Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>

Influência dos Diferentes Tipos do Fenômeno El Niño na Precipitação da América do Sul

Michelle Simões Reboita¹, Kelvem Rodrigo de Oliveira², Pedro Ygor Carvalho Corrêa² e Renan Rodrigues²

¹ Dra. em Meteorologia, Professora, Pesquisadora, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. reboita@unifei.edu.br. ² Graduandos em Ciências Atmosféricas na UNIFEI

Artigo recebido em 15/08/2020 e aceito em 20/04/2021

RESUMO

Nesse estudo foi aplicada uma metodologia de classificação dos eventos de El Niño em seus diferentes tipos (Central, Leste e, quando ambos ocorrem concomitantemente, MIX) no período de janeiro de 1950 a março de 2019. Além disso, os tipos de El Niño foram separados por estação do ano e considerando as diferentes condições de anomalias de temperatura da superfície do mar no oceano Atlântico Tropical Sul (neutras quando ocorrem anomalias de temperatura entre -0,5° e 0,5°C; quentes quando as anomalias são superiores a 0,5°C e frias quando as anomalias são inferiores a -0,5°C). Com base nas combinações de ocorrência de cada tipo de EN e anomalias de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical Sul, foram determinadas as anomalias de precipitação na América do Sul. Os diferentes tipos de El Niño são mais frequentes quando há condições neutras no Atlântico Tropical Sul. Com relação às anomalias de precipitação na América do Sul, os eventos de El Niño Leste e MIX, em geral, mostram padrão similar na distribuição espacial das anomalias, mas com os eventos MIX mostrando sinal mais fraco. As anomalias de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical Sul quando negativas ajudam a fortalecer as condições secas entre o norte das regiões norte e nordeste do Brasil propiciadas pelos eventos de El Niño.

Palavras-chave: circulação atmosférica, condições anômalas, oceanos tropicais, climate

Influence of the Different Types of El Niño in the Precipitation over South America

ABSTRACT

In this study, a specific methodology was applied to classify El Niño events into their different types (Central, East and when both occur at the same time, MIX) from January 1950 to March 2019. In addition, the types of El Niño were separated by season and considering the conditions of sea surface temperature anomalies on the South Tropical Atlantic Ocean (neutrality: temperature anomalies between -0.5° and 0.5°C, warm: anomalies above 0.5°C and cold: anomalies below -0.5°C). Based on in the combination of different types of El Niño and sea surface temperature anomalies on the South Atlantic Tropical Ocean, precipitation anomalies over South America were computed. The different types El Niño occur, in general, under neutral conditions on the Atlantic Ocean. The events of El Niño - East and MIX, in general, present a similar pattern in the spatial distribution of the precipitation anomalies over South America, but with the MIX events showing weaker signal. Sea surface temperature anomalies in the Tropical South Atlantic when negative, they help to strengthen the dry conditions between the north of the north and northeast regions of Brazil caused by the El Niño events.

Keywords: atmospheric circulation, anomaly conditions, tropical oceans, climate

Introdução

O fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um dos principais modos de

variabilidade climática no globo em escala interanual, isto é, periodicidade de 2 a 7 anos (Rasmusson e Carpenter, 1982; Philander 1990;

Trenberth 1997; Reboita e Santos, 2015; Andreoli et al., 2016; Kayano et al., 2016; Pereira et al., 2017). O ENOS corresponde a um acoplamento entre o oceano e a atmosfera através de anomalias na temperatura da superfície do mar (TSM) no oceano Pacífico Tropical Central-Leste e de anomalias na pressão atmosférica.

A componente oceânica do ENOS é chamada de El Niño (EN) ou La Niña (LN). Se há aquecimento anômalo das águas do oceano Pacífico Tropical Central-Leste o fenômeno é chamado de EN e é conhecido como a fase quente do ENOS. Em situação de resfriamento anômalo, tem-se a LN, que é conhecida como a fase fria do ENOS. Já a componente atmosférica é a Oscilação Sul, que é basicamente uma “gangorra” na pressão atmosférica. A pressão é medida em duas localidades: Taiti (Pacífico Central-Leste) e Darwin (Pacífico Oeste). Em eventos de EN a pressão é menor na região do Taiti e maior em Darwin, enquanto que em episódios de LN o padrão é oposto. Até hoje ainda não se conhecem os processos físicos que causam as anomalias no oceano-atmosfera que conduzem aos eventos ENOS.

Uma vez estabelecido um evento ENOS esse afeta a circulação atmosférica global causando anomalias na precipitação e temperatura em diferentes locais no planeta, como na América do Sul (AS). De forma geral, um evento EN é responsável pelo aumento da precipitação no sul do Brasil e estiagem na Amazônia e litoral norte das regiões norte e nordeste do Brasil, enquanto que condições opostas são registradas em eventos de LN (Cai et al., 2020).

Ashok et al. (2007) mostraram que o ENOS poderia ter uma segunda configuração além daquela em que o aquecimento/resfriamento anômalo da TSM ocorre no Pacífico Leste e se expande para oeste (ENOS clássico ou canônico; Rasmusson e Carpenter, 1982). Ashok et al. (2007) mostraram que há um tipo de ENOS em que as anomalias de TSM ocorrem no Pacífico Central, em geral, rodeadas a leste e oeste por anomalias de sinal oposto. Esse tipo de ENOS recebeu o nome de Modoki, que significa “pseudo” em japonês (Seow, 2018). Vários autores como, por exemplo, Ashok et al. (2007, 2009), Trenberth e Smith (2006), Xie et al. (2012), Andreoli et al. (2016), Tedeschi et al. (2013, 2016), Viegas et al. (2019) e Cai et al. (2020) têm mostrado que o EN Modoki causa impactos climáticos diferentes do EN clássico.

