

Article

# Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul Associado ao Modo Anular Sul e Impactos Climáticos no Brasil

Camila Bertoletti Carpenedo<sup>1</sup> , Tércio Ambrizzi<sup>2</sup> <sup>1</sup>*Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.*<sup>2</sup>*Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*

Recebido em: 22 de Novembro de 2019 - Aceito em: 2 de Março de 2020

## Resumo

O objetivo deste estudo é investigar a precipitação pluvial e os ventos no Brasil associados ao anticiclone subtropical do Atlântico Sul (ASAS) nas diferentes fases do Modo Anular Sul (SAM). Na fase positiva (negativa) do SAM, o ASAS está posicionado anormalmente para sul (norte), assim como a Zona de Convergência Intertropical, contribuindo com aumento (redução) da precipitação pluvial na Região Norte (Norte e Nordeste). Assim, ventos mais intensos (fracos) são observados em algumas áreas no sul da Região Nordeste, Sudeste e sul da Região Sul (grande parte da Região Nordeste e parte do Tocantins e Minas Gerais) no outono e inverno (outono). Em relação à precipitação pluvial, há redução (aumento) no centro-sul (sul da Região Sul/ centro-leste) do Brasil entre o inverno e verão (na primavera e outono/ verão). Na fase negativa do SAM existe uma redução na duração da estação chuvosa na região tropical associada a um enfraquecimento da atividade da Zona de Convergência do Atlântico Sul e da convecção tropical. O outono é a única estação em que o fortalecimento dos ventos na Região Nordeste pode ser utilizado para complementar a produção de energia elétrica por fonte hidráulica devido ao déficit de precipitação pluvial em ambas as fases do SAM.

**Palavras-chave:** anticiclone subtropical do Atlântico Sul, Modo Anular Sul, precipitação pluvial, ventos, Brasil.

## South Atlantic Subtropical Anticyclone Associated with the Southern Annular Mode and Climate Impacts in Brazil

### Abstract

The objective of this study is to investigate the precipitation and winds in Brazil associated with the South Atlantic subtropical anticyclone (SASA) in the different phases of the Southern Annular Mode (SAM). During the positive (negative) phase of the SAM, the SASA is positioned anomalously to the south (north), as well as the Intertropical Convergence Zone, contributing to the increase (reduction) of precipitation in the North (North and Northeast) region. Thus, we observed more intense (weak) winds in some areas of the south-Northeast, Southeast, and southern South-regions (much of the Northeast region and part of Tocantins and Minas Gerais) in the fall and winter (fall). Regarding precipitation, there is a reduction (increase) in south-central (southern-South region/ central-eastern) of Brazil between winter and summer (in spring and autumn/ summer). During the negative phase of the SAM, there is a reduction in the duration of the rainy season in the tropical region associated with a weakening of activity in the South Atlantic Convergence Zone and tropical convection. Autumn is the only season in which the strengthening of winds in the Northeast region can be used to complement hydroelectric power production due to precipitation deficit in both SAM phases.

**Keywords:** South Atlantic subtropical anticyclone, Southern Annular Mode, precipitation, winds, Brazil.

## 1. Introdução

A população brasileira aumentou em mais de 20 vezes entre 1872 e 2018, passando de 9,9 milhões de habitantes para 208,5 milhões (IBGE, 2010; IBGE, 2019).

Com o aumento populacional, existe um aumento de demanda por energia elétrica para consumo residencial, público, industrial, comercial e agropecuário. A matriz elétrica brasileira está fortemente baseada em fontes de origem renovável, representando 80,4% da oferta interna

(soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações), sendo a fonte hidráulica com a maior participação (65,2%; EPE, 2018).

A região tropical do Brasil possui características de inverno seco e verão chuvoso (Silva e Kousky, 2012), o que impacta diretamente o nível dos reservatórios das hidrelétricas. Desta forma, durante o inverno a produção de energia elétrica precisa ser complementada por outras fontes. Como no inverno os ventos são mais intensos (Camargo do Amarante *et al.*, 2001), a energia eólica é uma boa alternativa. Apesar de o potencial de geração de energia eólica no Brasil ser suficiente para atender o triplo da demanda de energia do país, ela ocupa apenas 6,8% da matriz elétrica (EPE, 2018).

No Brasil, os ventos mais intensos no interior do continente são devido ao relevo e à baixa rugosidade, enquanto no litoral são devido à brisa marinha e aos ventos alísios de nordeste e sudeste (Camargo do Amarante *et al.*, 2001). A intensidade dos ventos alísios de sudeste está diretamente associada ao anticiclone subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que corresponde ao ramo descendente da célula de Hadley, tipicamente localizado em 15°-45° S e 45° W-15° E (Mächel *et al.*, 1998). Durante o inverno o ASAS é mais intenso e estende-se para oeste sobre a Região Sudeste do Brasil, contribuindo com condições mais secas e ventos mais intensos, enquanto no verão o ASAS é mais fraco e retraído para leste, contribuindo com condições mais úmidas e ventos mais fracos (Hastenrath, 1985; Satyamurty *et al.*, 1998; Camargo do Amarante *et al.*, 2001; Reboita *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2017; Reboita *et al.*, 2019).

A posição e intensidade do ASAS pode ser afetada pelo Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode* – SAM; Sun *et al.*, 2017), que é o principal modo de variabilidade climática entre as latitudes médias e altas do Hemisfério Sul (Kidson, 1988; Kidson e Watterson, 1999; Thompson e Wallace, 2000; Marshall, 2003). É um modo marcado por anomalias de altura geopotencial zonalmente simétricas e fora de fase (Marshall, 2003). Na fase positiva do SAM as anomalias de altura geopotencial são negativas (positivas) nas altas (médias) latitudes austrais (Thompson e Wallace, 2000; Gillett *et al.*, 2006), associada com o deslocamento anômalo do ASAS para sul (Sun *et al.*, 2017). O oposto é observado durante a fase negativa do SAM. A primeira EOF (*Empirical Orthogonal Function*) da anomalia de altura geopotencial em 850 hPa entre o equador o polo sul e entre 70° W e 20° E explica 50% da variância total e está relacionada ao SAM, exibindo um padrão associado com o deslocamento meridional do ASAS (Sun *et al.*, 2017).

