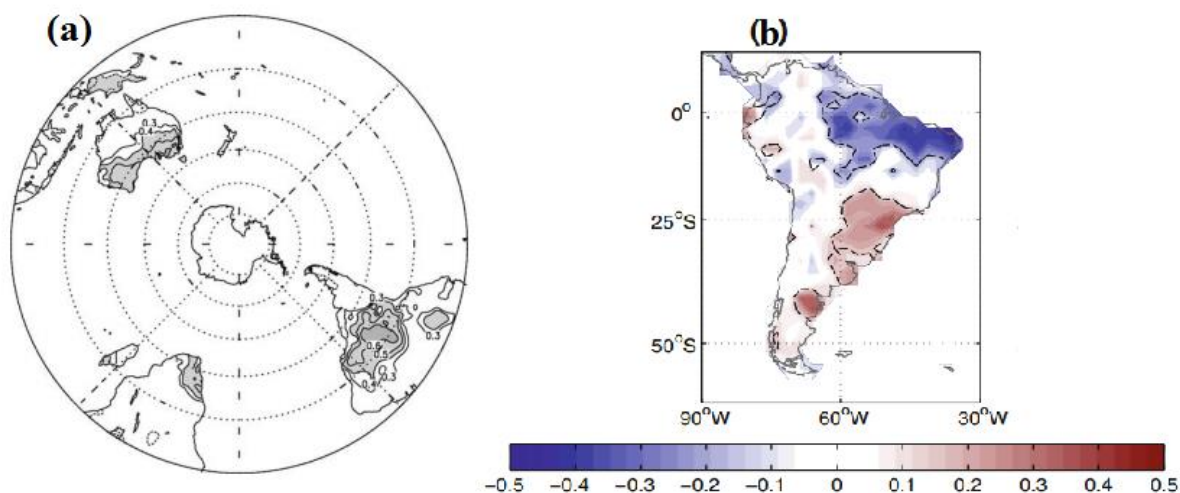


Fig. 3 (a) Correlação linear entre o índice do dipolo do Índico (IOD) e temperatura do ar (1958-1999). Fonte: Saji et al. (2005). (b) Correlação linear entre o IOD e precipitação na América do Sul (1951-2004). Fonte: Taschetto e Ambrizzi (2012)

O Gradiente Meridional do Atlântico Tropical constitui outro importante modo de variabilidade climática nas escalas interanual e decadal. (Andreoli e Kayano, 2004; Kayano e Andreoli, 2004 e Wagner, 1996). É fundamental no controle de períodos mais secos e mais úmidos no norte e nordeste da América do Sul e Caribe (Nobre e Shukla, 1996; Carton et al., 1996; Wagner, 1996; Kayano e Andreoli, 2004).

A variância da TSM das áreas oceânicas subtropicais do hemisfério sul e norte (Figuras 1c1;d1) apresentam valores menores do que os relativos à faixa tropical (Figuras 1a1;b1). A variância global da TSM na faixa subtropical (Figuras 1c2;d2) indica que fenômenos com oscilações nos intervalos 4-9 e 8-12 anos, e oscilações com periodicidades superiores a 16 anos, porém com sinais fora do cone de influência, são os mais significativos para o hemisfério norte e sul, respectivamente. A Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação do Atlântico Norte (OAN) apresentam oscilações características na escala multidecadal (Mantua e Hare, 2002 e Rogers, 1984). A OAN é marcada pela diferença de pressão entre a alta pressão na região dos Açores (próximo a 30° N) e a baixa pressão da Islândia (próximo a 60° N), tendo sido originalmente descrita por Walker (1924), na década de 1920. Hurrell e van Loon (1997) descrevem a OAN como um modo de variabilidade com variações em múltiplas escalas de tempo entre 6 e 10 anos. Por outro lado, Latif e Barnett (1994), a partir da identificação da diferença de TSM entre os pontos definidos pelas coordenadas (150° E; 25°N) e (180°; 35°N), na bacia do Pacífico Norte, sugerem que a ODP seja um modo de variabilidade multidecenal. Mantua e Hare (2002) descrevem esta

oscilação como um modo de variabilidade climática com oscilações entre 15 e 25 anos. Newman et al. (2003) sugerem haver fortes ligações da ODP com a variabilidade de eventos ENOS.