Estudos posteriores ao de Ashok et al. (2007) mostraram que um terceiro tipo de ENOS

pode ocorrer: o EN MIX, em que as anomalias de TSM ocorrem de forma concomitante (coexistem) nos setores leste e central do Pacífico Tropical (Yu e Kim; 2013; Andreoli et al., 2016). Assim, assume-se que há três tipos de EN: (1) quando as anomalias positivas de TSM se originam no Pacífico Leste e migram para oeste, o evento é denominado Pacífico Leste (EP), também chamado de EN clássico ou canônico; (2) quando as anomalias positivas de TSM ocorrem próximas da linha de data, o evento é denominado Pacífico Central (CP), também chamado de Modoki e (3) quando os dois tipos de anomalias positivas de TSM ocorrem concomitantemente (coexistem) tem-se o EN MIX. Em termos de LN, o diferencial é em relação à presença de anomalias frias, isto é, onde no EN são registradas as anomalias quentes de TSM, na LN essas são frias.

Andreoli et al. (2016) identificaram os diferentes tipos de EN no período de 1901 a 2010 e descreveram os impactos no clima da AS. Entretanto, esses autores não levaram em consideração o acoplamento dos impactos das anomalias de TSM do Atlântico Tropical. As anomalias de TSM no Atlântico Tropical Sul afetam diretamente a precipitação no litoral das regiões norte e nordeste do Brasil (Pezzi e Cavalcanti, 2001; Polissar et al., 2013; Reboita e Santos, 2015). Quando as anomalias são positivas (negativas), há excesso de chuva em tais áreas (déficit). Suponha-se a ocorrência de um evento EN concomitantemente com a presença de anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Sul, enquanto o EN desfavorece a precipitação, no litoral das regiões mencionadas, as anomalias no Atlântico Tropical as favorecem. Dessa forma, surge a questão: qual o sinal que será dominante (o do EN ou o do Atlântico)? Além disso, as anomalias de TSM do Atlântico Tropical também podem afetar a Amazônia (Limberger e Silva, 2016).

Diante do contexto apresentado, esse estudo tem como objetivos: (a) entender a classificação dos tipos de EN de Andreoli et al. (2016) até o ano de 2019, (b) com a extensão da classificação dos eventos de EN será possível avaliar a classificação do episódio ocorrido entre 2014 a 2016 descrito em Pereira et al. (2017) e (c) apresentar o impacto dos diferentes tipos de EN na precipitação da AS considerando casos de neutralidade no Atlântico Tropical Sul e casos com anomalias positivas e negativas de TSM. Esse estudo, que engloba o período de janeiro de 1950 a março de 2019, justifica-se pelo fato de servir como indicativo dos impactos dos diferentes tipos

de eventos EN na AS, o que pode servir de guia/modelo para auxiliar a previsão climática sazonal.

Metodologia

Dados

São utilizados dados mensais de TSM do conjunto *NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature – ERSST v5* (Huang et al., 2017), no período de 1950 a 2019, com resolução horizontal de 2° de latitude por 2° de longitude. Esses dados são disponibilizados pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) em: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html>.

Para a precipitação é utilizado o conjunto de dados mensais *NOAA's Precipitation Reconstruction Dataset – PREC* (Chen et al., 2002). Esses dados estão disponíveis desde 1948, com espaçamento de grade de 2,5° e cobrem o oceano (PREC/O) e o continente (PREC/L). Para a construção do conjunto PREC são utilizados dados observados em mais de 17.000 estações de coleta para a PREC/L, enquanto que para a PREC/O são utilizadas combinações de estimativas de satélite e observações históricas de obtidas em ilhas e navios.

Para as componentes horizontais e vertical do vento, assim como para altura geopotencial, são utilizados dados mensais da reanálise *Twentieth Century Reanalysis V2* (Compo et al., 2011) – NCEP20C. Essa reanálise está disponível no período de 1871 a 2012, cobre o globo com resolução horizontal de 2,0° e 24 níveis verticais em coordenadas de pressão (hPa): 1000, 950, 900, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10.

Classificação dos Tipos de El Niño

A classificação dos tipos de EN foi realizada com a técnica denominada *pattern correlation* - PTN (Ashok et al., 2003; Yu e Kim, 2013). Essa técnica permite isolar o efeito do EN CP para se estudar o EP e vice-versa e é baseada em dados de TSM. A seguir é apresentada a metodologia passo-a-passo.

a) Inicialmente é removida a tendência linear dos dados de TSM, que no presente estudo compreendem o período de janeiro de 1950 a março de 2019, e é calculada as anomalias de TSM (ATSM) em pontos de grade. Por exemplo, cada mês de janeiro do período em estudo tem a média climatológica do respectivo mês subtraída. A remoção da média mensal climatológica também

permite a remoção da sazonalidade dos dados. Aqui não se delimitou a área de estudo, pois o cálculo foi realizado para a grade global.

b) Para se conhecer a contribuição do EN EP nas ATSM sem a influência do EN CP e vice-versa, se isola o efeito de cada um desses tipos de EN através das ATSM que são monitoradas em regiões específicas do Pacífico Tropical, definidas na literatura como região de Niño 1+2, que representa o EN EP, e região de Niño 4, que representa o EN CP (**Figura 1**). Portanto, para se saber a contribuição do EN EP (EN CP) isola-se a influência do EN CP (EN EP) que é indicado pelas ATSM da região de Niño 4 (Niño 1+2). O resultado dessa operação é chamado de ATSM residual (ATSM_R) e a expressão para seu cálculo é dada por Ashok et al. (2003):

$$ATSM_R = ATSM - r(ATSM, IndiceN) * std(ATSM) * \frac{IndiceN}{std(IndiceN)} \quad (1)$$

sendo:

ATSM = anomalia de TSM (matriz obtida em a)

ATSM_R = anomalia de TSM residual (matriz)

IndiceN = série temporal (vetor) do índice do

Niño, que pode ser a do Niño 4 ou Niño 1+2, o

que depende da análise realizada

std = desvio-padrão

r = correlação de Pearson

Figura 1 Localização das quatro regiões de Niño (4, 3.4, 3 e 1+2) no oceano Pacífico Tropical e da região usada para calcular as anomalias de TSM no Atlântico Tropical Sul (TSA).

