



Alterações na Circulação de Hadley Regional e na Alta Subtropical do Atlântico Sul em um Cenário de Aquecimento Global
Changes in the Regional Hadley Circulation and in the South Atlantic Subtropical High in a Global Warming Scenario

Lorena de Moura Joia Gomes & Ana Carolina Vasques Freitas

*Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira,
Rua Irmã Ivone Drummond, nº 200, Distrito Industrial II, 35.903-087, Itabira, MG
E-mails: lorena.joia@hotmail.com; ana.freitas@unifei.edu.br
Recebido em: 07/06/2018 Aprovado em: 16/11/2018
DOI: http://doi.org/10.11137/2020_3_227_239*

Resumo

A Circulação de Hadley (CH) é de extrema importância para o sistema climático, uma vez que atua como um dos reguladores fundamentais do balanço de energia terrestre. O movimento subsidente da CH no inverno pode explicar a origem das altas subtropicais, que são sistemas de alta pressão semipermanentes. Estudos têm apontado mudanças na posição e intensidade das altas subtropicais, assim como na intensidade e largura da CH. Diante disto, este estudo buscou entender se existe uma relação entre as mudanças na CH sobre o Oceano Atlântico (CHOA) e na Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Foi utilizado o Modelo Climático Regional RegCM4 e dados da reanálise Era-Interim. Os resultados encontrados mostraram mudanças na CHOA e na ASAS ao longo dos anos de 1979 a 2015, verificando-se uma tendência significativa de intensificação e deslocamento na direção do polo da fronteira sul da CHOA e uma tendência significativa de intensificação da ASAS. O modelo regional reproduziu as mudanças observadas na circulação. Casos de intensificação (enfraquecimento) da CHOA podem estar relacionados à eventos de El Niño (La Niña). Já a intensidade da ASAS e do braço descendente da CHOA estão associados à anomalias na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na região tropical do Pacífico Oeste e na região subtropical do Atlântico Oeste, próximo à costa sudeste da América do Sul.

Palavras-chave: *Circulação regional; modelo climático; reanálise.*

Abstract

The Hadley Circulation (HC) is of extreme importance to the climate system, as it acts as one of the fundamental regulators of the terrestrial energy balance. The subsiding HC movement in winter may explain the origin of subtropical highs, which are semi-permanent high-pressure systems. Studies have pointed out changes in the position and intensity of the subtropical highs, as well as intensity and width of HC. Therefore, this study sought to understand if there is a relationship between the changes in the HC over the Atlantic Ocean (HCAO) and in the South Atlantic Subtropical High (SASH). The RegCM4 Regional Climate Model and ERA-Interim reanalysis data were used. The results showed changes in CHOA and in ASAS during 1979-2015 period, with a significant trend of intensification and displacement towards the South Pole boundary of CHOA and a significant trend of ASAS intensification. The regional model reproduced the observed changes in circulation. Cases of intensification (weakening) of CHOA may be related to El Niño (La Niña) events. On the other hand, the intensity of ASAS and the descending branch of CHOA are associated to anomalies in the Sea Surface Temperature (SST) in the tropical region of the West Pacific and in the subtropical region of the West Atlantic, near the southeast coast of South America.

Keywords: *regional circulation; climate model; reanalysis*

1 Introdução

A circulação geral da atmosfera é uma das responsáveis pela redistribuição de energia em direção aos polos. Quaisquer mudanças nessa circulação podem interferir no balanço de energia terrestre e por consequência na temperatura média global. Dentre os sistemas constituintes da circulação geral atmosférica, pode-se destacar a Circulação de Hadley (CH), que é definida como sendo células simétricas localizadas a 30° ao norte e a 30° ao sul da linha do equador e que atuam no transporte e no balanço de energia global. Essas células são circulações fechadas, formadas pela convergência de ar quente na região do equador. Esse ar quente ascende e diverge na alta troposfera e ao ser resfriado descende na região subtropical (Grimm & Ambrizzi, 2009).

O movimento subsidente da CH no inverno e a orografia podem explicar a origem das altas subtropicais, que são sistemas de alta pressão semipermanentes (Seager *et al.*, 2003). Já durante o período do verão, Rodwell & Hoskins (2001) encontraram que o aquecimento diabático zonalmente assimétrico, associado com o contraste térmico continente-oceano, tem um papel dominante na formação das altas subtropicais, uma vez que nesse período a CH está enfraquecida.

No Hemisfério Sul (HS), a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) influencia o clima na América Sul (Vianello & Maia, 1986), principalmente nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul do Brasil. As variações nos sistemas de alta pressão ocorrem tanto no inverno quanto no verão com mudanças latitudinal e longitudinal em sua localização. Porém, nos meses de junho até outubro a ASAS se expande e adentra o continente sul-americano tendo uma maior influência no clima das regiões Sudeste e Nordeste (Degola, 2013).

Portanto, os sistemas de alta pressão interferem no clima regional no inverno e no verão. A sua permanência sobre uma região pode impedir o avanço de sistemas frontais, exercendo um papel de bloqueio atmosférico, interrompendo a formação de nuvens. A sua maior influência no inverno ocorre devido a ASAS adentrar no continente e atuar como sistema de bloqueio. Assim, a mesma afeta dramaticamente os grandes centros urbanos, por meio do estabelecimento de inversões térmicas, causando problemas para saúde das pessoas e para o meio ambiente em que vivem (Bastos & Ferreira, 2000).

Vários estudos têm mostrado que recentemente os parâmetros fundamentais da CH estão sendo afetados, ou seja, está havendo uma significativa variação na intensidade e na localização dessa circulação (Lu *et al.*, 2007, 2008, 2009; Seidel *et al.*, 2008), podendo resultar também em variações na ASAS e, em consequência, na alteração do clima na América do Sul, principalmente no inverno, quando

a conexão entre esses dois sistemas atmosféricos é de maior predominância. Sendo assim, este estudo pretende analisar as mudanças que vem ocorrendo na estrutura e intensidade da CH e investigar a relação dessas com as alterações na localização e intensidade da ASAS. Para isso, são utilizados dados da reanálise Era-Interim e dados obtidos através da simulação do modelo climático regional RegCM4 entre os anos de 1979-2015 e 1996 a 2011, respectivamente (Giorgi *et al.*, 2012).

2 Metodologia

Para obtenção dos centros de pressão a nível médio do mar, de modo a rastrear a localização e intensidade da ASAS, foram utilizados dados mensais obtidos da European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) reanálise global Era-Interim, (Dee *et al.*, 2011) com resolução horizontal de 1,5° x 1,5° de latitude por longitude, resolução temporal de 6 h (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC), compreendendo o período de 1979 a 2015. Foram utilizados 17 (dezesete) níveis de pressão vertical: 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 e 10 hPa.

2.1 Definição da CH

A metodologia utilizada para a definição da intensidade e largura da CH regional é a mesma utilizada em Chen *et al.* (2014). O índice de intensidade (ICH) é baseado no cisalhamento vertical do vento meridional divergente médio zonal (m/s) em 200 e 850 hPa ($V_x 200 - V_x 850$). O campo de vento meridional pode ser descrito como tendo um componente rotacional (V_ψ), que pode ser obtido a partir da função de corrente, e um componente divergente (V_χ), que pode ser obtido a partir da velocidade potencial:

$$V_{\psi,\chi} = \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial y} \quad (1)$$

O componente rotacional do vento não contribui para a divergência atmosférica associada com o movimento vertical. Por isso, o ICH é baseado no componente divergente do vento meridional.