Estudos recentes têm mostrado os efeitos da ODP na variabilidade climática de diversas regiões da América do Sul (Robertson e Mechoso 2000; Marengo 2004; Kayano e Andreoli, 2004; Silva e Silva, 2016; Silva et al. 2016; Nascimento Junior e Sant'Anna Neto, 2015). Associações entre as fases deste modo de variabilidade decenal e a precipitação mensal da América do Sul podem ser vistas nos estudos de Silva e Silva (2016) e Silva et al. (2016), reproduzidas aqui na Figura 4. É possível observar que durante as fases negativas (positiva) da ODP, as anomalias de precipitação são negativas (positivas, Fig. 4b) no centro-leste da América do Sul (área marcada pelo retângulo preto). A região sudeste da América do Sul, que inclui o sul do Brasil, apresenta anomalias de precipitação com sinal contrário nas três fases consideradas da ODP. Esse padrão bipolar da precipitação sobre o centro-leste da América do Sul caracteriza a influência da ODP e contribui para explicar as causas do período seco observado entre 2014 e 2015 (Coelho et al., 2015).

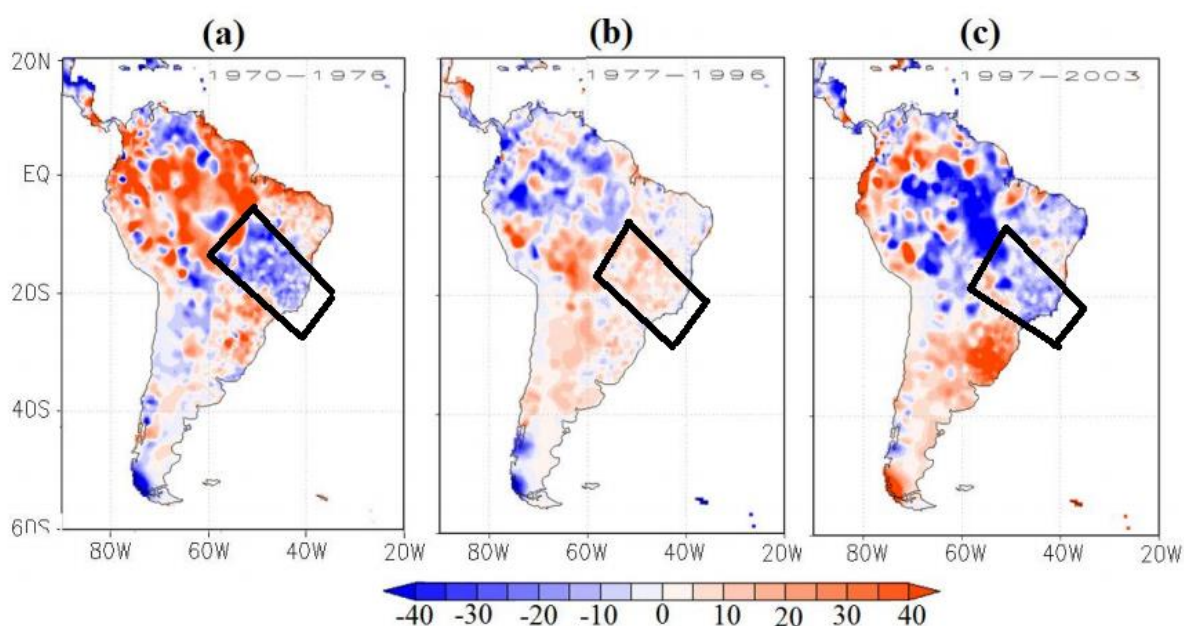


Fig.4 Anomalia média da precipitação mensal (mm) do GPCP filtrada (Lanczos - passa baixo) para as fases (a) negativa (a); (b) positiva e (c) negativa da ODP, entre 1970 e 2003. Fonte: Silva e Silva (2016) (retângulos adaptados dos originais dos autores).