Na literatura, quando se quer isolar o efeito de um componente em dada variável é mais usual encontrar a seguinte redação “que uma variável foi subtraída do resultado obtido na regressão entre ela e a outra variável”. De fato, rearranjando os termos da equação 1 se obtém o coeficiente angular obtido na técnica de regressão (Rumsey, 2009), como mostra a equação 2. Portanto, a equação 1 mantém a ideia comumente descrita na literatura.

$$ATSM_R = ATSM - r(ATSM, IndiceN) * \frac{std(ATSM)}{std(IndiceN)} * IndiceN \quad (2)$$

A $ATSM_R$ para o EN EP (EN CP) é obtida considerando a série do índice do Niño 4 (Niño 1+2) no lugar de ÍndiceN na equação 2. Isso fornece uma série temporal em pontos de grade (portanto, em cada tempo da matriz se tem um mapa).

c) A etapa seguinte é calcular a média (em cada tempo) na região entre 10°N-10°S e 160°E e 80°W da $ATSM_R$ do EN EP ($ATSM_{R_EP}$) e do EN CP ($ATSM_{R_CP}$); com isso se obtém dois vetores. Na sequência, calcula-se a diferença:

$$\text{dif } ATSM_R = ATSM_{R_EP} - ATSM_{R_CP} \quad (3)$$

O resultado (vetor) obtido na equação 3 é considerado um índice para classificar o tipo de EN.

d) O índice de classificação do tipo de EN é aplicado aos eventos de EN que já se encontram identificados na literatura. O *Climate Prediction Center* da NOAA monitora as ATSM nas regiões mostradas na **Figura 1** e possui um índice chamado *Oceanic Niño Index* (ONI) para definir a ocorrência de EN com base na região 3.4. O ONI é obtido através da média de 3 meses das ATSM (por exemplo, o valor de janeiro é a média de dezembro a fevereiro) na área 4°N-4°S e 170°E-120°W. Quando os valores do ONI ultrapassam (são inferiores) 0,5°C (-0,5°C) por mais de 5 meses consecutivos tem-se um evento EN (LN). O índice ONI está disponível em https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.

Seguindo Andreoli et al. (2016), a ocorrência de um evento EN registrada pelo índice ONI é classificada, por meio do PTN, em EP, CP ou MIX. Para isso, se computa a média do índice obtido na metodologia do PTN do primeiro verão (DJF) do período de um evento EN. Se a média é maior do que 0,1, o evento é classificado como EP, se a média é menor do que -0,1 o evento é classificado como CP e se a média estiver entre -0,1 e 0,1 o evento é MIX (Yu e Kim, 2013). No caso de eventos se estendendo por mais de um verão, será apresentada a classificação em cada verão. Isso dará uma ideia da evolução temporal do fenômeno.

A Tabela 1 mostra os eventos EN com base no ONI e a classificação realizada no presente estudo e no de Andreoli et al. (2016). Os resultados são apresentados na seção 3.

Tabela 1 Classificação dos tipos de El Niño entre 1950 e 2019. A primeira coluna corresponde aos eventos de EN identificados pelo ONI/NOAA. A segunda coluna é a classificação dos eventos EN com base na metodologia do PTN aplicada no presente estudo e na terceira coluna, a classificação de Andreoli et al. (2016).

Evento EN ONI/NOAA	Classificação	Andreoli et al. (2016)
1951-1952	MIX	MIX
1953-1954	MIX	MIX
1957-1958	CP	CP
1958-1959	CP	Não classificou
1963-1964	MIX	MIX
1965-1966	CP	CP
1968-1969	CP	CP
1969-1970	MIX	MIX
1972-1973	MIX	MIX
1976-1977	MIX	MIX
1977-1978	CP	CP
1979-1980	CP	Não classificou
1982-1983	EP	EP
1986-1988	DJF/1987 = EP DJF/1988 = CP	CP
1991-1992	MIX	MIX
1994-1995	CP	CP
1997-1998	EP	EP
2002-2003	CP	CP
2004-2005	CP	CP
2006-2007	CP	EP
2009-2010	CP	CP
2014-2016	DJF/2015 = CP DJF/2016 = MIX	Não incluía esse período
2018-2019	MIX	

Influência Concomitante dos Oceanos Pacífico e Atlântico Tropical na Precipitação da AS

Como mencionado na introdução, as ATSM do oceano Atlântico Tropical Sul podem modificar os padrões das anomalias de precipitação sobre a AS associadas aos eventos EN. Portanto, serão apresentadas as anomalias de precipitação e circulação atmosférica dos três tipos de EN considerando as situações neutra e com anomalias positivas e negativas de TSM no Atlântico Tropical Sul.

Para classificar as ATSM no Atlântico Tropical Sul, primeiramente a tendência da série de TSM é removida e após se calculam as anomalias na região entre 0°-20°S e 10°E-30°W - **Figura 1** (as anomalias correspondem a média de um dado mês menos a climatologia dele; portanto, nesse processo o ciclo anual também é removido); as

anomalias são conhecidas como índice TSA (Enfield et al., 1999). Aqui, as anomalias foram calculadas com base na climatologia mensal de 1950 a 2019. O Atlântico Tropical Sul é considerado anormalmente quente (frio) quando a TSA é maior (menor) do que $0,5^{\circ}\text{C}$ ($-0,5^{\circ}\text{C}$), o que segue os limiares do ONI para o Pacífico Tropical. As condições neutras ocorrem quando a TSA está entre $-0,5^{\circ}$ e $0,5^{\circ}\text{C}$.