Já o limite extratropical da CH regional é definido como sendo a latitude onde a radiação de onda longa (ROL) é igual a 240 W/m² (obtida via interpolação linear), conforme Chen *et al.* (2014). Segundo Bomventi *et al.* (2006), a radiação de onda longa está associada diretamente com a formação, ou não formação de nuvens. Portanto, forte movimento ascendente nos trópicos está associado a convecção profunda e baixos valores de ROL. Os maiores valores de ROL são observados nos subtropicais e diminuem rapidamente a partir dos subtropicais até as latitudes médias, com valores de transição próximos a 250 W/m² (Chen *et*

al., 2014). O uso de valores próximos a esse (240 ou 260 W/m²) para definição do limite extratropical da CH levam a resultados similares, conforme demonstrado por Chen *et al.* (2014) e Freitas & Ambrizzi (2015).

Para os cálculos da intensidade e posição da CH utilizou-se o software NCL (Ncar Command Language - <http://www.ncl.ucar.edu/>). Os dados de ROL interpolados são obtidos do Climate Diagnostics Center (CDC) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e tem uma resolução horizontal de 2.5°×2.5° (Liebmann & Smith, 1996).

A região do Oceano Atlântico (38°O-10°E, 20°S-5°N) foi selecionada para o estudo da CH regional relacionada à ASAS. A análise será feita para o trimestre de Junho-Julho-Agosto (JJA). A banda latitudinal é escolhida de acordo com a distribuição climatológica dos ventos divergentes, de forma a localizar as latitudes onde se encontram as regiões de convergência do ar (movimento ascendente) e divergência (movimento subsidente).

2.2 Rastreamento da ASAS

O rastreamento da ASAS foi baseado no método empregado em Degola (2013). Esse método se baseia no algoritmo do vizinho mais próximo, escrito em linguagem Matlab. Esse método é um esquema numérico que passa por todos os pontos na área estipulada, determinando o ponto máximo. Sendo assim, é possível identificar o ponto de maior pressão dentro da área determinada, que é onde se encontra o centro da ASAS.

Dessa forma, para realizar o rastreamento, foram utilizados os dados de pressão ao nível médio do mar obtidos a partir da reanálise ERA-Interim em um período de 36 anos (1979-2015). Posteriormente, essas informações foram agregadas ao algoritmo, via Matlab (versão R2016a), que rastreou o centro de máxima pressão no domínio compreendido entre 38°S-20°S e 38°O-10°E, domínio onde a ASAS se encontra.

O algoritmo resulta na latitude, longitude e as maiores pressões do anticiclone, para cada mês dos 36 anos estudados.

2.3 Simulação com o Modelo Regional RegCM4

Os dados diários (a cada seis horas) utilizados para o funcionamento ou execução do modelo são obtidos no site do RegCM4 data WEB (<http://users.ictp.it/~pubregcm/RegCM4/globedat.htm>). Os dados da reanálise Era-Interim (Dee *et al.*, 2011) e os dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Weekly Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OI_WK) V2 do National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) (Reynolds *et al.*,

2002) são interpolados na grade do modelo e proveem as condições de contorno meteorológicas de grande escala.

Para realizar o estudo, foi utilizada uma simulação realizada por Freitas & Ambrizzi (2015) no período de 1995-2011. O primeiro ano foi descartado para evitar problemas relativos ao “*spin-up*”. Uma grade horizontal de 60 km, com projeção *Rotated Mercator*, e parametrização cumulus do tipo Kuo foi usada. Nesse esquema, a convecção é disparada em uma baixa troposfera convectivamente instável quando a convergência da coluna de umidade excede um determinado limiar (Giorgi *et al.*, 2012).

Além disso, Freitas & Ambrizzi (2015) mostraram que, utilizando esse esquema, as mudanças na precipitação, associadas com as modificações na CH sobre a América do Sul, foram reproduzidas razoavelmente.

Os dados mensais do Era-Interim (Dee *et al.*, 2011), a série de dados do Global Precipitation Climatology Centre (GPCC - <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcc.html>) (Schneider *et al.*, 2014) e os dados médios mensais da TSM do Hadley Centre Global Sea Ice and Sea Surface Temperature (HADISST - <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html>) (Rayner *et al.*, 2003) também serão utilizados neste estudo.

3 Resultados

A seguir são apresentados os resultados referentes as tendências nas séries temporais de largura e intensidade da CH e da ASAS, a fim de verificar as suas alterações ao longo dos anos de 1979 a 2015 e de 1996 a 2011. Cabe ressaltar que as séries temporais foram todas normalizadas (a média histórica foi removida e dividiu-se pelo desvio padrão), tornando-se adimensionais.

3.1 Largura e intensidade da CH: 1979-2015

O comportamento da célula de Hadley sobre o Oceano Atlântico em JJA é apresentado na Figura 1. Pode-se verificar que na região entre 0°S e 30°S os valores de ômega são positivos (caracterizando movimentos descendentes), há convergência do vento horizontal em altos níveis e divergência horizontal em baixos níveis. Já entre 5°N e 10°N o padrão é oposto, com movimentos ascendentes, convergência do vento em baixos níveis e divergência horizontal em altos níveis.

A Figura 2 apresenta a série temporal normalizada da latitude da fronteira sul da CH sobre o Oceano Atlântico (CHOA) no período de 1979-2015 de acordo com os dados da reanálise Era-Interim para a média de JJA. Pode-se verificar que no período 1979-1997 a fronteira sul da CH se encontrava predominantemente mais ao norte. Porém, com o passar dos anos, a célula está se expandindo na direção do polo sul. Hu & Zhou (2007) também observaram

que a CH tem se expandido em ambos os hemisférios desde 1979. Isso é demonstrado pela linha de tendência que indica o deslocamento da CHOA em direção ao polo sul. Essa tendência é de 0,55 por década e é estatisticamente significativa ao nível de 95% de acordo com o teste *t* de Student.

Além das variações na estrutura da CH regional, a sua intensidade também está sofrendo alterações. O cisalhamento vertical do vento meridional divergente em 200 e 850 hPa fornece valores positivos e negativos. Os valores negativos (positivos) indicam uma intensificação (enfraquecimento) da CH no Hemisfério Sul. Isso é devido ao fato de que a CH no Hemisfério Sul (Hemisfério Norte) é negativa (positiva), correspondendo a uma circulação anti-horária (horária), de acordo com a convenção comumente adotada. A Figura 3 mostra a série temporal normalizada da intensidade da CHOA no período de 1979-2015 de acordo com os dados da reanálise Era-Interim em JJA. Pode-se

verificar que existe uma tendência de intensificação da CH com o passar dos anos. Nos anos de 1988 e 2010, particularmente, a CH esteve muito intensa. A tendência de intensificação da CH sobre o Oceano Atlântico é de 0,2 por década. Este valor é estatisticamente significativo ao nível de 90% de acordo com o teste *t* de Student.

Com relação a ASAS, no período de 1979-2015 verificou-se uma tendência muito sutil (não significativa estatisticamente) de deslocamento na direção do polo sul, uma tendência mais acentuada (porém também não significativa) de deslocamento na direção oeste e uma clara tendência de aumento na intensidade ao longo dos anos de 0,3 por década, valor estatisticamente significativo ao nível de 95% de acordo com o teste *t* de Student (figuras não apresentadas). É interessante notar que este valor de tendência de intensificação da ASAS é muito próximo ao encontrado para a CHOA.