Assim, o objetivo deste estudo é investigar a precipitação pluvial e os ventos sobre o Brasil associados ao ASAS nas diferentes fases do SAM, entre o verão de 1980 e a primavera de 2015.

## 2. Material e Métodos

Todas as fontes de dados utilizadas nesse estudo foram obtidas para o período de dezembro de 1979 a novembro de 2015. O índice SAM diário foi obtido do *Climate Prediction Center/ National Oceanic and Atmospheric Administration* (CPC/ NOAA). Como a escala de análise é a sazonal, o índice SAM foi calculado através da média sazonal do índice diário (Fig. 1). A fase positiva (negativa) do SAM foi definida como valores acima (abaixo) de um desvio padrão (*cf.* Reboita *et al.*, 2009), ou seja, índices  $\geq +0,7$  ( $\leq -0,7$ ), e como fase neutra valores entre  $\pm 0,7$ . O número de eventos independentes durante a fase negativa/ positiva do SAM é, respectivamente: primavera (6/ 6), verão (3/ 10), outono (7/ 6) e inverno (8/ 7).

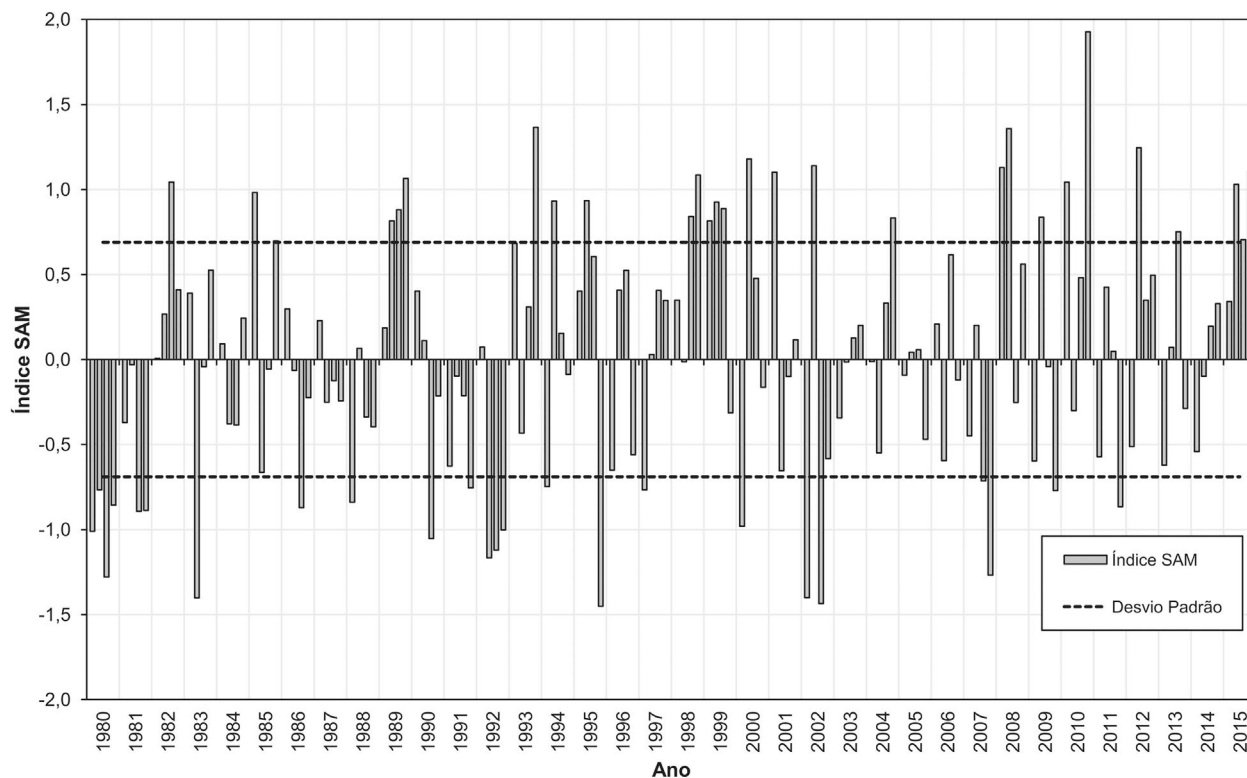
Os campos mensais de vetor vento a 10 m e pressão ao nível médio do mar (PNMM) foram obtidos das reanálises do ERA-Interim (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Data Server*), com uma grade global de 1,5° de latitude x 1,5° de longitude. As configurações e o desempenho do sistema de assimilação de dados podem ser vistos com maior detalhe em Simmons *et al.* (2007), Uppala *et al.* (2008) e Dee *et al.* (2011). A série temporal diária de precipitação pluvial foi obtida da base de dados desenvolvida por Xavier *et al.* (2016) e atualizada em Xavier *et al.* (2017). Os autores utilizaram dados de precipitação pluvial de cerca de 9.259 pluviômetros para criar um conjunto de dados em ponto de grade, com espaçamento horizontal de 0,25° de latitude x 0,25° de longitude.

Posteriormente foram calculadas as médias sazonais do vetor vento a 10 m e da PNMM, bem como os acumulados sazonais de precipitação pluvial e as respectivas anomalias sazonais em relação à normal climatológica de 1981 a 2010. Por fim, foram realizadas composições das anomalias sazonais dos campos atmosféricos durante a fase negativa e positiva do SAM, conforme a Fig. 1. A significância estatística das composições foi obtida com o teste t-Student, ao nível de significância de 10% (Wilks, 2006).