Uma vez identificados os tipos de EN e as ATSM no oceano Atlântico Tropical Sul, realizou-se a separação dos eventos por estação do ano (Tabela 2). Por exemplo, para a estação da primavera (SON), separaram-se os casos com registro de EN EP e TSA neutra (TSA0), EN EP e TSA positiva (TSA+) e EN EP e TSA negativa (TSA-). O mesmo é feito com o EN CP e o EN MIX e, também, para as demais estações do ano.

A Tabela 2 mostra que há uma preferência dos eventos de EN ocorrerem em situações de neutralidade no Atlântico Tropical Sul, isto é, em que as ATSM nesse oceano estão entre $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Conhecendo-se a data dos eventos (Tabela 2), foram calculadas as médias (composições) desses considerando as seguintes variáveis atmosféricas: precipitação, componentes zonal e meridional do vento em 850 hPa, altura geopotencial em 850 e 500 hPa e movimento vertical considerando os níveis verticais da reanálise NCEP20C. Por fim, é obtida a anomalia, que corresponde a média dos eventos considerando uma dada variável menos a média climatológica dela na estação do ano em estudo. No caso, a média climatológica é calculada considerando o período de 1950 a 2013, pois esse é o último ano disponível nos dados do NCEP20C. Portanto, as composições também incluem eventos somente até 2013. Com relação aos eventos 1986-1988 e 2014-2016, como eles possuem duas classificações, foi realizada a análise do PTN sazonal e feita a separação das estações do ano desses eventos. O evento 1986-1988 até SON/1987 é EP e a partir de DJF/1988 é CP. Já o evento 2014-2016 é CP até DJF/2015 e MIX no restante do ciclo de vida.

Para todas as variáveis, exceto o movimento vertical, os resultados são apresentados em mapas. O movimento vertical, também chamado de ômega, é mostrado em perfis verticais, com centro na latitude de 7°S . A variável ômega quando possui sinal negativo (positivo) indica movimentos ascendentes (subsidentes).

Resultados

Classificação dos Tipos de EN

Os eventos de EN ocorridos entre janeiro de 1950 a março de 2019 foram classificados em EP, CP e MIX, conforme mostra a Tabela 1, e os resultados foram comparados com os de Andreoli et al. (2016). Entre 1950 e 2019, o ONI registrou 23 eventos EN que segundo a classificação empregada aqui se dividiram em 3 casos que iniciaram com características de EN EP, 12 de EN CP e 8 de EN MIX. Só há duas discordâncias em relação à classificação de Andreoli et al. (2016): a primeira é que esses autores consideraram o evento de 1986-1988, como sendo 1987-1988. Assim, o classificaram como EN CP, mas como a classificação aplicada no presente estudo considera o sistema iniciando em 1986, o primeiro verão teve classificação como EN EP, o que concorda com a classificação de Tedeschi et al. (2013). Já o segundo verão, segue a classificação de Andreoli et al. (2016), EN CP. A segunda diferença nas classificações é em relação ao evento 2006-2007, aqui classificado como EN CP e em Andreoli et al. (2016) como EN EP. Esse é um evento que apresenta discordância nas classificações já que em Yu et al. (2013) aparece como EN MIX. Não é objetivo do presente estudo discutir as diferenças na classificação desse evento.

As diferenças obtidas entre o presente estudo e o de Andreoli et al. (2016) podem ser decorrentes do período usado para computar as climatologias e o PTN, já que esses autores iniciaram seus cálculos em 1900 enquanto o presente estudo, em 1950.

A classificação dos eventos de EN em Andreoli et al. (2016) foi até 2010. Estendendo esse estudo até março de 2019, há a inclusão de outros dois eventos EN: um que se estendeu de novembro de 2014 a maio de 2016 e outro entre outubro de 2018 a junho de 2019; esse último conforme: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. O primeiro foi inicialmente classificado como CP e a partir MAM/2015 como MIX, portanto, seu ciclo de vida foi maior na categoria MIX, o que concorda com o estudo de Pereira et al. (2017), já o segundo foi classificado como MIX.

Tabela 2 Classificação dos tipos de EN e condições de ATSM no oceano Atlântico Tropical Sul nas quatro estações do ano. Os anos com asterisco não foram inclusos nas composições devido à reanálise NCEP20C se estender somente até 2013. As iniciais EP, CP e MIX indicam, respectivamente, EN Pacífico Leste, EN Pacífico Central e EN MIX. Já TSA indica anomalias de TSM no Atlântico Tropical Sul. As estações do ano são: inverno (JJA), primavera (SON), verão (DJF, sendo dezembro referente ao ano anterior) e outono (MAM).

Tipo	Inverno			Primavera			Verão			Outono		
	TSA-	TSA0	TSA+	TSA-	TSA0	TSA+	TSA-	TSA0	TSA+	TSA-	TSA0	TSA+
EP		1982			1982			1983	1998		1982	
		1987			1986			1987			1983	
		1997			1987						1987	
					1997						1998	
MIX		1951	1963		1951	1963		1964	1952	1973	1992	1953
		1953			1953				1954	2016*		2015*
		1972			1969				1970			2016*
		1991			1972				1992			
		2015*			1976				2019*			
					1991							
					2015*							
CP					2018*							
	1958	1957			1957			1958			1958	1957
		1965			1965			1959				1966
		2002			1968			1966				1969
		2004			1977			1969				
		2009			1979			1978				
					1994			1980				
					2002			1988				
					2004			1995				
					2006			2003				
					2009			2005				
								2007				
								2010				
								2015*				

Composições

Outro diferencial desse estudo em relação ao de Andreoli et al. (2016) é que as composições das variáveis atmosféricas na ocorrência de EN são elaboradas considerando as diferentes situações de ATSM no Atlântico Tropical Sul (Tabela 1). Portanto, os eventos de EN são separados conforme o padrão das ATSM no Atlântico. Já Andreoli et al. (2016) incluem nas composições os eventos considerando a evolução temporal do inverno ao outono (sem fragmentá-los em virtude das condições de ATSM do Atlântico). Dessa forma, as figuras desses autores permitem observar uma evolução dos eventos EN no tempo; o que não é o foco do presente estudo.