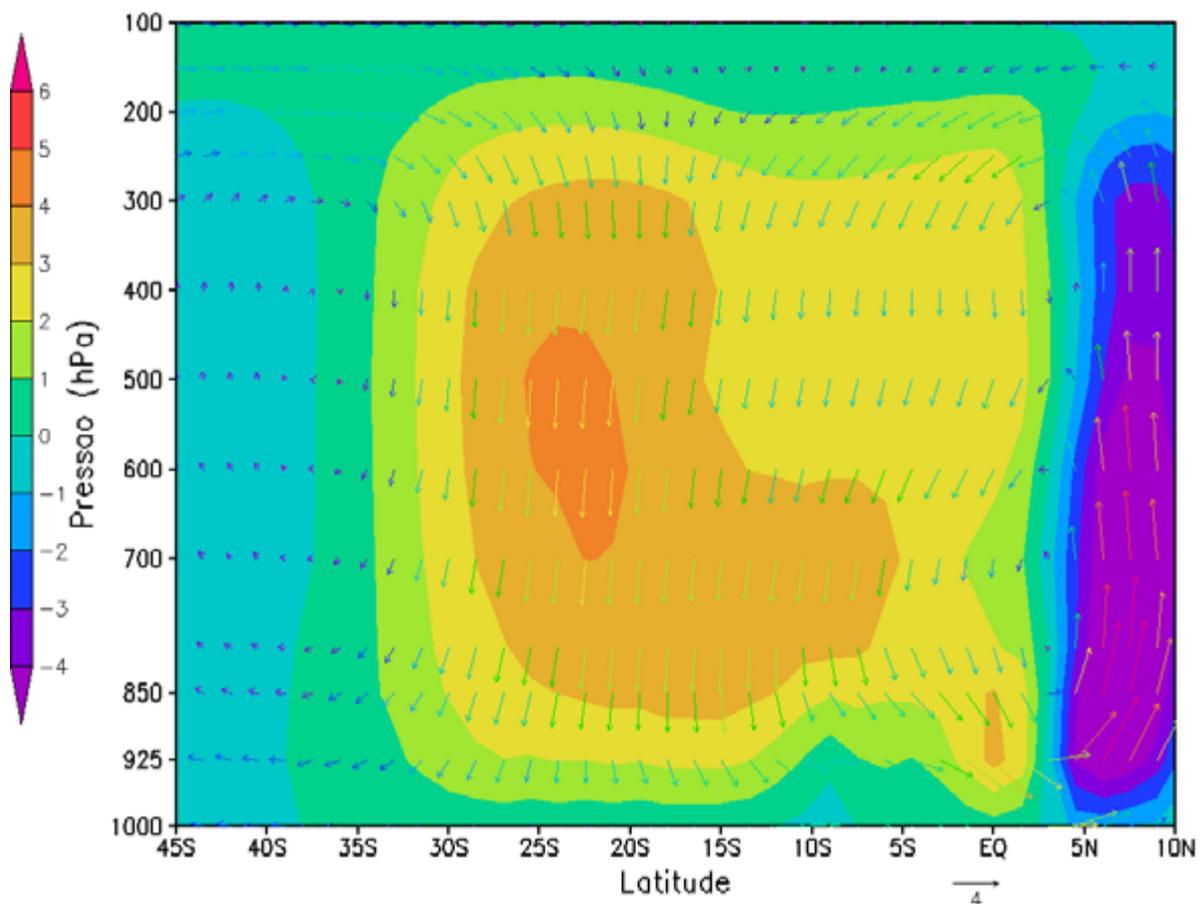


Figura 1 Média climatológica da Célula de Hadley (1979-2015) obtida por meio da média longitudinal (38°O-10°E) do vento divergente [m/s] (vetores) e da velocidade vertical - ômega [Pa/s] (sombreado), de acordo com os dados da reanálise Era-Interim.

Alterações na Circulação de Hadley Regional e na Alta Subtropical do Atlântico Sul em um Cenário de Aquecimento Global
Lorena de Moura Joia Gomes & Ana Carolina Vasques Freitas

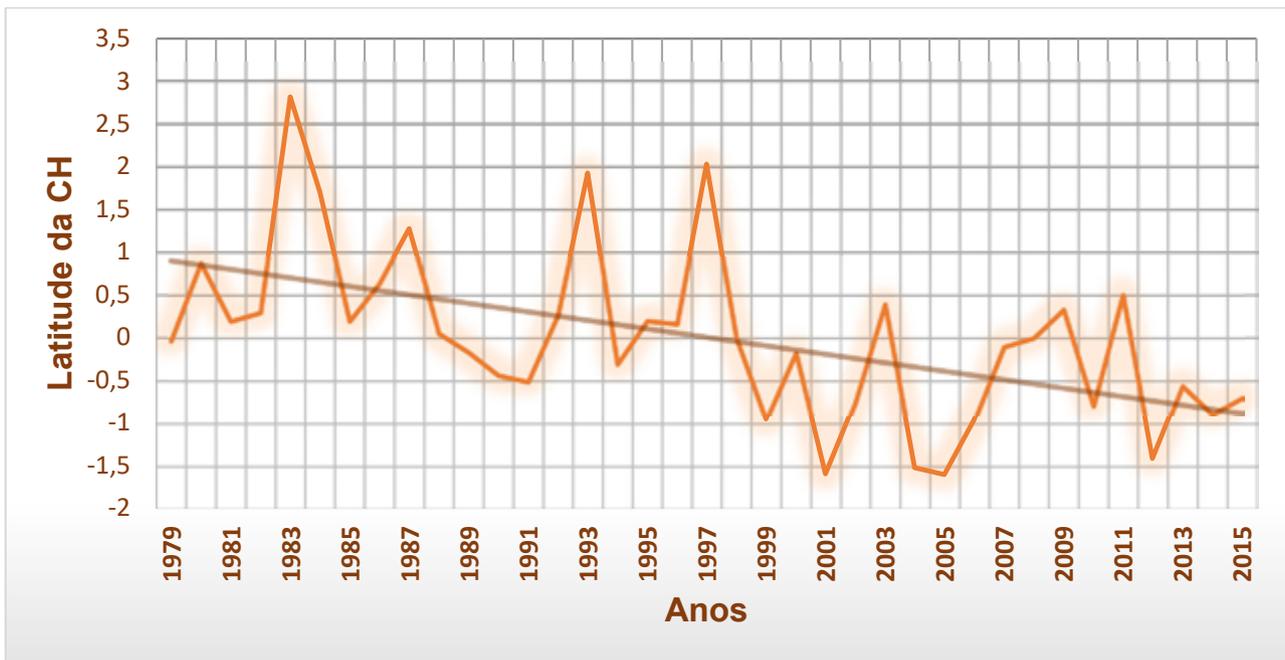


Figura 2 Série temporal normalizada da latitude da fronteira sul da CHOA em JJA com linha de tendência para o período de 1979-2015 de acordo com os dados da reanálise Era-Interim.