As oscilações de TSM nas regiões extratropicais, em ambos os hemisférios, parecem ter mais importância nas escalas intrasazonal, interanual e superior a 16-17 anos (porém fora do cone de influência) o que pode ser visto pelo espectro global (Figuras 1e2;f2) assim como

pela evolução temporal da variância (Figuras 1e1.f1). Como oscilações significativas com periodicidades superiores a 16-17 anos ocorrem na região do espectro em que o cone de influência é mais estreito, sugerimos que as oscilações nas escalas intrasazonal e interanual devem ser as mais importantes para a faixa extratropical, tal como também indicado por Carpenedo e Ambrizzi (2016).

As escalas de oscilação mais importantes detectadas através da aplicação da transformada de ondeletas no valor médio da TSM para grandes áreas oceânicas, tal como o ilustrado na Fig. 1, são as seguintes: 4-19 meses, 2-4 anos, 4-8 anos e superior a 8 anos. Estas faixas coincidem com os principais resultados obtidos em outros estudos, como os de Torrence e Compo (1998), Torrence e Webster (1999), Setoh et al., (1999) e Kayano e Andreoli (2004), para a descrição dos principais modos de variabilidade de interação oceano-atmosfera em que os fenômenos ENOS, IOD, IOBW, gradiente meridional do Atlântico Tropical e PDO são considerados. Assim, o conhecimento de oscilações particulares a distintos fenômenos climáticos permite, em última análise, aumentar a previsibilidade do clima. A tendência linear da variância da TSM é um aspecto adicional que se pode avaliar.

Tendência linear da variância espectral da TSM

A análise da tendência linear média global da variância de TSM, entre janeiro de 1884 e dezembro de 2014, para as distintas faixas espectrais consideradas foi usada para revelar a perda ou ganho de energia ao longo do tempo. As faixas de fenômenos com oscilações mais rápidas, 1-12 meses, 1-2 anos e 2-4 anos, apresentam tendência negativa no decorrer do tempo, enquanto que as faixas espectrais caracterizadas por oscilações mais lentas, 4-8 anos e 8-12 anos, apresentam tendência positiva ao longo do tempo, tal como mostrado na Figura 5. Assim, pode-se dizer que, ao longo da série temporal analisada, os fenômenos com oscilações mais rápidas de TSM têm sido menos energéticos, enquanto que os fenômenos com oscilações mais lentas, mais energéticos. Este aspecto sugere a ocorrência de transporte de energia entre fenômenos de diferentes faixas espectrais, neste caso, de fenômenos mais rápidos para os mais lentos. Assim, a tendência de aumento de energia nas faixas espectrais de mais baixa frequência (4-8 e 8-12 anos) sugere a permanência mais prolongada de padrões climáticos característicos destas escalas, o que estaria associado a uma inércia maior do clima. Em contrapartida, o decréscimo de energia associado a

oscilações de mais alta frequência sugere que padrões associados a estas escalas estariam se tornando menos frequentes. Entretanto, é necessário considerar que a troca de energia da camada superficial dos oceanos também pode ser realizada em relação a outros corpos, como as águas oceânicas de camadas mais profundas e a atmosfera.

A análise da distribuição espacial global da tendência linear da variância de TSM (Figura 6a) para oscilações na escala de 1 a 12 meses indica que, apesar da maior parte dos oceanos apresenta sinal negativo, fazendo com que a média global seja negativa, existem várias áreas espalhadas pelas bacias oceânicas com tendência positiva. O Pacífico Norte e o Atlântico Sul são bacias que apresentam sinais de aumento da energia espectral nesta faixa de oscilação, de 1 a 12 meses, em vários dos subperíodos considerados (figuras não mostradas neste estudo). Outras áreas que apresentam aumento de energia para oscilações mais rápidas, de 1 a 12 meses, são encontradas nas regiões extratropicais dos oceanos Pacífico e Índico, entre 1904-1924 e 1924-1944.