A maioria dos eventos EN ocorrem com ATSM entre $-0,5^{\circ}$ e $0,5^{\circ}\text{C}$ na região do Atlântico Tropical Sul, o que caracteriza situação de neutralidade (TSM0) nesse setor (Tabela 1). Por esse motivo e, devido às composições para os casos de ATSM no Atlântico não mostrarem grandes impactos na precipitação em toda a AS, aqui, por brevidade, só serão apresentadas as figuras para eventos EN que ocorrem concomitantemente com condições de neutralidade no oceano Atlântico Tropical Sul.

Em todas as estações do ano, os eventos de EN CP, EP e MIX se distinguem pelo padrão das ATSM no Pacífico (Figuras 2-5 a-c): eventos CP mostram águas mais quentes no Pacífico Central (180° - 160° W); nos eventos EP as águas se aquecem próximo à costa oeste da AS e as anomalias se expandem para oeste atingindo longitudes além de 120° W e nos eventos MIX as águas mostram anomalias quentes quase concomitantemente nos setores central e leste de Pacífico Tropical (Andreoli et al., 2016; Kayano et al., 2016).

As ATSM impactam diretamente as células de circulação zonal de Walker (Figuras 2-5 j-l). Essas células são caracterizadas por movimentos ascendentes sobre as regiões com ATSM positivas, divergem em altos níveis e acabam atuando com subsidência nas regiões afastadas dos núcleos quentes de TSM. Nota-se que em eventos de EN EP, em geral, os movimentos ascendentes ocupam uma área maior ($\sim 180^{\circ}$ a 120° W) do Pacífico Tropical e são mais intensos do que nos outros tipos de EN. Nos casos de EN CP, os movimentos ascendentes se concentram a cerca de 180° e nos eventos MIX tendem a se assimilarem aos eventos EP em termos de área de atuação, mas são menos intensos (Figuras 2-5 j-l). Além disso, nos eventos EP e MIX, o ramo ascendente da célula de Walker na costa oeste da AS é mais intenso do

que nos eventos CP e o mesmo ocorre para os movimentos subsidentes sobre as longitudes do norte do Brasil (60°W).

Considerando o inverno e condições neutras no oceano Atlântico Tropical Sul (TSA0, Figura 2), as anomalias positivas de precipitação mais intensas em EN CP ocorrem no norte da região norte do Brasil e na Colômbia, enquanto nos eventos EP e MIX no sudeste da AS (que incluiu sul do Brasil, Uruguai e parte da Argentina). Os padrões anômalos obtidos na precipitação nos eventos EN CP e EP são similares aos de Tedeschi et al. (2013) no inverno. Tanto o EN EP quanto o MIX mostram déficit de precipitação no norte da AS e no litoral do nordeste, o que pode estar associado com os movimentos subsidentes mais intensos na célula de Walker (Figura 2 j-l). Nos três tipos de EN aparece um padrão de onda de Rossby barotrópica (anomalias de altura geopotencial em fase nos níveis de 850 e 500 hPa) a cerca de 30°S no Pacífico Oeste que adquire a forma de arco atingindo o sudeste da AS. Esse padrão lembra o padrão *Pacific South America* - PSA (Mo e Nogués-Peagle., 2001) e é importante para a precipitação no sudeste da AS, conforme descrito na sequência. No caso do EN CP, o padrão de onda mostra um centro de anomalia negativa de altura geopotencial entre o sul e sudeste do Brasil sendo cercado a sul por um outro centro mais amplo de anomalia positiva. Já nos eventos EP e MIX a anomalia de altura geopotencial mostra sinal negativo onde no CP é positivo (Figura 2 g-i). As anomalias negativas contribuem para organizar a precipitação, pois como correspondem a uma área de menor pressão, ajudam a canalizar o escoamento para o sudeste da AS. De fato, a Figura 2e mostra ventos a leste dos Andes, que são conhecidos como Jato de Baixos Níveis (JBN), se dirigindo para a região da anomalia negativa de altura geopotencial. Esses jatos transportam calor e umidade que contribuem para a chuva.

Comparando o EN CP em caso de TSA0 e TSA- (figuras não mostradas), a diferença no padrão da chuva ocorre entre o norte da região norte do Brasil e o norte da AS em que há déficit acentuado de precipitação. Também ocorre ligeiro déficit de precipitação na região nordeste do Brasil. Para o caso de TSA+ só há registro concomitante com EN MIX (figuras não mostradas). Em termos de precipitação, quanto há condições de TSA0 são registradas anomalias negativas de precipitação com fraca intensidade do norte da região norte do Brasil ao norte da AS. Já na presença de TSA+, há anomalias positivas concentradas nas Guianas e Suriname.