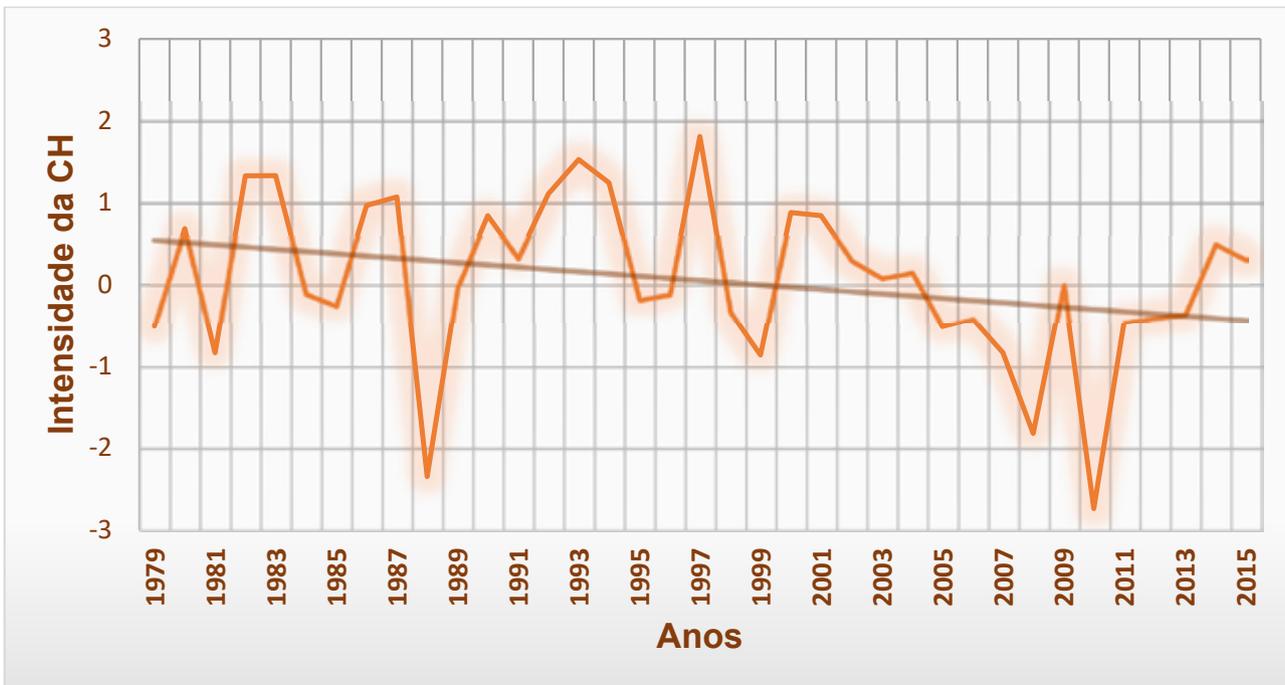


Figura 3 Série temporal normalizada da intensidade da CHOA em JJA com linha de tendência para o período de 1979-2015 de acordo com os dados da reanálise Era-Interim.

3.2 Ômega médio: 1996-2011 (Reanálise e RegCM4)

A intensidade do braço descendente da CHOA e o comportamento da ASAS são analisados utilizando-se a versão 4 do modelo climático regional RegCM, para a média de JJA, entre os anos de 1996 a 2011. Os dados da reanálise Era-Interim, para esse mesmo período, são utilizados para fins de comparação e validação do modelo.

Anteriormente verificou-se, através dos dados da reanálise de 1979-2015, uma intensificação do braço descendente da CHOA. Se analisarmos a série temporal de ômega médio de 1996-2011 através dos dados da simulação do modelo RegCM4 (Figura 4), podemos verificar uma tendência positiva igual a $3,9 \times 10^{-4}$ por década, valor muito próximo ao obtido para o período de 1979-2015, porém não significativo estatisticamente.

A correlação entre o braço descendente da CHOA e a ASAS, de acordo com os dados da simulação do modelo RegCM4 no período de 1996-2011, é igual a 0,66, valor estatisticamente significativo ao nível de 95%. Já de acordo com os dados da Reanálise Era-Interim, a correlação é igual a 0,6 no período de 1996-2011 e 0,71 no período 1979-2015.

É possível comparar a variação da intensidade do braço descendente da CHOA utilizando o RegCM4, com os dados de ômega obtidos a partir da reanálise Era-Interim (Figura 4). Pode-se também observar nesse caso, uma tendência positiva (não significativa estatisticamente) com o passar dos anos igual a $9,3 \times 10^{-4}$ por década, indicando uma intensificação do braço descendente da CHOA. É possível

também perceber que a variação temporal da intensidade do braço descendente da CHOA entre o modelo climático e a reanálise é bem semelhante.

3.3 Latitude da ASAS: 1996-2011 (Reanálise e RegCM4)

Conforme descrito nas seções anteriores, o braço descendente da CH origina os sistemas de alta pressão, que interferem significativamente na climatologia global. Com isso, a Figura 5 exibe a série temporal normalizada da variação da latitude da ASAS em JJA, entre os anos de 1996 e 2011, através dos dados obtidos pela simulação do modelo regional RegCM4. Pode-se verificar uma grande oscilação na posição latitudinal da ASAS com uma tendência de deslocamento na direção do polo sul, chegando no seu máximo em 2010, cerca de 32°S. A tendência da variação latitudinal da ASAS é de 0,95 por década (não significativo estatisticamente).

Existem grandes diferenças entre a variação latitudinal da ASAS através do modelo regional RegCM4 e através dos dados da Reanálise Era-Interim, apresentados pela série temporal normalizada entre os anos de 1996-2011, no período do inverno (JJA). Contudo, nos dois casos, existe uma tendência de deslocamento da ASAS na direção do polo sul, embora não significativa estatisticamente. A tendência de variação latitudinal da ASAS a partir dos dados da Reanálise Era-Interim é de 0,6 por década (valor não estatisticamente significativo).

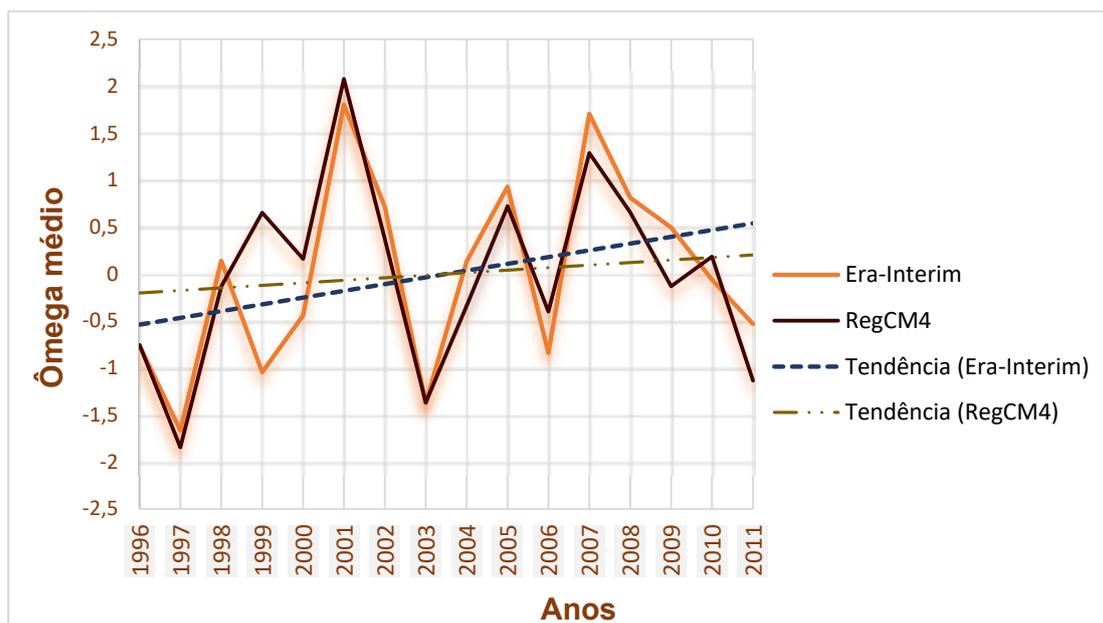


Figura 4 Série temporal normalizada de ômega médio em JJA com as linhas de tendência para o período de 1996-2011, de acordo com os dados da simulação do modelo RegCM4 e da reanálise Era-Interim.