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1. Fase positiva do SAM

Durante a fase positiva do SAM, associada às anomalias negativas de PNMM nas altas latitudes e às anomalias positivas nas latitudes médias, na primavera observa-se um intenso centro de alta pressão anômala no sudoeste do Atlântico Sul (Fig. 2a), o que pode indicar um deslocamento anômalo do ASAS para sudoeste de sua posição climatológica e/ ou um fortalecimento no ramo sudoeste, uma atuação de anticiclones (ciclones) mais (menos) intensos do que o normal e/ ou uma atuação de bloqueios atmosféricos, os quais impedem a propagação normal dos sistemas transientes, como ciclones extratropicais, antici-



**Figura 1** - Série temporal do índice SAM sazonal (colunas) e desvio padrão (linha tracejada) entre o verão de 1980 e a primavera de 2015.

clones migratórios e frentes frias (Coughlan, 1983; Nakamura e Wallace, 1993; Ambrizzi *et al.*, 2009; Rodrigues e Woollings, 2017). Desta forma, observam-se anomalias negativas de precipitação pluvial de até -150 mm, com orientação noroeste-sudeste entre Rondônia e as Regiões Sudeste e Sul (Fig. 2c). Uma vez que o ASAS é fonte de ventos alísios de sudeste no Atlântico Sul (Sun *et al.*, 2017), o enfraquecimento do ramo noroeste do ASAS resulta em redução na velocidade dos ventos alísios de sudeste no norte do Ceará, extremo norte do Piauí e extremo nordeste do Maranhão de até  $-0,3 \text{ ms}^{-1}$  (Fig. 2b). O enfraquecimento dos ventos alísios de sudeste indica um deslocamento anômalo da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para sul (Green e Marshall, 2017), resultando em aumento da precipitação pluvial na Região Norte e no extremo oeste do Maranhão (Fig. 2c).

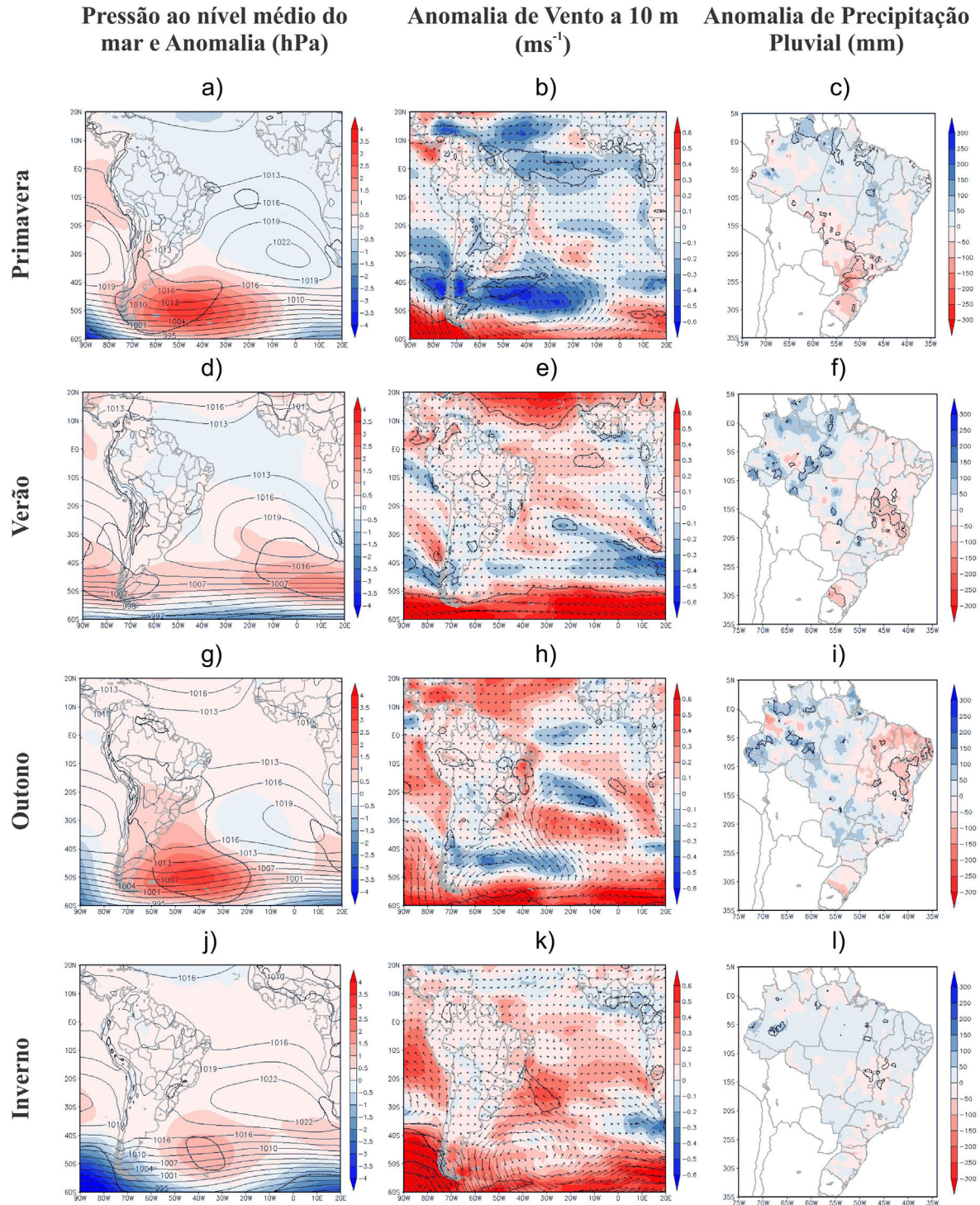
No verão há um centro anômalo de alta pressão no Atlântico Sudeste e outro no Pacífico Sudeste (Fig. 2d), o que pode indicar um fortalecimento do ramo sudeste do ASAS e do anticiclone subtropical do Pacífico Sul, uma maior (menor) frequência de anticiclones (ciclones) do que a climatologia e/ ou uma atuação de bloqueios atmosféricos (Mendes *et al.*, 2005; Mendes *et al.*, 2008; Oliveira *et al.*, 2014). Apesar de as anomalias positivas de PNMM não apresentarem significância estatística no ramo oeste do ASAS, junto à costa leste do Espírito Santo e Rio Grande do Sul existe uma intensificação dos ventos a 10 m