a primavera com TSA0 (Figura 3), os eventos EN EP e MIX mostram anomalias positivas de precipitação se estendendo da Venezuela ao sudeste da AS e em parte do oeste do Brasil, seguindo a trajetória do JBN a leste dos Andes. A diferença entre esses eventos ocorre em termos das anomalias negativas, pois enquanto o EN EP mostra sinal negativo no sudeste do Brasil, concordando com os estudos de Andreoli et al. (2016) e Cai et al. (2020), o MIX mostra no norte da Amazônia (Figura 3 e-f). As anomalias de precipitação são ligeiramente mais intensas nos eventos EN EP e concordam com Andreoli et al. (2016). No caso dos EN CP, as anomalias positivas de precipitação se destacam entre o oeste da Argentina e o sul do Brasil (Figura 3d). Durante os casos de EN EP, há um padrão de onda bem definido, no campo das anomalias de altura

geopotencial, que se propaga do sul da Austrália em direção ao oceano Atlântico. Esse trem de ondas mostra um centro com anomalias negativas a cerca de 60°S e 30°W que se conecta com outro centro bem menos expressivo nas cercanias do Paraguai (Figura 3h). Isso pode ser um dos fatores que intensifica o JBN da região tropical para o sudeste da AS e contribui para as anomalias positivas de precipitação mais intensas nos eventos de EN EP do que MIX, quando o padrão de onda possui uma característica distinta dos eventos EP. Considerando a latitude de 7° S e as longitudes a cerca de 60°W, há movimentos subsidentes mais intensos nos eventos de EN MIX do que nos eventos de EN EP e CP (Figura 3 k-l), o que pode ser a explicação para o déficit de precipitação no norte da AS na Figura 3f.

Figura 2 Eventos de EN durante condições de neutralidade no oceano Atlântico Tropical Sul no inverno: (a-c) ATSM (°C) e anomalias do vento em 850 hPa (setas, m/s); (d-f) anomalias de precipitação (mm/dia) e anomalias do vento em 850 hPa (setas, m/s); (g-i) anomalias de altura geopotencial em 850 hPa (cores) e em 500 hPa (linhas), metros e (j-l) anomalias do movimento vertical (100 x Pa/s; marrom corresponde a movimentos subsidentes e azul a movimentos ascendentes). A primeira coluna indica EN CP, a segunda EN EP e a terceira EN MIX

Considerando a TSA+, somente há casos concomitantes com EN MIX (figura não mostrada). As anomalias de precipitação aparecem mais ressaltadas e com um padrão de tripolo: anomalias positivas intensas no sudeste da AS, negativas entre o centro-oeste e sudeste do Brasil e ligeiramente positivas no nordeste do Brasil. Sugere-se que os déficits registrados podem ser uma resposta da subsidência devido à divergência em médios/altos níveis da atmosfera decorrente dos movimentos ascendentes nas regiões chuvosas.

Na estação do verão e em condições de TSA0 (Figura 4), embora os eventos de EN CP e MIX (Figura 4a,c) mostrem padrão um tanto similar das ATSM no oceano Pacífico tropical, os padrões das anomalias de chuva (Figura 4d,f) e altura geopotencial são distintos (Figura 4g,i). Com relação à precipitação, o EN MIX mostra anomalias positivas entre o Brasil central e o oceano Atlântico, enquanto o EN CP mostra anomalias positivas no Paraguai e sul da Bolívia e entre o sudeste e nordeste do Brasil (o que também

é mostrado por Cai et al., 2020). Em ambos há tendência de ligeiro déficit de precipitação no norte da AS. Por outro lado, o EN EP mostra anomalias negativas intensas entre o centro-norte do Brasil ao norte da AS incluindo o Atlântico Tropical Norte. As anomalias positivas se concentram em três setores: noroeste da AS, sudeste da AS e numa banda do sudeste ao oceano Atlântico. Essas anomalias são similares às mostradas Tedeschi et al. (2013), Andreoli et al. (2016) e Cai et al. (2020). As condições de déficit de precipitação no norte da AS parecem ser uma resposta dos movimentos subsidentes a cerca de 60°W (Figura 4j-l). Ressalta-se que no caso do EN EP os movimentos ascendentes se estendem por todo o oceano Pacífico até a costa oeste da AS, o que explica as anomalias positivas no oeste do continente (Figura 4k). As anomalias de altura geopotencial (Figura 4 g-i) embora apresentem padrão distinto nos três tipos de EN, são concordantes na presença de anomalias negativas no sul do Brasil.

Figura 3 Similar à Figura 2, mas para eventos de EN durante condições de neutralidade no oceano Atlântico Tropical Sul na primavera.

Uma característica interessante na Figura 4e é banda de anomalia positiva de precipitação se estendendo do sudeste do Brasil ao oceano Atlântico. Esse padrão se assemelha ao da ocorrência da Zona de Convergência do Atlântico Sul, o que sugere que o EN EP pode contribuir para déficit de chuva na parte tropical da ZCAS e excesso na parte subtropical.

Em casos concomitantes de EN EP com TSA+ (figuras não mostradas), as anomalias negativas de precipitação no norte e nordeste do Brasil registradas no caso de TSA0 ficam

enfraquecidas na presença de TSA+. Com relação aos eventos EN MIX, há casos concomitantes com TSA- e TSA+ (figuras não mostradas). No caso de TSA-, as anomalias de precipitação se assemelham as com TSA0, mas apresentam maior intensidade. Na ocorrência de TSA+, há uma mudança na distribuição espacial das anomalias de precipitação, pois o sinal positivo fica sobre o sudeste da AS e o negativo entre as regiões norte e nordeste do Brasil. No litoral norte da região nordeste predominam anomalias positivas de precipitação.

Figura 4 Similar à Figura 2, mas para eventos de EN durante condições de neutralidade no oceano Atlântico Tropical Sul no verão.

Figura 5 Similar à Figura 2, mas para eventos de EN durante condições de neutralidade no oceano Atlântico Tropical Sul no outono.