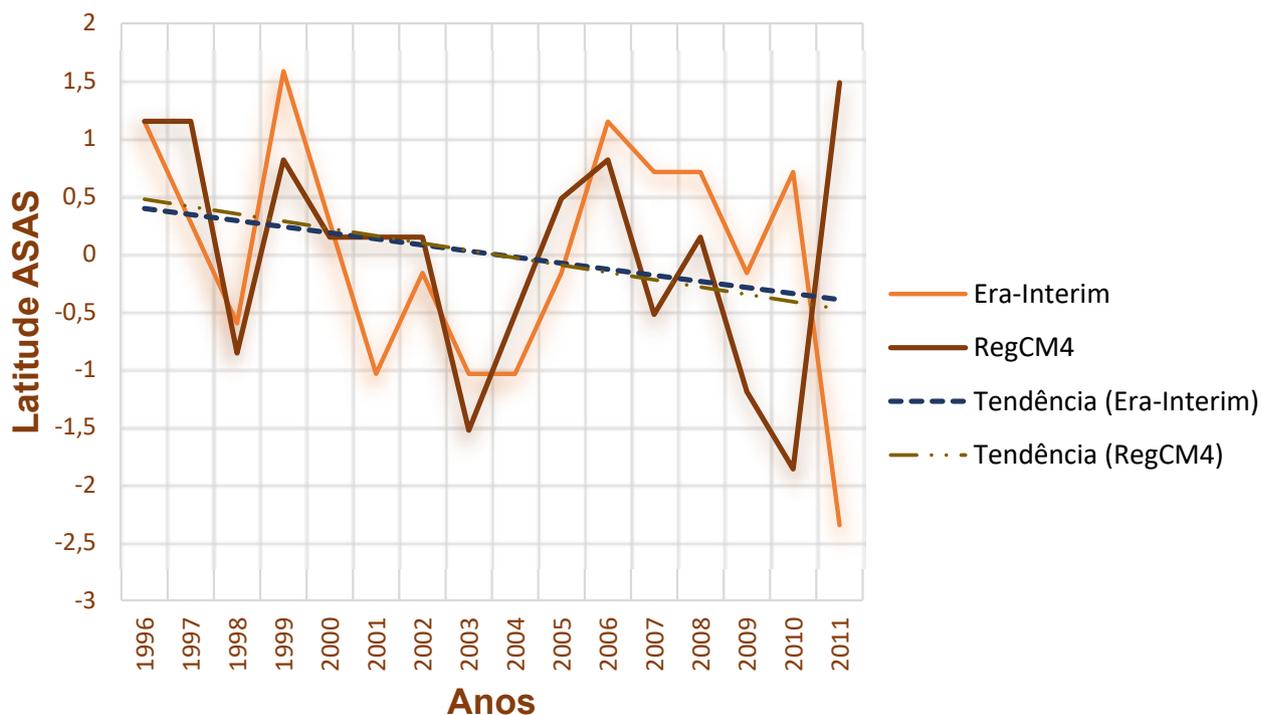


Figura 5 Série temporal normalizada da latitude da ASAS em JJA com as linhas de tendência para o período de 1996-2011, de acordo com os dados da modelo regional RegCM4 e Reanálise Era-Interim.

3.4 Longitude da ASAS: 1996-2011 (Reanálise e RegCM4)

A Figura 6 apresenta a série temporal normalizada da longitude da ASAS compreendida entre os anos de 1996-2011, em JJA, para o modelo RegCM4. A posição longitudinal da ASAS sofre variações ao longo dos anos, com tendência de se deslocar no sentido leste. O sistema de alta pressão tem seu pico máximo no sentido leste no ano de 2003, atingindo a posição de 0.5°O. Enquanto a variação da ASAS no sentido oeste produz uma anomalia anticiclônica no centro do Oceano Atlântico Sul, a variação na direção leste, produz o padrão oposto (Degola, 2013). A tendência de variação longitudinal da ASAS é de 4,7 por década (valor não significativo estatisticamente).

Ao contrapor o comportamento longitudinal da ASAS, a partir dos dados do modelo regional RegCM4 apresentado acima, com os dados da reanálise Era-Interim entre os anos de 1996 e 2011, em JJA, pode-se também perceber uma tendência da ASAS em se deslocar no sentido leste. Pode-se notar, a partir da Figura 6, que o modelo RegCM4 apresenta um comportamento razoavelmente similar ao encontrado para a posição longitudinal da ASAS através dos dados da reanálise ao longo dos anos. A tendência de variação longitudinal da ASAS a partir

dos dados da reanálise Era-Interim é de 2,2 por década no sentido leste, valor menor ao encontrado a partir do modelo RegCM4 e esse não é estatisticamente significativo.

3.5 Intensidade da ASAS: 1996-2011 (Reanálise e RegCM4)

A alteração na intensidade da ASAS pode ser analisada através da série temporal normalizada apresentada na Figura 7, no período de inverno (JJA), entre os anos de 1996 e 2011. Nota-se uma tendência muito sutil de aumento da intensidade da ASAS ao longo dos anos a partir dos dados da simulação, atingindo uma maior pressão em 2010 com 1029,35 hPa. A tendência de intensificação da ASAS é de 0,2 por década, não sendo estatisticamente significativa.

Comparando-se a intensidade do anticiclone através do modelo regional RegCM4 com os dados da reanálise Era-Interim (Figura 7), percebe-se também uma leve tendência de intensificação da ASAS ao longo dos anos nos dados da reanálise. Pode-se também notar que o modelo tende a subestimar a intensidade da ASAS ao longo dos anos comparado aos dados da reanálise. A tendência de intensificação da ASAS, a partir dos dados da reanálise Era-Interim, é de 0,07 por década, e não é estatisticamente significativa.