de até  $+0,3 \text{ ms}^{-1}$ , enquanto há enfraquecimento entre o centro-sudeste de Minas Gerais, sul do estado do Rio de Janeiro e nordeste do estado de São Paulo (Fig. 2e). No Atlântico Norte tropical existe um fortalecimento dos ventos alísios de nordeste, o que indica um deslocamento anômalo da ZCIT para sul, possivelmente contribuindo com as anomalias positivas de precipitação pluvial na Região Norte (Fig. 2f). Por outro lado, há anomalias negativas entre o centro-norte de Minas Gerais, norte do Espírito Santo, sudoeste da Bahia, nordeste de Goiás e sudeste do Tocantins, além do sudoeste do Rio Grande do Sul.

No outono um intenso centro anômalo de alta pressão ocorre no Atlântico Sudoeste (Fig. 2g), o que pode indicar um deslocamento e/ ou um fortalecimento anômalo do ASAS no sudoeste, uma maior (menor) frequência de anticiclones (ciclones) do que o normal e/ ou uma atuação de bloqueios atmosféricos, assim como observado na primavera (Fig. 2a). Essa anomalia positiva de PNMM se estende até o sul da Região Norte. Assim, essa configuração anômala também indica um deslocamento anômalo e/ ou um fortalecimento do ramo oeste do ASAS. O fortalecimento do ramo oeste do ASAS resulta em intensificação dos ventos sobre o sudoeste de Alagoas, grande parte dos estados do Sergipe e da Bahia e extremo sudoeste de Pernambuco (Fig. 2h), como também observado por Degola (2013). Desta forma, sobre a Região Nordeste há déficit de precipitação pluvial de até -150 mm

(Fig. 2i). Também há ventos mais intensos em grande parte do Espírito Santo, nordeste e sul de Minas Gerais, sul do estado do Rio de Janeiro e grande parte do estado de São Paulo.

No inverno um centro anômalo de alta pressão ocorre no Atlântico Sudoeste (Fig. 2j), o que pode indicar a atuação de bloqueios atmosféricos e anticiclones e/ ou menor atuação de ciclones. Anomalias positivas de



**Figura 2** - Anomalia sazonal de pressão ao nível médio do mar (hPa) (coluna da esquerda), vetor vento a 10 m e isotacas (ms<sup>-1</sup>; escala sombreada na direita) (coluna central) e precipitação pluvial (mm) (coluna da direita) durante a fase positiva do SAM na (a, b, c) primavera, (d, e, f) verão, (g, h, i) outono e (j, k, l) inverno. Linhas contínuas indicam a média da pressão ao nível médio do mar e linhas pontilhadas indicam anomalias significativas ao nível de 10%.

PNMM também são observadas no Atlântico Sudeste, entre 30° e 40°S, e sobre o Brasil, entre 20° e 30°S, o que pode indicar um fortalecimento do ramo leste e oeste do ASAS. Como resultado, há intensificação dos ventos na costa sudeste da Bahia, norte do Espírito Santo e extremo leste de Minas Gerais (Fig. 2k). Anomalias negativas de precipitação pluvial de até -50 mm são observadas entre o noroeste de Minas Gerais, oeste da Bahia, extremo sul do Tocantins e norte de Goiás (Fig. 2l), o que corresponde a uma redução das chuvas de no mínimo 100% em relação à climatologia do inverno (CPTEC/INPE, 2019).

Em todas as estações do ano são observadas anomalias positivas de PNMM no sul do ASAS, o que pode indicar um deslocamento para sul desse sistema durante a fase positiva do SAM, como também observado por Sun *et al.* (2017). Como o ASAS corresponde ao ramo descendente da célula de Hadley, sugere-se que a ZCIT (que está associada ao ramo ascendente desta célula) também apresente deslocamento para sul, resultando em anomalias positivas de precipitação pluvial na Região Norte (Figs. 2c, 2f, 2i, 2l). Estudos mostram uma tendência de polaridade positiva do SAM nas últimas décadas (*e.g.*, Thompson *et al.*, 2000; Thompson e Solomon, 2002; Marshall, 2003; Trenberth *et al.*, 2007), associado ao buraco da camada de ozônio (Sexton, 2001; Thompson e Solomon, 2002; Gillett e Thompson, 2003) e ao aumento nas concentrações de gases de efeito estufa (Hartmann *et al.*, 2000; Marshall *et al.*, 2004). Esta tendência observada no SAM é consistente com o deslocamento para sul do ASAS observado nos últimos anos (Sun *et al.*, 2017).

### 3.2. Fase negativa do SAM

Durante a fase negativa do SAM, associada às anomalias positivas de PNMM nas altas latitudes do Hemisfério Sul e às anomalias negativas nas latitudes médias, na primavera existe um centro anômalo de baixa pressão no Atlântico Sudoeste, contribuindo com o enfraquecimento do ramo sudoeste do ASAS (Fig. 3a). Desta forma, há anomalias positivas de precipitação pluvial no Rio Grande do Sul de até +200 mm, enquanto entre as Regiões Norte e Sudeste, além de algumas áreas da Região Nordeste, há déficit de precipitação pluvial de até -100 mm (Fig. 3c). Essa organização espacial das anomalias de precipitação pluvial sobre o Brasil é muito semelhante ao padrão de gangorra associado à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS; Casarin e Kousky, 1986; Nogués-Paegle e Mo 1997; Marengo *et al.*, 2004; Vera *et al.*, 2006; Muza *et al.*, 2009) durante a fase ativa do Sistema de Monção da América do Sul, que tipicamente inicia durante a primavera (Vera *et al.*, 2006; Silva e Kousky, 2012). Em outubro e novembro ocorrem 16% dos eventos de ZCAS (Ambrizzi e Ferraz, 2015). Assim, os resultados sugerem um enfraquecimento da ZCAS e de grande parte da convecção tropical, além de um início de estação chuvosa na região tropical do Brasil mais seca ou