No outono em condições de TSA0 (Figura 5), os eventos EN CP e MIX mostram anomalias de precipitação mais fracas do que os EN EP. Enquanto os EN CP e EP revelam a presença de anomalias positivas no sudeste da AS, o EN MIX mostra anomalias negativas (Figura 5 d-f). Isso pode ser uma resposta ao padrão das anomalias de altura geopotencial, pois enquanto há anomalias negativas dessa variável próximo ao sul do Brasil nos eventos CP e EP, nos eventos MIX, as anomalias negativas mais intensas ocorrem no extremo sul da AS (Figura 5 g-i).

Eventos EN CP e MIX ocorreram concomitantemente com TSA- e, em ambos os casos, as anomalias de precipitação mostram sinal mais intenso do que na situação com TSA0 (figuras não mostradas). Tanto o EN CP quanto o MIX apresentam anomalias negativas de precipitação

intensas entre os setores norte das regiões norte e nordeste do Brasil, indicando que as ATSM do Atlântico Tropical ajudam a reforçar o déficit de precipitação quando da ocorrência de eventos EN. De fato, os perfis verticais da anomalia de ômega indicam movimentos subsidentes intensos entre as longitudes das regiões norte e nordeste do Brasil (figuras não mostradas), o que contribui para a redução da precipitação.

Com base nos resultados apresentados nessa seção e daqueles obtidos da literatura, os mecanismos físicos associados às anomalias de precipitação na AS em episódios de EN estão relacionados com o impacto das ATSM na circulação zonal de Walker (Kayano et al., 1988; Ropelewski e Halpert, 1989; Kiladis e Diaz, 1989) e nos trens de ondas de Rossby (Nogués-Paegle et al., 2002). Sobre o sudeste da AS, o padrão de onda, em geral, mostra anomalias negativas de altura

geopotencial na coluna atmosférica (padrão barotrópico) favorecendo a canalização do JBN para tal local (Silva et al., 2009; Santos e Reboita, 2018; Montini et al., 2019). Já no norte das regiões norte e nordeste, o déficit de precipitação está associado com o deslocamento e intensidade dos movimentos na célula de circulação zonal de Walker (Grimm e Ambrizzi, 2009; Andreoli et al., 2016; Reboita et al., 2016).

Conclusões

Esse estudo apresentou a influência dos tipos de EN, concomitantemente, com os diferentes padrões de anomalias de TSM no oceano Atlântico Tropical Sul, na precipitação da AS. Alguns dos principais resultados obtidos foram:

- Os eventos EN, independente do tipo, ocorrem preferencialmente com casos de neutralidade no oceano Atlântico Tropical Sul. Aqui a neutralidade foi definida quando as anomalias de TSM apresentaram valores entre $\pm 0,5$ °C.

- Eventos de EN EP e MIX, em geral, produzem padrões similares de anomalias de precipitação na AS, mas as anomalias são menos intensas nos eventos MIX.

- Eventos de EN CP concomitantes com condições de neutralidade no Atlântico Tropical, em geral, não contribuem com anomalias negativas no norte da AS, o que é comum ocorrer nos outros dois tipos de EN.

- As anomalias de precipitação em eventos EN são, em geral, mais intensas no verão, da mesma forma como mostram estudos prévios (exemplo: Tedeski et al., 2013; Andreoli et al., 2016; Cai et al., 2020).

- As anomalias negativas de TSM no oceano Atlântico Tropical Sul atuam de forma a intensificar as anomalias negativas de precipitação no norte das regiões norte e nordeste do Brasil em eventos EN, enquanto as anomalias positivas de TSM atuam de forma a enfraquecer as anomalias negativas de precipitação.

- Quando os resultados do presente estudo para os casos com neutralidade de TSM no Atlântico Tropical são comparados, por exemplo, com os de Andreoli et al. (2016), aparecem, aqui, anomalias negativas mais fracas do nordeste do Brasil ao norte da AS. Isso é explicado por não serem considerados casos de EN juntamente com as

anomalias de TSM mais intensas no Atlântico Tropical. Quando essas são levadas em consideração, o sinal das anomalias de precipitação se tornam mais intensos.

- Eventos de EN EP possuem a célula de circulação de Walker mais intensa e expandida zonalmente do que os eventos CP e MIX. O ramo ascendente da célula localiza-se sobre as ATSM positivas. Dessa forma, é comum aparecer nos eventos de EN EP movimentos ascendentes próximos ao setor oeste da AS.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e FAPEMIG pelo auxílio financeiro, aos centros de meteorologia que disponibilizaram os dados usados nesse estudo e, em especial, as doutoras Rita Andreoli e Mary Kayano por terem nos ensinado o método PTN passo-a-passo.

Referências

- Andreoli, R.V., de Oliveira, S.S., kayano, M.T., viegas, J., de Souza, R.A.F., Candido, L.A., 2016. The influence of different El Niño types on the South American rainfall. *International Journal of Climatology* 37 (3), 1374-1390.
- Andreoli, R.V., Kayano, M.T., Silva, J.V., de Oliveira, S.S., de Souza, R.A.F., Garcia, S.R., Rego, W.H.T., de Oliveira, M.B.L., 2019. Effects of two different La Niña types on the South American rainfall. *International Journal of Climatology*, 39, 1415-1428.
- Ashok, K., Behera, S.K., Rao, S.A., Weng, H., Yamagata, T., 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal Geophys. Res.*, 112, C11007.
- Ashok, K., Yamagata, T., 2009. The El Niño with a difference. *Nature*. 461, 481-484.
- Cai, W., McPhaden, M.J., Grimm, A.M., Rodrigues, R.R., Taschetto, A.S., Garreaud, R.D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y.-G., Santoso, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H.-S., Marengo, J., Alves, L. M., Osman, M., Li, S., Wu, L., Karamperidou, C., Takahashi, K., Vera, C., 2020. Climate impacts of the El Niño-Southern

- Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 215-231.
- Compo, G.P., Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Matsui, N., Allan, R.J., Yin, X., Gleason, B.E., Vose, R.S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R.I., Grant, A.N., Groisman, P.Y., Jones, P.D., Kruk, M., Kruger, A.C., Marshall, G.J., Maugeri, M., Mok, H.Y., Nordli, O., Ross, T.F., Trigo, R.M., Wang, X.L., Woodruff, S.D., Worley, S.J., 2011. The Twentieth Century Reanalysis Project. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137, 1–28.
- Chen, M., Xie, P., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., 2002. Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations, *J. of Hydrometeorology*, 3, 249-266.
- Enfield, D. B., Mestas-Núñez, A. M., Mayer, D. A., Cid-Serrano, L., 1999. How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures? *Journal of geophysical research*, 104, 7841-7848.
- Grimm, A.M., Ambrizzi, T., 2009. Teleconnections into South America from the tropics and extratropics on interannual and intraseasonal timescales. In: *Past climate variability in South America and surrounding regions*. Springer, Dordrech. 22, 159-191.
- Huang, B., Thorne, P.W., Banzon, V. F., et al., 2017. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5), Upgrades, validations, and intercomparisons. *J. Climate*. 30, 8179-8205.
- Kayano, M.T., Rao, V.B., Moura, A.D., 1988. Tropical circulations and the associated rainfall anomalies during two contrasting years. *Int. J. Climatol.* 8, 477–488.
- Kayano, M.T., Andreoli, R.V., Souza, R.A.F., Garcia, S.R., Calheiros, A. J. P., 2016. El Niño e La Niña nos Últimos 30 Anos: Diferentes Tipos. *Climanalise (São José dos Campos)* 4, 7-12.
- Kiladis, G., Diaz, H.F., 1989. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *J. Clim.* 2, 1069–1090.
- Limberger, L., Silva, M.E.S., 2016. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. *GEOUSP Espaço E Tempo (Online)* 20, 657-675.
- Mo, K.C., Nogués-Paegle, J., 2001. The Pacific-South American modes and their downstream effects. *Int. J. Climatol.* 21, 1211–1229.
- Montini, T.L., Jones, C., Carvalho, L.M., 2019. The South American Low-Level Jet: A New Climatology, Variability, and Changes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 1200-1218.
- Pereira, H.R., Reboita, M.S., Ambrizzi, T., 2017. Características da Atmosfera na Primavera Austral Durante o El Niño de 2015/2016. *Revista Brasileira de Meteorologia* 32, 293-310.
- Pezzi, L.P., Cavalcanti, I.F.A., 2001. The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: a numerical study. *Climate Dynamics* 17, 205-212.
- Philander, S.G., 1990. *El Niño, La Niña, and the southern oscillation*. San Diego, CA: Academic. 293 pp
- Polissar, P.J., Abbott, M.B., Wolfe, A.P., Vuille, M., Bezada, M., 2013. Synchronous interhemispheric Holocene climate trends in the tropical Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 14551-14556.
- Rasmusson, E.M., Carpenter, T.H., 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review* 110, 354-384.
- Reboita, M.S., Santos, I., 2015. Influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no norte e nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia* 15, 28-48.
- Reboita, M.S., Rodrigues, M., Armando, R.P., Freitas, C., Martins, D., Miller, G., 2016. Causas da Semi-Aridez do Sertão Nordestino. *Revista Brasileira de Climatologia* 19, 254-277.

- Ropelewski, C.F., Halpert, M.S., 1989. Precipitation patterns associated with the high index phase of Southern Oscillation. *J. Clim.* 2, 268–284.
- Rumsey, D. J., 2009. *Statistics for Dummies*. 2 ed., Wiley.
- Santos, D.F., Reboita, M.S., 2018. Jatos de baixos níveis a leste dos andes: comparação entre duas reanálises. *Revista Brasileira de Climatologia* 22, 423-445.
- Seow, M.X.C., 2018. A new type of tropical Pacific warming-El Niño Modoki. *Physics Today* 71, 50-52.
- Silva, G.A.M., Ambrizzi, T., Marengo, J.A., 2009. Observational evidences on the modulation of the South American Low Level Jet east of the Andes according the ENSO variability In: *Annales geophysicae: atmospheres, hydrospheres and space sciences* 27, 645.
- Tedeschi, R.G., Grimm, A.M., Cavalcanti, I.F.A., 2016. Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter. *International Journal of Climatology* 36, 4797-4814.
- Tedeschi, R.G., Collins, M., 2016. The influence of ENSO on South American precipitation during austral summer and autumn in observations and models. *International Journal of Climatology* 36, 618-635.
- Trenberth, K.E., 1997. Short-term climate variations: Recent accomplishments and issues for future progress. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 1081-1096.
- Trenberth, K.E., Smith, L., 2006. The vertical structure of temperature in the tropics: Different flavors of El Niño. *Journal of climate* 19, 4956-4973.
- Viegas, J., Andreoli, R.V., Kayano, M.T., Candido, L.A., Souza, R.A.F., Hall, D.H., Souza, A.C., Garcia, S.R., Temoteo, G.G., Valentin, W.I. D., 2019. Caracterização dos Diferentes Tipos de El Niño e seus Impactos na América do Sul a Partir de Dados Observados e Modelados. *Revista Brasileira de Meteorologia* 34, 43-67.
- Xie, F., Li, J., Tian, W., Zhang, J., Sun, C., 2014. The relative impacts of El Niño Modoki, canonical El Niño, and QBO on tropical ozone changes since the 1980s. *Environmental Research Letters* 9, 064020.
- Weng, H., Behera, S.K., Yamagata, T., 2009: Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Niño Modoki and El Niño events. *Climate Dynamics* 32, 663-674.
- Yu, J.Y., Kim, S.T., 2013. Identifying the types of major El Niño events since 1870. *Int. J. Climatol.* 33, 2105–2112.