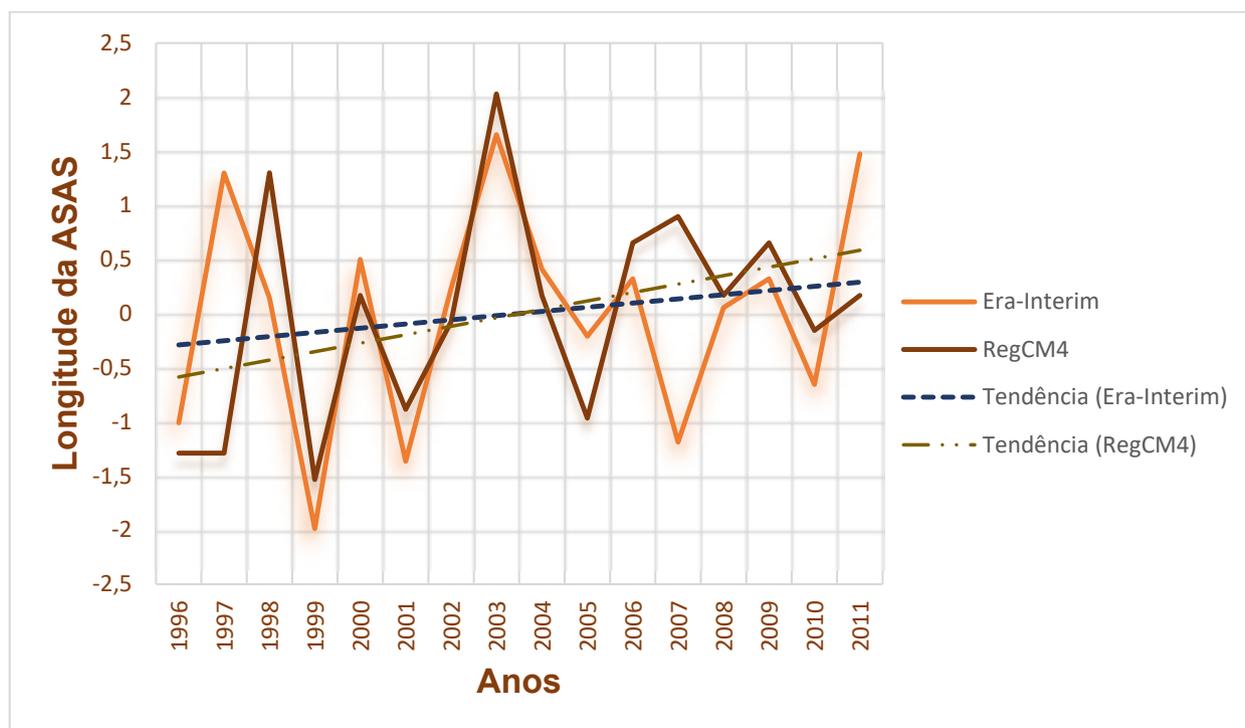


Figura 6 Série temporal normalizada da longitude da ASAS em JJA com as linhas de tendência para o período de 1996-2011 de acordo com os dados do modelo regional RegCM4 e da reanálise Era-Interim.

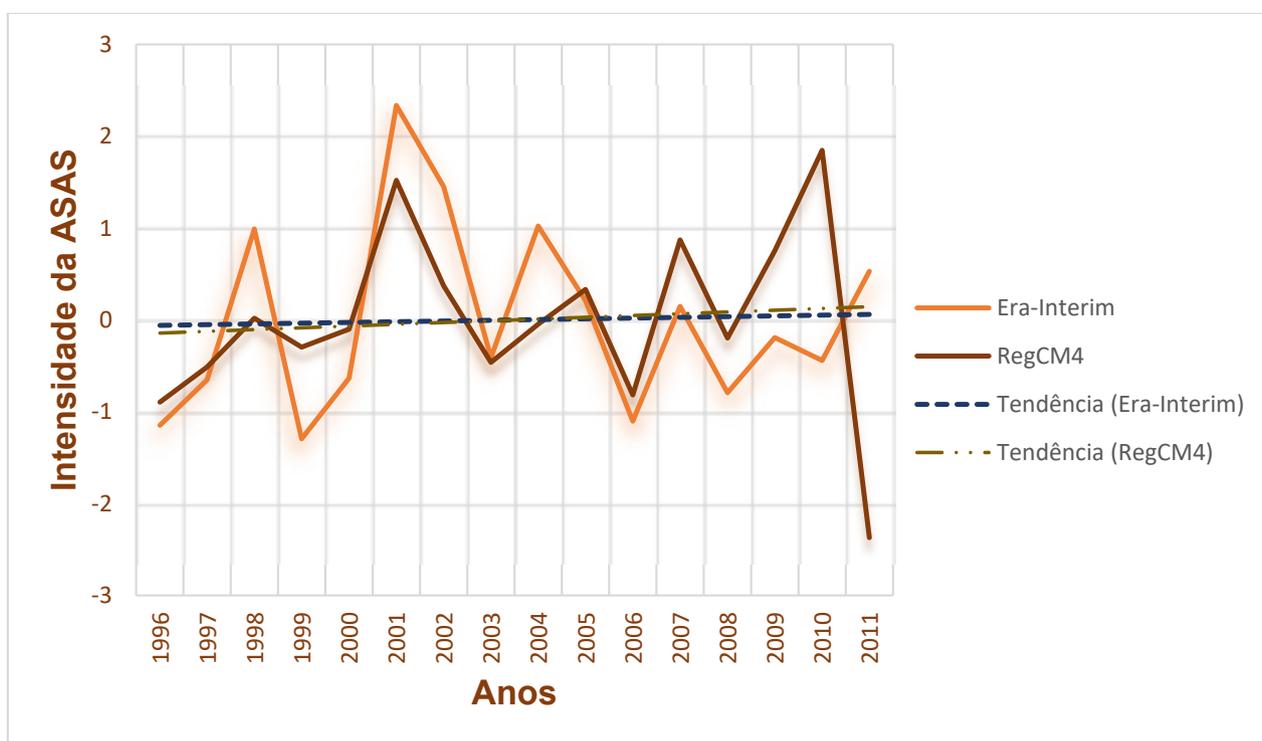


Figura 7 Série temporal normalizada da intensidade da ASAS em JJA com as linhas de tendência para o período de 1996-2011 de acordo com os dados do modelo regional RegCM4 e da reanálise Era-Interim.

Portanto, pode-se verificar que existe uma tendência de intensificação da ASAS ao longo dos anos nos dados da reanálise e a partir da simulação com o modelo climático, embora essa não seja significativa estatisticamente. Da mesma forma, verificou-se anteriormente que existe uma tendência não significativa de intensificação do braço descendente da CHOA, o que novamente demonstra a relação existente entre a CH e a ASAS.

A Tabela 1 exibe as tendências encontradas para os dados da reanálise e da simulação para a posição (P) e intensidade (I) da CHOA e ASAS no período de 1979-2015 e de 1996-2011, a fim de sintetizar a análise e comparação dos dados realizada neste estudo.

3.6 Impactos das mudanças sobre o continente sul-americano

O lançamento excessivo de gases de efeito estufa na atmosfera vem alterando fortemente o clima num curto período de tempo, com graves implicações ao meio ambiente. Esse aumento das emissões dos gases de efeito estufa, observado principalmente nos últimos 150 anos devido às atividades industriais, têm demonstrado que além das causas naturais, o efeito das atividades humanas causará um forte impacto no clima em uma escala de tempo bem menor do que aquela devido às mudanças naturais.

Dentro desse contexto, é muito importante conhecer como o padrão da circulação global pode vir a mudar, como consequência de um aumento acelerado nas concentrações dos gases de efeito estufa. Num cenário de aquecimento global, Hu & Zhou (2007) encontraram que o aumento na concentração dos gases de efeito estufa leva ao aumento da temperatura da superfície do mar (TSM) e a uma maior altura da tropopausa, fazendo com que haja uma expansão da CH. Em decorrência disso, outros sistemas atmosféricos também poderão sofrer alterações em seu comportamento.

De acordo com Ferreira & Mello (2005), o clima de qualquer região é determinado em grande parte pela circulação geral da atmosfera. Em anos que a TSM se encontra com anomalias positivas ou negativas nas bacias do oceano Atlântico e Pacífico, a CH é perturbada, provocando alterações climatológicas (Ferreira & Mello, 2005).

Para o estudo dos impactos das mudanças na CHOA e na ASAS sobre o continente sul-americano foram elaborados compostos da seguinte forma: através da série temporal normalizada da intensidade da ASAS e da CHOA (ômega médio) no período 1979-2015, foram selecionados os anos que apresentaram intensidade superior a um desvio padrão. No caso da ASAS, esses anos são: 1990, 1991, 1994, 2001, 2002, 2012 e 2015. Já no caso da CHOA, esses anos são: 1991, 2001, 2007, 2012, 2013 e 2015. Esses anos formaram os compostos, a partir dos quais são analisadas as anomalias de temperatura e precipitação nos casos de intensificação da CHOA e da ASAS (figuras não apresentadas).