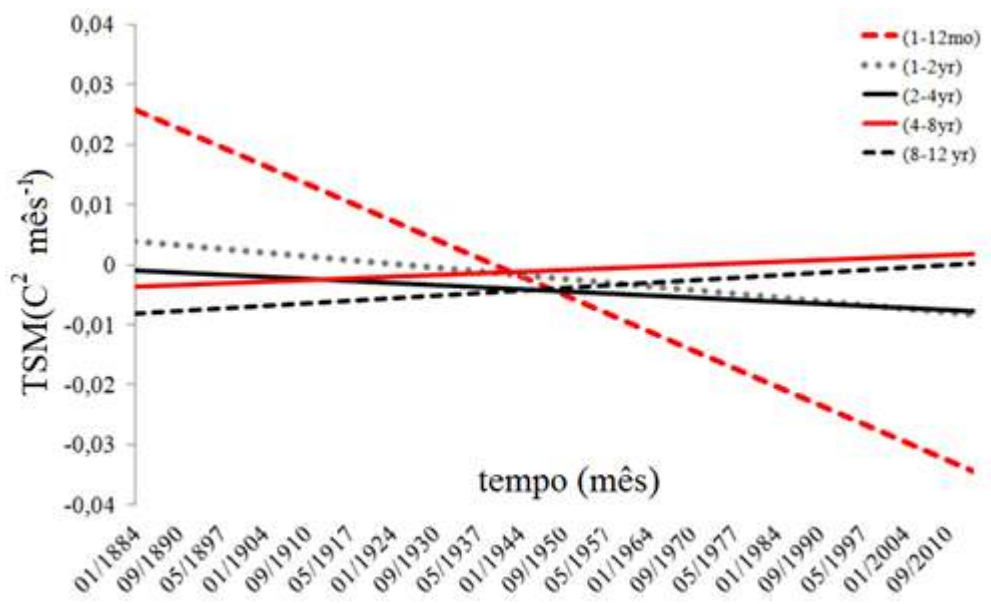


Fig. 5 Tendência linear média global da variância de TSM ($C^2 \text{ mês}^{-1}$) para oscilações de 1 a 12 meses (linha vermelha tracejada), de 1 a 2 anos (linha pontilhada vermelha), de 2 a 4 anos (linha contínua preta), de 4 a 8 anos (linha contínua vermelha) e de 8 a 12 anos (linha tracejada preta), entre janeiro de 1884 a dezembro de 2014.

A tendência linear na região do ENOS é mais homogeneamente definida para oscilações de 1 a 2 anos (Figura 6b), de 2 a 4 anos (Figura 6c) e de 4 a 8 anos (Figura 6d), faixas em que o fenômeno é mais bem caracterizado. Apesar de, na média global, a variância da TSM para a faixa espectral de 1 a 2 anos apresentar tendência negativa (Figura 5), observa-se diferenças

marcantes entre as latitudes extratropicais e equatoriais, principalmente para o oceano Pacífico: a tendência linear negativa para as oscilações de 1 a 2 anos cobre áreas maiores nas faixas extratropicais do Pacífico, enquanto que o Pacífico Equatorial apresenta tendência positiva para esta escala de oscilação (Fig. 6b). As contribuições de Timmermann et al. (1999), Jin et al. (2001), Jin et al. (2003), An e Jin (2004), Wang e Picaut (2004), Okumura e Deser (2010) são exemplos de estudos que analisam os sinais de ENOS no período de 1980 a 2000, indicando a intensificação de eventos El Niño (EN), o que pode explicar, em parte, a intensificação média da variância de TSM ao longo do período considerado (Figura 6b). A maior parte das áreas extratropicais do Pacífico Sul e Norte e da bacia do Atlântico Sul contribuem para o valor médio global negativo da tendência linear das oscilações de 1 a 2 anos, para o período analisado (Figura 6b).