atrasada. A fase negativa do SAM favorece a propagação de sistemas transientes no sul do Brasil, uma vez que o jato subtropical é fortalecido e deslocado em direção ao equador (Carvalho *et al.*, 2005; Reboita *et al.*, 2009). Desta forma, a maior frequência de ciclones no Atlântico Sudoeste pode contribuir para um menor transporte de umidade na região da ZCAS, resultando em enfraquecimento da atividade convectiva durante a fase negativa do SAM (Liebmann *et al.*, 2004; Reboita *et al.*, 2009; Vasconcellos e Cavalcanti, 2010; Rosso *et al.*, 2018; Vasconcellos *et al.*, 2019), corroborando com os resultados aqui apresentados. Em relação aos impactos nos ventos sobre o Brasil, somente na costa leste da Bahia há um enfraquecimento dos ventos de até -0,2 ms<sup>-1</sup> (Fig. 3b).

No verão há uma área de anomalias negativas de PNMM no Atlântico Sul, contribuindo com o enfraquecimento do ramo sul do ASAS, e no Pacífico Sudeste, o qual se estende em direção ao sul da América do Sul (Fig. 3d). Áreas anômalas de baixa pressão também são observadas no centro do continente em direção ao oeste do Atlântico Sul, o que contribui para o enfraquecimento de parte do ramo oeste do ASAS. Desta forma, há algumas áreas de anomalias positivas de precipitação pluvial de até +300 mm entre o norte de Goiás e o sul do Tocantins, além de áreas pontuais no norte do Mato Grosso, norte de Minas Gerais e Região Nordeste (Fig. 3f). Por outro lado, o ramo norte e leste do ASAS é fortalecido, ao mesmo tempo em que no Atlântico Norte tropical existe um enfraquecimento dos ventos alísios de nordeste (Fig. 3e), o que indica um deslocamento anômalo da ZCIT para norte, contribuindo com o déficit de precipitação pluvial inferior à -300 mm na Região Norte, além do sul do Mato Grosso e algumas áreas do Maranhão. Não há impactos significativos sobre os ventos no Brasil associados ao ASAS.

No outono um centro anômalo de baixa pressão pode ser observado no Atlântico Sudeste, bem como entre o Pacífico Sudeste e o centro-sul da América do Sul, ambos contribuindo com enfraquecimento do ramo sul e sudeste do ASAS (Fig. 3g). Desta forma, há anomalias positivas de precipitação pluvial no sul do Rio Grande do Sul de até +150 mm (Fig. 3i). Por outro lado, anomalias positivas de PNMM ocorrem entre o Atlântico Sul e Norte (40°-10° W), o que contribui com o fortalecimento do ramo noroeste do ASAS e, assim, dos ventos alísios de sudeste (Fig. 3h), com conseqüente deslocamento anômalo da ZCIT para norte. Portanto, há intensificação dos ventos alísios de sudeste sobre uma área extensa na Região Nordeste, abrangendo o centro-sul do Maranhão, grande parte do Piauí, do Rio Grande do Norte, da Paraíba, de Pernambuco, sul do Ceará, extremo oeste de Alagoas, oeste da Bahia, além do centro-norte do Tocantins e noroeste de Minas Gerais, com anomalias de até +0,4 ms<sup>-1</sup>. Fortalecimento dos ventos também é observado no oeste da Região Sul e oeste do Mato Grosso do Sul de até +0,4 ms<sup>-1</sup>, enquanto enfraquecimento de até -0,2 ms<sup>-1</sup> é observado