Quando a CH se encontra intensificada, há maior formação de nuvens de chuva associada ao braço ascendente dessa circulação, ocasionando muita precipitação local, conforme pode-se verificar na Figura 8 (A) entre, aproximadamente, 10°N e 10°S.

A temperatura global vem sendo alterada devido à intensificação da atividade humana, provocada pelo lançamento excessivo de gases de efeito estufa na atmosfera. As consequências das alterações no clima causam fortes impactos nos diferentes ecossistemas, na população e na economia regional e nacional (Valverde & Marengo, 2010). De acordo com Hu & Zhou (2010), a intensificação da CH também leva à movimentos descendentes mais fortes nos subtropicais, o que consequentemente resulta em menos precipitação nessas regiões. Isso ocorre devido a formação da ASAS no braço descendente da CHOA, que normalmente atua bloqueando a formação de nuvens nessa região, conforme a Figura 8 (B).

Dados	Era-Interim		RegCM4	
	P	I	P	I
Sistemas				
CHOA 1979-2015	0,55 (sul)	0,2	-	-
CHOA – ômega 1996-2011	-	9,3 x 10⁻⁴	-	3,9 x 10⁻⁴
ASAS 1979-2015	Lat: 0,03 (sul) Lon: 1,03 (leste)	0,3	-	-
ASAS 1996-2011	Lat: 0,6 (sul) Lon: 2,2 (leste)	0,07	Lat: 0,95 (sul) Lon: 4,7 (leste)	0,2

Tabela 1 Tendências encontradas para os dados da reanálise Era-Interim e da simulação do modelo RegCM4 para a posição (P) e intensidade (I) da CHOA e ASAS. Entre parêntesis indica-se em qual direção a tendência de posição aponta. Os valores em negrito são significativos ao nível de 95% de acordo com o teste t de Student.

Alterações na Circulação de Hadley Regional e na Alta Subtropical do Atlântico Sul em um Cenário de Aquecimento Global

Lorena de Moura Joia Gomes & Ana Carolina Vasques Freitas

A Figura 9 (A) ilustra a anomalia da temperatura para casos de intensificação da CHOA. Pode-se notar uma elevação significativa da temperatura na região próxima ao equador. Isso pode ser devido à intensa atividade convectiva na região da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), originada pela acentuada radiação solar nessa região. Com o aumento da radiação, há uma elevada atividade convectiva na baixa e alta troposfera associada com a intensificação da CHOA. Assim, além de proporcionar a formação de chuvas, a temperatura nesse local também se eleva. Verifica-se redução de temperatura no litoral nordestino, sudeste e

sul, isso porque, de acordo com Lobo (1982), no inverno a ZCIT aparece fortemente deslocada para o norte.

Já a Figura 9 (B) mostra uma anomalia positiva de temperatura em grande parte da região sudeste da América do Sul e oeste do Oceano Atlântico em torno de 35°S. O braço subsidente da CHOA, associado a ASAS, pode atuar como um sistema de bloqueio de massas de ar frio, já que, como mencionado por Padilha (2005), a massa de ar tropical marítima originada através da ASAS ao permanecer sobre o continente durante alguns dias, torna-se seca e transforma-se em uma massa de ar tropical continental.

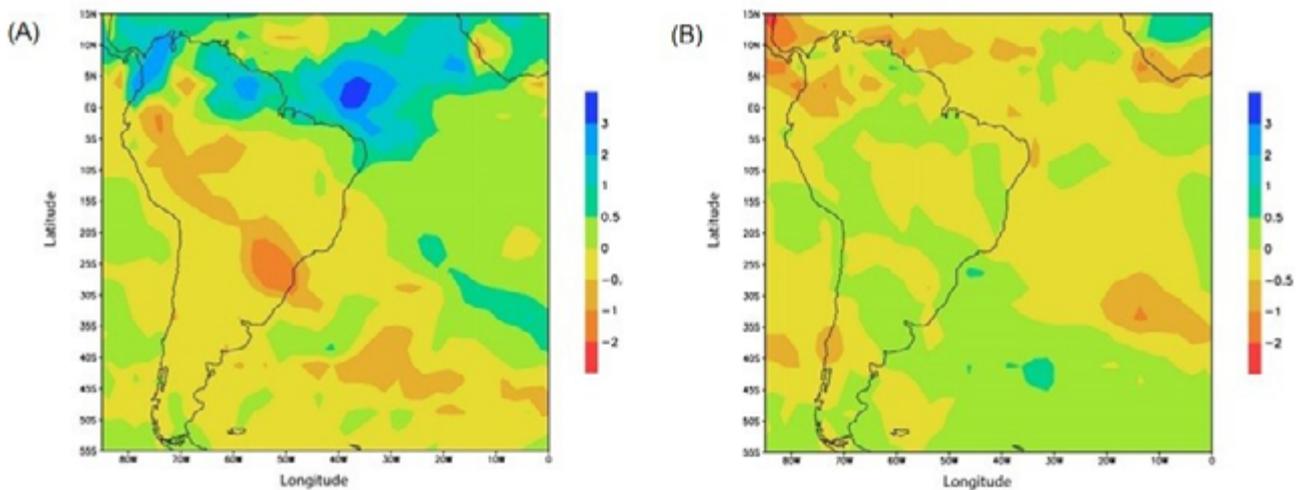


Figura 8 Anomalia de precipitação [mm/dia] em JJA para os casos de (A) intensificação da CHOA e (B) intensificação do braço descendente da CHOA, no período de 1979-2015, de acordo com os dados do GPCC.

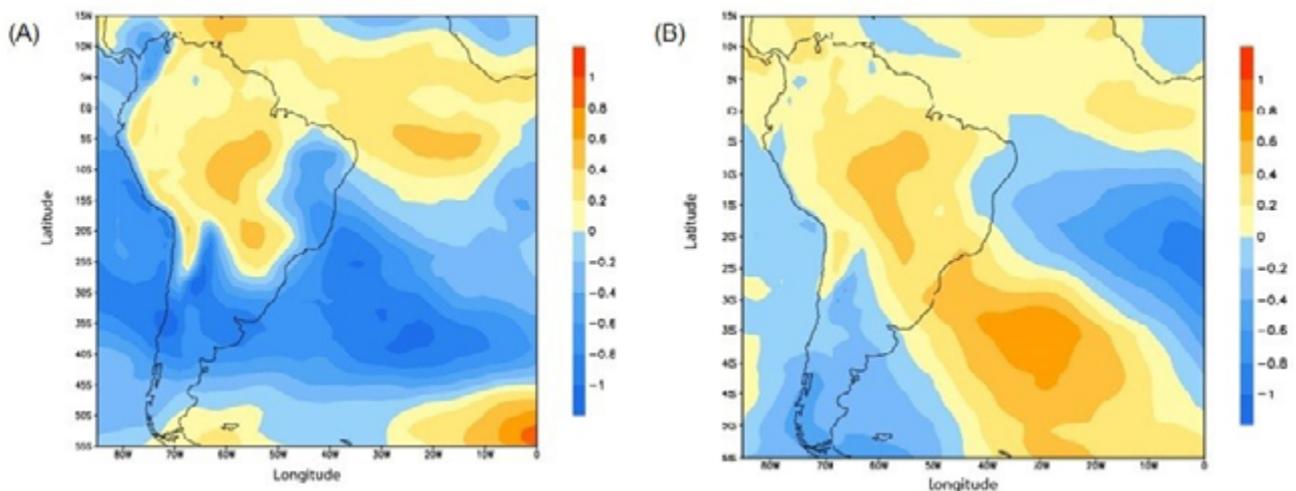


Figura 9 Anomalia de temperatura [K] em JJA para os casos de (A) intensificação da CHOA e (B) intensificação do braço descendente da CHOA, no período de 1979-2015, de acordo com os dados da reanálise Era-Interim.