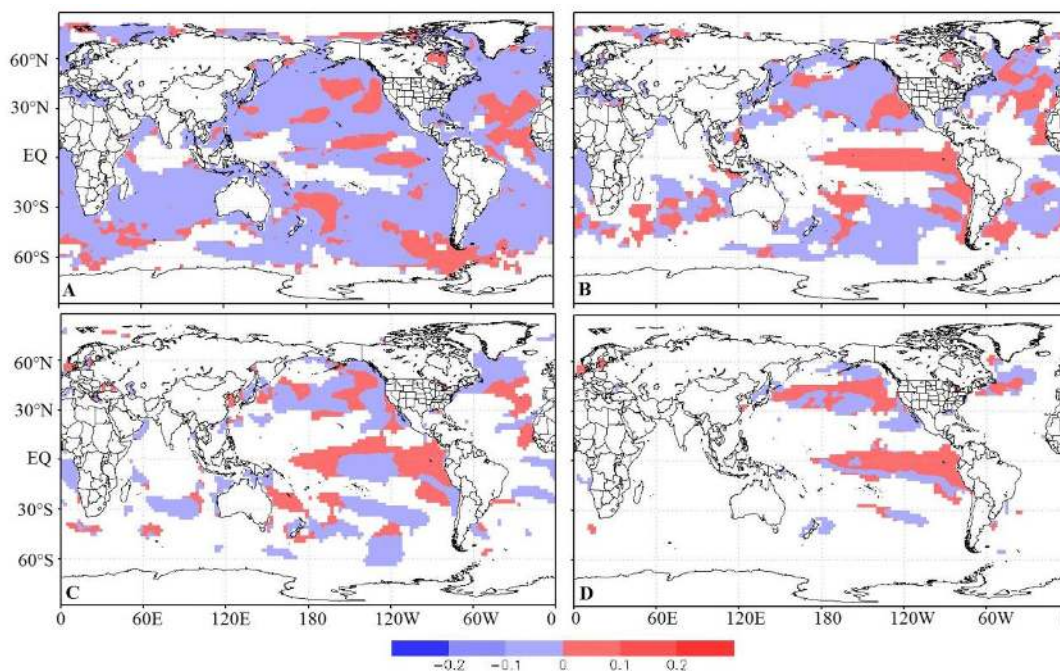


Fig. 6 (a) Distribuição global da tendência linear da variância de TSM ($C2 \text{ mês}^{-1}$) para as faixas espectrais de (a) 1 a 12 meses, de (b) 1 a 2 anos, de (c) 2 a 4 anos e de (d) 4 a 8 anos, de janeiro de 1884 a dezembro de 2014. São plotados os valores de tendência linear com significância estatística (t-student) superior a 95%.

Considerando-se que a variância da TSM relativa às faixas espectrais de oscilações mais rápidas (1-12 meses, 1-2 anos e 2-4 anos) mostram decréscimos de seus valores globais, enquanto que a respectiva às faixas espectrais mais lentas (4-8 e 8-12 anos) evidencia aumento de seu valor ao longo da série temporal analisada (Figuras 5,6), é possível sugerir que o sistema climático, ao longo da série temporal considerada, tem se comportado de

forma a privilegiar as oscilações de mais baixa frequência, o que é o mesmo que dizer que padrões climáticos mais duradouros passam a ter papel mais importante no clima global.

A tendência linear da variância da TSM associada à faixa espectral de 2-4 anos mostra sinais negativos em regiões extratropicais das bacias do Pacífico Sul e Norte, Atlântico Norte e em regiões mais centrais da bacia equatorial do Pacífico (Figura 6c), para todo o período analisado, contribuindo para o valor médio global negativo. Contudo, na região equatorial do Pacífico, observam-se tendências positivas de energia em áreas mais próximas à costa oeste da América do Sul (regiões de Niño1+2 e Niño3), em todo o período, de 1884 a 2014 (figura não mostrada). É possível verificar o predomínio de sinais negativos da tendência de energia na região equatorial do Pacífico em diferentes subperíodos.

A tendência linear da variância da TSM associada às oscilações de 4 a 8 anos indica o predomínio de sinais positivos na faixa equatorial do Pacífico e sinais positivos e negativos na bacia do Pacífico Norte no período considerado (Figura 6d). As áreas do Índico e Atlântico apresentam baixa amplitude energética nesta faixa de frequência se comparadas às áreas do Pacífico.