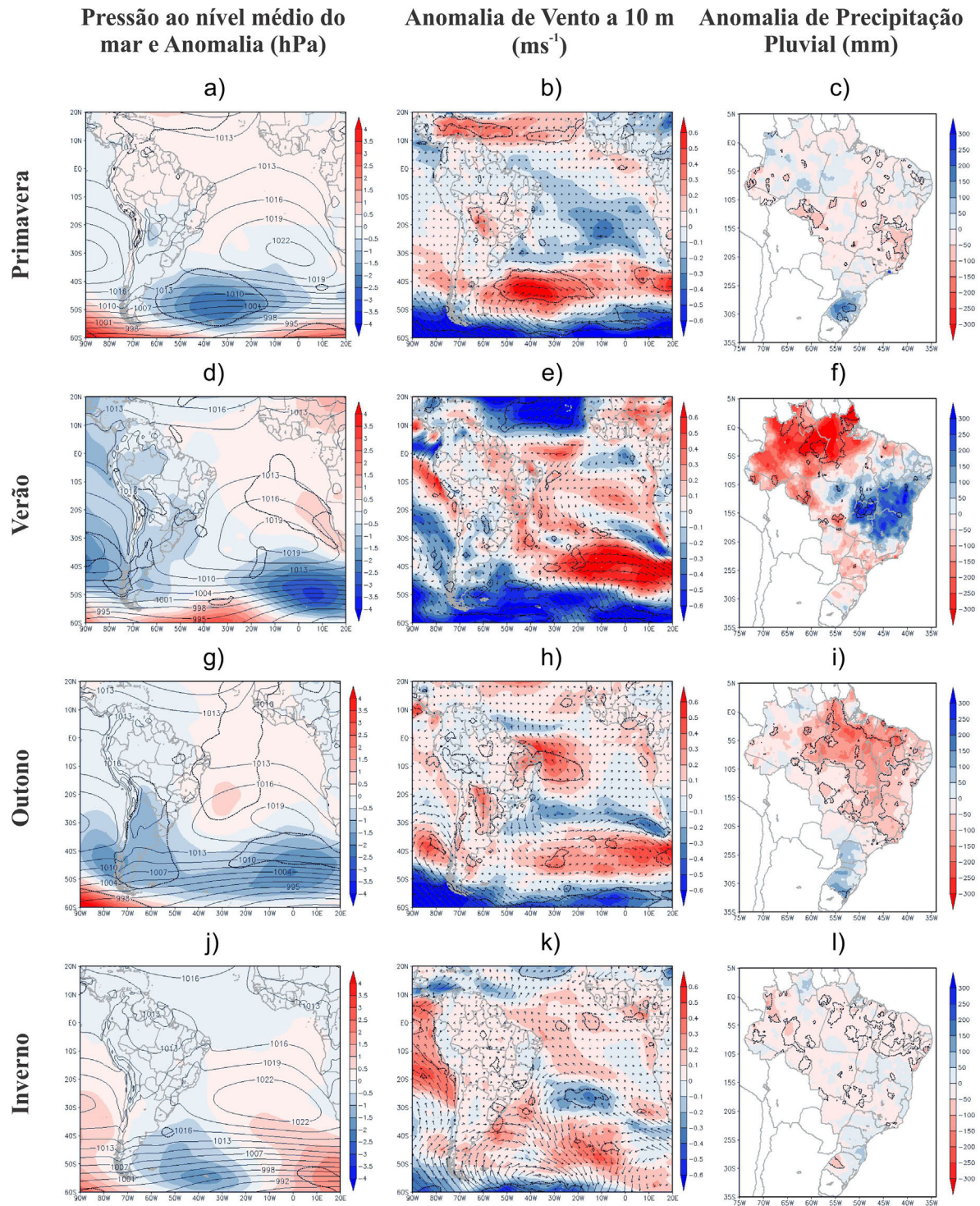


Figura 3 - Similar à Fig. 2, mas durante a fase negativa do SAM.

apenas no leste do estado de São Paulo. Em relação à precipitação pluvial (Fig. 3i), existe uma extensa área sobre grande parte das Regiões Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste com déficit de até  $-200$  mm. O padrão espacial de anomalias de precipitação pluvial indica um enfraquecimento da atividade da ZCAS e de grande parte da con-

vecção tropical (Casarin e Kousky, 1986; Nogués-Paegle e Mo, 1997; Marengo *et al.*, 2004; Vera *et al.*, 2006; Muza *et al.*, 2009), assim como observado na primavera. Em março ocorrem 10% dos eventos de ZCAS (Ambrizzi e Ferraz, 2015) e em meados de abril ocorre o fim da estação chuvosa na região tropical do país (Gan *et al.*, 2009).

Assim, os resultados sugerem um fim da estação chuvosa antecipado e com totais de precipitação pluvial menores.

No inverno há uma reduzida área de baixa pressão no Atlântico Sudoeste e de alta pressão no Atlântico Sudeste, mas nenhuma anomalia significativa é observada sobre o ASAS (Fig. 3j). Contudo, há enfraquecimento dos ventos na costa sul da Bahia e fortalecimento entre o sudeste de Minas Gerais, extremo sudoeste do Espírito Santo, sul do estado Rio de Janeiro e nordeste do estado de São Paulo, além de grande parte do Rio Grande do Sul (Fig. 3k). Domina sobre grande parte do país anomalias negativas de precipitação pluvial, concentradas principalmente nas Regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, além dos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul (Fig. 3l).

Ao contrário da fase positiva do SAM, na fase negativa em todas as estações do ano são observadas anomalias negativas de PNMM no sul do ASAS, o que pode indicar um deslocamento para norte desse sistema, como também observado por Sun *et al.* (2017). Quando o ASAS está localizado em latitudes menores, a PNMM aumenta em direção a norte, permitindo o fortalecimento dos ventos sobre as Regiões Norte e Nordeste, associado ao deslocamento para norte da ZCIT (Gilliland e Keim, 2018). Além disso, com o deslocamento anômalo do ASAS para norte, a precipitação pluvial aumenta na Região Sul e reduz na região da ZCAS (Camilloni *et al.*, 2004), conforme observado na primavera e outono.

#### 4. Conclusões

Este estudo investigou a precipitação pluvial e os ventos sobre o Brasil associados ao ASAS nas diferentes fases do SAM, entre o verão de 1980 e a primavera de 2015. Na fase positiva do SAM, com as anomalias positivas de PNMM nas latitudes médias, o ASAS tende a estar posicionado mais para sul. Assim, sugere-se que a ZCIT acompanhe o deslocamento do ASAS, resultando em anomalias positivas de precipitação pluvial na Região Norte. O ASAS é fortalecido nos ramos sul, oeste e leste, assim como há indícios de aumento na atividade de bloqueios atmosféricos e/ ou atuação de anticiclones (ciclones) mais (menos) intensos do que o normal no Atlântico Sudoeste, o que resulta em déficit de precipitação pluvial sobre o centro-sul do Brasil (com exceção do outono) e fortalecimento dos ventos em algumas áreas no sul das Regiões Nordeste, Sudeste e sul da Região Sul (com exceção da primavera e enfraquecimento dos ventos no verão entre os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo).

Na fase negativa do SAM, com as anomalias negativas de PNMM nas latitudes médias, o ASAS tende a estar posicionado mais para norte, assim como a ZCIT, contribuindo com as anomalias negativas de precipitação pluvial nas Regiões Norte e Nordeste. Assim, o ASAS é enfra-

quecido no ramo sul: primavera (ramo sudoeste), verão (ramo oeste e sul) e outono (ramo sul e sudeste); enquanto é fortalecido no ramo norte: verão (ramo norte e leste) e outono (ramo noroeste). O impacto associado é observado somente no outono, com ventos mais fracos no leste do estado de São Paulo e ventos mais intensos em grande parte da Região Nordeste e parte dos estados do Tocantins e Minas Gerais. Em relação à precipitação pluvial, sugere-se uma redução na duração da estação chuvosa na região tropical do Brasil, com um início atrasado ou mais seco na primavera e um fim adiantado ou mais seco no outono, apresentando um padrão espacial de enfraquecimento da ZCAS e de grande parte da convecção tropical, que ocorre nos meses de início (outubro e novembro) e fim (março) da fase ativa do Sistema de Monção da América do Sul.

O outono é a única estação do ano em que o fortalecimento dos ventos, especialmente na Região Nordeste, pode ser utilizado para complementar a produção de energia elétrica por fonte hidráulica devido ao déficit de precipitação pluvial, tanto na fase negativa quanto na fase positiva do SAM.

Este estudo evidencia a importância de monitorar o ASAS nas diferentes fases do SAM, especialmente associado à qualidade da estação chuvosa na região tropical do Brasil, de forma a contribuir para um melhor aproveitamento dos recursos naturais para geração de energia elétrica.

#### Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas, fase 2, sob concessão CNPq 465501 / 2014-1, FAPESP Grants 2014 / 50848-9, 2015 / 50122-0 e 2015 / 03804-9; o Subsídio 88887.136402-00INCT da Coordenação Nacional de Ensino e Treinamento (CAPES). Este trabalho também foi parcialmente financiado pelo CNPq Procs. N.ºs 454779 / 2015-1 e 304298 / 2014-0.

#### Referências

- AMBRIZZI, T.; FERRAZ, S.E.T. An objective criterion for determining the South Atlantic Convergence Zone. **Frontiers in Environmental Science**, v. 3, n. 23, p. 3-23, 2015.
- AMBRIZZI, T.; MARQUES, R.; NASCIMENTO, E. Bloqueios atmosféricos. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; JUSTI DA SILVA, M.G.A.; SILVA DIAS, M.A.F. (orgs). **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 18, 2009.
- CAMARGO DO AMARANTE, O.A.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A.L. **Atlas of Brazilian Wind Potential**. CRESEB, 44 pp., 2001. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf). Acesso em: 05 mai. 2019.

- CAMILLONI, I.; DOYLE, M.; BARROS, E.V. Interannual variability of the South American high and rainfall in southeastern South America during summer months. In: **13 Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza, 2004.
- CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; AMBRIZZI, T. Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer. **Journal of Climate**, v. 18, n. 5, p. 702-718, 2005.
- CASARIN, D.P.; KOUSKY, V.E. Anomalias de precipitação no sul do Brasil e variações na circulação atmosférica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 1, p. 83-90, 1986.
- COUGHLAN, M.J. A comparative climatology of blocking action in the two hemispheres. **Australian Meteorology Magazine**, v. 31, n. 1, p. 3-13, 1983.
- CPTEC/INPE - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Monitoramento para o Brasil: Climatologia Trimestral**. Cachoeira Paulista: INPE. Disponível em <http://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentobrasil/pt>, acesso em 15 nov. 2019.
- DEE, D.P.; KÄLLÉN, E.; SIMMONS, A.J.; HAIMBERGER, L. Comments on 'reanalyses suitable for characterizing long-term trends'. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 92, n. 1, p. 65-70, 2011.
- DEGOLA, T.S.D. **Impactos e Variabilidade do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul sobre o Brasil no Clima Presente e em Cenários Futuros**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 92 p., 2013.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2018: Ano Base 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2018, 292 p.
- GAN, M.; RODRIGUES, L.R.; RAO, V.B. Monção na América do Sul. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; JUSTI DA SILVA, M.G.A.; SILVA DIAS, M.A.F. (orgs). **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 19.
- GILLET, N.P.; KELL, T.D.; JONES, P.D. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 23, p. 1-4, 2006.
- GILLET, N.P.; THOMPSON, D. Simulation of recent Southern hemisphere climate change. **Science**, v. 302, n. 5643, p. 273-275, 2003.
- GILLILAND, J.M.; KEIM, B.D. Position of the South Atlantic Anticyclone and its impact on surface conditions across Brazil. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 57, n. 3, p. 535-553, 2018.
- GREEN, B.; MARSHALL, J. Coupling of trade winds with ocean circulation damps ITCZ shifts. **Journal of Climate**, v. 30, n. 12, p. 4395-4411, 2017.
- HARTMANN, D.L.; WALLACE, J.M.; LIMPASUVAN, V.; THOMPSON, D.W.J.; HOLTON, J.R. Can ozone depletion and global warming interact to produce rapid climate change? **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 97, n. 4, p. 1412-1417, 2000.
- HASTENRATH, S. **Climate and Circulation of the Tropics**. New York: D. Reidel, 455 p, 1985.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. Brasília: IBGE, 2010. Disponível em <http://censo2010.ibge.gov.br>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE divulga as Estimativas de População dos Municípios Para 2018**. Brasília: IBGE, 2019. Disponível em <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/22374-ibge-divulga-as-estimativas-de-populacao-dos-municipios-para-2018>.
- KIDSON, J.W. Interannual variations in the Southern hemisphere circulation. **Journal of Climate**, v. 1, n. 12, p. 1177-1198, 1988.
- KIDSON, J.W.; WATTERSON, I.G. The structure and predictability of the "high-latitude mode" in the CSIRO9 general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 56, n. 22, p. 3859-3873, 1999.
- LIEBMANN, B.; KILADIS, G.N.; VERA, C.S.; SAULO, A.C.; CARVALHO, L.M.V. Subseasonal variations of rainfall in South America in the vicinity of the low-level jet east of the Andes and comparison to those in the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 17, n. 19, p. 3829-3842, 2004.
- MÄCHEL, H.; KAPALA, A.; FLOHN, H. Behaviour of the centers of action above the Atlantic since 1881. Part I: Characteristics of seasonal and interannual variability. **International Journal of Climatology**, v. 18, n. 1, p. 1-22, 1998.
- MARENGO, J.A.; SOARES, W.R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the low-level jet East of the Andes as derived from NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, p. 2261-2280, 2004.
- MARSHALL, G.J. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. **Journal of Climate**, v. 16, n. 24, p. 4134-4143, 2003.
- MARSHALL, G.J.; STOTT, P.A.; TURNER, J.; CONNOLLEY, W.M.; KING, J.C.; LACHLAN-COPE, T.A. Causes of exceptional atmospheric circulation changes in the Southern Hemisphere. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 14, 2004.
- MENDES, M.C.D.; TRIGO, R.M.; CAVALCANTI, I.F.A.; DACAMARA, C.C. Blocking episodes in the Southern hemisphere: Impact on the climate of adjacent continental Areas. **Pure and Applied Geophysics**, v. 165, p. 1941-1962, 2008.
- MENDES, M.C.D.; TRIGO, R.M.; CAVALCANTI, I.F.A.; DACAMARA, C.C. Bloqueios atmosféricos de 1960 a 2000 sobre o Oceano Pacífico Sul: Impactos climáticos e mecanismos físicos associados. **Revista Brasileira de Meteorologia** (Impresso), v. 20, n. 2, p. 175-190, 2005.
- MUZA, M.N.; CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Intraseasonal and interannual variability of extreme dry and wet events over Southeastern South America and the Subtropical Atlantic during Austral Summer. **Journal of Climate**, v. 22, n. 7, p. 1682-1699, 2009.
- NAKAMURA, H.; WALLACE, J.M. Synoptic behaviour of baroclinic eddies during blocking onset. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 7, p. 1892-1903, 1993.
- NOGUÊS-PAEGLE, J.; MO, K.C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 2, p. 279-291, 1997.