Considerações finais

A análise da variância espectral da TSM global ao longo do período de 1884 a 2010, através da aplicação da transformada de ondeletas, permitiu identificar importantes modos da variabilidade da superfície dos oceanos. As faixas que apresentam maior variância são: 1 a 12 meses, 1 a 2, 2 a 4, 4 a 8 e 8 a 12 anos. A identificação da tendência linear da variância de TSM nas várias faixas espectrais consideradas nesse estudo revelou que os fenômenos na superfície dos oceanos caracterizados por oscilações mais rápidas (1-12 meses, 1-2 anos e 2-4 anos) têm se tornado, ao longo da série temporal considerada, cada vez menos energéticos, ao passo que os fenômenos caracterizados por oscilações mais lentas (4-8 e 8-12 anos) têm se tornado mais energéticos. Este resultado permite sugerir que fenômenos climáticos de frequências mais baixas, por exemplo, eventos ENOS com periodicidades maiores, vêm se tornando cada vez mais frequentes, assim como ressaltam Timmermann et al. (1999), enquanto eventos ENOS associados a frequências mais altas, com periodicidades características inferiores a 2-4 anos, como registrado antes da década de 1970, vêm se tornando cada vez menos frequentes. Os resultados sugerem também que o aumento e a

diminuição da variância de TSM, ao longo do tempo, para fenômenos mais lentos e mais rápidos sejam resultantes das trocas de energia entre fenômenos de diferentes escalas. A identificação de padrões climáticos sobre a América do Sul para subperíodos em que escalas de frequência apresentem maiores valores de variância da TSM constitui um tema a ser desenvolvido futuramente.

Agradecimentos

Agradecemos às professoras Lígia Vizeu Barrozo e Bianca Carvalho Vieira, coordenadoras do Programa de Pós-Graduação em Geografia da USP pela iniciativa em promover o I Workshop associado ao Programa, visando a realização de debates e trocas científicas. Agradecemos, também, ao professor Alfredo Pereira de Queiroz Filho pela oportunidade de publicação dos resultados deste estudo no Boletim Paulista de Geografia, assim como ao revisor pelas sugestões feitas. O primeiro autor agradece o suporte financeiro efetuado pela CAPES.

Referências bibliográficas

- ALBERTO, Cleber Maus et al. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1067-1075, 2006.
- AN, S. I; JIN, F. F. Nonlinearity and Asymmetry of ENSO. **Journal of Climate**, 17(12), 2399-2412, 2004.
- AN, S. I; WANG, B. Interdecadal Change of the Structure of the ENSO Mode and Its Impact on the ENSO Frequency. **Journal of Climate**, 13(12), 2044-2055, 2000.
- ANDREOLI, Rita Valéria; KAYANO, Mary Toshie. Multi-scale variability of the sea surface temperature in the Tropical Atlantic. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 109, n. C5, 2004.
- BERLATO, Moacir Antonio; FARENZENA, Homero; FONTANA, Denise Cybis. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 5, p. 423-432, 2005.
- BÖTTINGER, JH; MIKOLAJEWICZ, M.U; SCHEUERMANN, G. Visual exploration of climate variability changes using wavelet analysis. **Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on**, 15(6), 1375-1382. 2009.
- CHU, Jung-Eun et al. Future change of the Indian Ocean basin-wide and dipole modes in the CMIP5. **Climate dynamics**, v. 43, n. 1-2, p. 535-551, 2014.
- CARPENEDO, Camila Bertoletti; AMBRIZZI, Tércio. Células de Circulação Meridional Durante os Eventos Extremos de Gelo Marinho Antártico. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 251-261, Sept. 2016. Available from