- OLIVEIRA, F.N.M.; CARVALHO, L.M.V.; AMBRIZZI, T. A new climatology for Southern Hemisphere blockings in the winter and the combined effect of ENSO and AAO phases. **International Journal of Climatology**, v. 34, p. 1676-1692, 2014.
- REBOITA, M.S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P. Relationship between the Southern annular mode and Southern hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 48-55, 2009.
- REBOITA, M.S.; AMBRIZZI, T.; SILVA, B.A.; PINHEIRO, R.F.; ROCHA, R.P. The South Atlantic subtropical anticyclone: Present and future climate. **Frontiers in Earth Sciences**, v. 7, n. 8, p. 1-15, 2019.
- REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. Regimes of precipitation in South America: A bibliographical review. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.
- RODRIGUES, R.R.; WOOLLINGS, T. Impact of atmospheric blocking on South America in austral summer. **Journal of Climate**, v. 30, n. 5, p. 1821-1837, 2017.
- ROSSO, F.V.; BOIASKI, N.T.; FERRAZ, S.E.T.; ROBLES, T.C. Influence of the Antarctic oscillation on the South Atlantic convergence Zone. **Atmosphere**, v. 9, n. 11, p. 1-19, 2018.
- SATYAMURTY, P.; NOBRE, C.A.; SILVA DIAS, P.L. South America. In: KAROLY, D.J.; VINCENT, D.G. (eds). **Meteorology of the Southern Hemisphere**, Meteorol. Monogr., n. 49, p. 119-139, Am. Meteorol. Soc., 1998.
- SEXTON, D.M.H. The effect of stratospheric ozone depletion on the phase of the Antarctic oscillation. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 19, p. 3697-3700, 2001.
- SILVA, V.B.S.; KOUSKY, V.E. **The South American Monsoon System: Climatology and Variability**. Modern Climatology, Shih-Yu Wang (ed). New York, InTech, 2012.
- SIMMONS, A.; UPPALA, S.; DEE, D.; KOBAYASHI, S. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. **ECMWF Newsletter**, n. 110, p. 25-35, 2007.
- SUN, X.; COOK, K.H.; VIZY, E.K. The South Atlantic subtropical high: Climatology and interannual variability. **Journal of Climate**, v. 30, n. 9, p. 3279-3296, 2017.
- THOMPSON, D.W.J.; SOLOMON, S. Interpretation of recent southern hemisphere climate change. **Science**, v. 296, n. 5569, p. 895-899, 2002.
- THOMPSON, D.W.J.; WALLACE, J.M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. **Journal of Climate**, v. 13, n. 5, p. 1000-1016, 2000.
- THOMPSON, D.W.J.; WALLACE, J.M.; HEGERL, G.C. Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends. **Journal of Climate**, v. 13, n. 5, p. 1018-1036, 2000.
- TRENBERTH, K.E.; JONES, P.D.; AMBENJE, P.; BOJARIU, R.; EASTERLING, D. *et al.* Observations: surface and atmospheric climate change. In: **Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER, H.L. (eds). Cambridge: Cambridge University Press, pp. 237-336, 2007.
- UPPALA, S.; DEE, D.; KOBAYASHI, S.; BERRISFORD, P.; SIMMONS, A. Towards a climate data assimilation system: status update of ERA-interim. **ECMWF Newsletter**, n. 115, p. 12-18, 2008.
- VASCONCELLOS, F.C.; CAVALCANTI, I.F.A. Extreme precipitation over Southeastern Brazil in the austral summer and relations with the Southern Hemisphere annular mode. **Atmospheric Science Letters**, v. 11, n. 1, p. 21-26, 2010.
- VASCONCELLOS, F.C.; PIZZOCHERO, R.M.; CAVALCANTI, I.F.A. Month-to-month impacts of Southern annular mode over South America climate. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 783-792, 2019.
- VERA, C.; HIGGINS, W.; AMADOR, J.; AMBRIZZI, T.; GARREAUD, R. *et al.* Towards a unified view of the American Monsoon systems. **Journal of Climate**, v. 19, n. 20, p. 4977-5000, 2006.
- WILKS, D.S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences – An Introduction**. 2 ed. New York: Academic Press, 2006.
- XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. An update of Xavier, King and Scanlon (2016) daily precipitation gridded data set for the Brazil. **Proceedings of the 18th Brazilian Symposium on Remote Sensing**, Santos, p. 28-31, 2017.
- XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.