- <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862016000700251&lng=en&nrm=iso>. access on 12 Nov. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631320150137>.
- CARTON, James A. et al. Decadal and interannual SST variability in the tropical Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v. 26, n. 7, p. 1165-1175, 1996.
- COELHO, Caio AS et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, p. 1-16, 2015.
- COOK, Edward R.; D'ARRIGO, Rosanne D.; BRIFFA, Keith R. A reconstruction of the North Atlantic Oscillation using tree-ring chronologies from North America and Europe. **The Holocene**, v. 8, n. 1, p. 9-17, 1998.
- COSTA, Eduino Rodrigues; SARTORI, Maria da Graça Barros; FANTINI, Vanessa. Estudo da relação entre eventos El Niño-La Niña e ocorrência de ondas de frio na região de Santa Maria-RS. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 33, n. 1. 2007
- FARGE, M., Wavelet transforms and their applications to turbulence. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Palo Alto, v.24, p.395-457, 1992.
- GU, D.; PHILANDER, S. Secular changes of annual and interannual variability in the Tropics during the past century, **Journal of Climate**, 8, 864- 876, 1995.
- HASTENRATH, Stefan; HELLER, Leon. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 435, p. 77-92, 1977.
- HEWITT, Edwin; HEWITT, Robert E. The Gibbs-Wilbraham phenomenon: an episode in Fourier analysis. **Archive for history of Exact Sciences**, v. 21, n. 2, p. 129-160, 1979.
- HURRELL, James W.; VAN LOON, Harry. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. In: **Climatic Change at High Elevation Sites**. Springer Netherlands, 1997. p. 69-94.
- JIN, Fei-Fei *et al.* Strong El Nino events and nonlinear dynamical heating. **Geophysical research letters**, v. 30, n. 3, 2003.
- KAYANO, Mary Toshie; ANDREOLI, Rita Valéria. Decadal variability of northern northeast Brazil rainfall and its relation to tropical sea surface temperature and global sea level pressure anomalies. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 109, n. C11, 2004.
- KANG, S.; LIN, H. Wavelet analysis of hydrological and water quality signals in an agricultural watershed. **Journal of Hydrology**, 338(1), 1-14, 2007.
- KLEIN, Stephen A.; SODEN, Brian J.; LAU, Ngar-Cheung. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge. **Journal of Climate**, v. 12, n. 4, p. 917-932, 1999.
- LATIF, Mojib; BARNETT, Timothy P. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. **Science**, v. 266, n. 5185, p. 634-637, 1994.
- LAU, K. M.; WENG, H. Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 76(12), 2391-2402, 1995.
- LABAT, D., RONCHAIL, J., CALLEDE, J., GUYOT, J. L., DE OLIVEIRA, E; GUIMARÃES, W. (2004). Wavelet analysis of Amazon hydrological regime variability. **Geophysical Research Letters**, 31(2), 2004.

- MCPHADEN, Michael J. Genesis and evolution of the 1997-98 El Niño. **Science**, v. 283, n. 5404, p. 950-954, 1999.
- MAK, M. Orthogonal wavelet analysis: Interannual variability in the sea surface temperature. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 76(11), 2179-2186, 1995.
- MANTUA, Nathan J.; HARE, Steven R. The Pacific decadal oscillation. **Journal of oceanography**, v. 58, n. 1, p. 35-44, 2002.
- MONTEIRO, C.A.F. O clima e a organização do espaço no estado de São Paulo: problemas e perspectivas. São Paulo: IGEOG, 1976.
- MORLET, Jean. Sampling theory and wave propagation. In: **Issues in Acoustic Signal—Image Processing and Recognition**. Springer Berlin Heidelberg, 1983. p. 233-261.
- MARENGO, J. A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. **Theoretical and applied climatology**, v. 78, n. 1-3, p. 79-96, 2004.
- MORETIN, P.A. **Ondas e Ondaletas: da análise de Fourier à análise de ondaletas de séries temporais**. Edusp, 2014. p.305.
- MOURA, Antonio D.; SHUKLA, Jagadish. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.
- NASCIMENTO JÚNIOR, L e SANT'ANNA NETO, João Lima. Contribuição aos estudos da precipitação no estado do Paraná: a oscilação decadal do Pacífico-ODP. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 35, p. 314-343.
- NEWMAN, M., COMPO, G. P.; ALEXANDER, M. A. ENSO-forced variability of the Pacific decadal oscillation. **Journal of Climate**, 16(23), 3853-3857, 2003.
- NOBRE, Paulo; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, n. 10, p. 2464-2479, 1996.
- OKUMURA, Yuko M. *et al.* A proposed mechanism for the asymmetric duration of El Niño and La Niña. **Journal of climate**, v. 24, n. 15, p. 3822-3829, 2011.
- PIKE, Arthur C. Intertropical convergence zone studied with an interacting atmosphere and ocean model. **Mon. Wea. Rev**, v. 99, p. 469-477, 1971.
- ROBERTSON, Andrew W.; MECHOSO, Carlos R. Interannual and interdecadal variability of the South Atlantic convergence zone. **Monthly weather review**, v. 128, n. 8, p. 2947-2957, 2000.
- ROGERS, Jeffery C. The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the northern hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 112, n. 10, p. 1999-2015, 1984.
- SAJI, N. H. *et al.* A dipole mode in the tropical Indian Ocean. **Nature**, v. 401, n. 6751, p. 360-363, 1999.
- SAJI, N. H.; YAMAGATA, T. Structure of SST and surface wind variability during Indian Ocean Dipole mode events: COADS observations*. **Journal of Climate**, v. 16, n. 16, p. 2735-2751, 2003.
- SAJI, N. H.; AMBRIZZI, T.; FERRAZ, S. E. T. Indian Ocean Dipole mode events and austral surface air temperature anomalies. **Dynamics of atmospheres and oceans**, v. 39, n. 1, p. 87-101, 2005.

SETOH, T., IMAWAKI, S., OSTROVSKII, A.; UMATANI, S. I. Interdecadal variations of ENSO signals and annual cycles revealed by wavelet analysis. **Journal of Oceanography**, 55(3), 385-394, 1999.

SILVA, Elaine Rosângela Leutwiler Di Giacomo; SILVA, Maria Elisa Siqueira. Memória de eventos de ENOS na precipitação da América do Sul. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 30, p. 34-55, 2016.

SILVA, Carlos Batista; SILVA, Maria Elisa Siqueira; AMBRIZZI, Tércio. Climatic variability of river outflow in the Pantanal region and the influence of sea surface temperature. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1-13, 2016.

SILVA, Maria Elisa Siqueira; SILVA, Carlos Batista. Influência da oscilação decadal do Pacífico e do padrão Pacific South America no clima da América do Sul para o período de 1970 a 2003. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, 2016.

TASCETTO, Andréa S.; AMBRIZZI, Tercio. Can Indian Ocean SST anomalies influence South American rainfall?. **Climate dynamics**, v. 38, n. 7-8, p. 1615-1628, 2012.

TIMMERMANN, A., OBERHUBER, J., BACHER, A., ESCH, M., LATIF, M.; ROECKNER, E. Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. **Nature**, 398(6729), 694-697, 1999.

TORRENCE, C.; COMPO, G.P. A practical guide to wavelet analysis, **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, 79, 61-78, 1998

TORRENCE, C.; WEBSTER, P. J.. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system. **Journal of Climate**, 12(8), 2679-2690, 1999.

TRENBERTH, Kevin E.; HOAR, Timothy J. El Niño and climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 23, p. 3057-3060, 1997.

VITORINO, M. I., DA SILVA DIAS, P. L.; FERREIRA, N. J. Observational study of the seasonality of the submonthly and intraseasonal signal over the tropics. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 93(1-2), 17-35, 2006.

WAGNER, Richard G.; DA SILVA, Arlindo M. Surface conditions associated with anomalous rainfall in the Guinea coastal region. **International Journal of Climatology**, v. 14, n. 2, p. 179-199, 1994.

WAGNER, Richard G. Decadal-scale trends in mechanisms controlling meridional sea surface temperature gradients in the tropical Atlantic. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 101, n. C7, p. 16683-16694, 1996.

WALKER, GT. Correlation in seasonal of weather. *Memoirs of the India Meteorological Department*. V. XXIX. 1924

WANG, Chunzai; PICAUT, Joël. Understanding ENSO physics—A review. **Earth's Climate**, p. 21-48, 2004.

WEBSTER, Peter J. et al. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98. **Nature**, v. 401, n. 6751, p. 356-360, 1999.

WENG, Hengyi; LAU, K. M. Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 51, n. 17, p. 2523-2541, 1994.

WHITCHER, Brandon; GUTTORP, Peter; PERCIVAL, Donald B. Wavelet analysis of covariance with application to atmospheric time series. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. D11, p. 941-962, 2000.