3.7 Análise do papel da Temperatura da Superfície do Mar (TSM)

As Figuras 10 (A) e (B) apresentam a correlação entre a TSM e a intensidade da CHOA (braços ascendente e descendente e somente descendente, respectivamente). A intensidade da CHOA como um todo está principalmente relacionada à TSM no Pacífico e Atlântico. Casos de intensificação (enfraquecimento) da CHOA podem estar relacionados à eventos de El Niño (La Niña), de acordo com a Figura 10 (A). Contudo, quando se analisa a correlação entre a TSM e somente o braço descendente da CHOA [Figura 10 (B)], pode-se notar que as correlações são mais fracas e não envolvem os episódios de ENOS (El Niño-

Oscilação Sul). Contudo, anomalias positivas (negativas) na região tropical do Pacífico Oeste e na região subtropical do Atlântico Oeste, próximo à costa sudeste da América do Sul, parecem estar conectadas com a intensificação (enfraquecimento) do braço subsidente da CHOA.

As Figuras 10 (C), (D) e (E) apresentam a correlação entre a TSM e intensidade e posição da ASAS. A intensidade da ASAS está mais fortemente e positivamente correlacionada com anomalias de TSM na região subtropical do Atlântico Oeste, próximo à costa sudeste da América do Sul, assim como encontrado para o braço subsidente da CHOA [Figura 10 (C)]. A latitude e longitude da ASAS possuem correlações muito fracas com a TSM [Figuras 10 (D) e (E)]. As correlações mais significativas são encontradas na região do Oceano Atlântico subtropical.

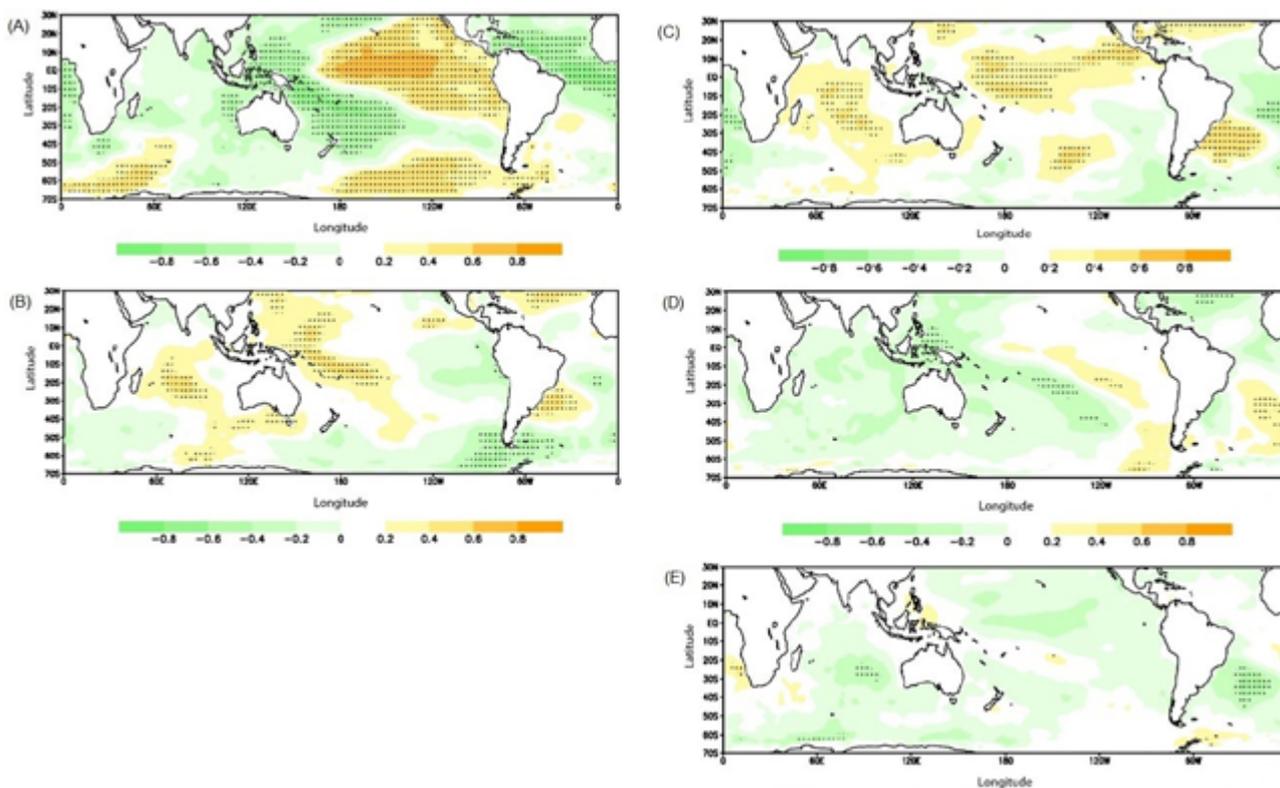


Figura 10 Correlação entre (A) TSM e a intensidade da CHOA, (B) TSM e a intensidade do braço descendente da CHOA, (C) TSM e intensidade da ASAS, (D) TSM e longitude da ASAS e (E) TSM e latitude da ASAS, no período de 1979-2015 em JJA, de acordo com os dados da reanálise Era-Interim e do HADISST. Os valores pontilhados são estatisticamente significativos ao nível de 95%.

4 Conclusão

Estudos mostram que existe uma tendência de alteração na posição e intensidade da CH ao longo dos anos no clima presente. Isso pode estar relacionado com o aumento dos gases de efeito estufa que eleva a tropopausa, devido ao aumento da TSM e da temperatura do ar, fazendo com que a CH seja expandida (Hu & Zhou, 2010).

As análises realizadas neste estudo mostraram mudanças na CHOA e ASAS ao longo do tempo, verificando-se uma tendência significativa de intensificação e deslocamento na direção do polo da fronteira sul da CHOA e uma tendência significativa de intensificação da ASAS.

A análise comparativa entre dados da Reanálise Era-Interim com os dados do modelo regional RegCM4, entre 1996-2011 no período do inverno, possibilitou verificar

que a tendência de variação é semelhante, demonstrando a habilidade do modelo regional em reproduzir as mudanças observadas na circulação.

A análise das anomalias de precipitação sobre a América do Sul durante os anos de 1979 a 2015, para o período de inverno, demonstrou a associação entre a intensificação do braço ascendente da CHOA e o aumento da precipitação. Entretanto, como esperado, a intensificação do braço descendente da CHOA (observado pelo ômega médio), e em consequência a intensificação da ASAS, resulta em ausência de precipitação especialmente na região do Oceano Atlântico. Já através da análise das anomalias de temperatura, verificou-se a presença de anomalias positivas em grande parte da região sudeste da América do Sul e oeste do Oceano Atlântico em torno de 35°S. A ASAS, originada pelo movimento subsidente da CHOA, pode levar a um bloqueio das frentes frias e, portanto, ser responsável por essas anomalias positivas observadas.

A intensidade da CHOA como um todo está principalmente relacionada a TSM no Pacífico e Atlântico. Casos de intensificação (enfraquecimento) da CHOA podem estar relacionados a eventos de El Niño (La Niña). Já a intensidade da ASAS e do braço descendente da CHOA não está associada a episódios de ENOS, mas as anomalias de TSM na região tropical do Pacífico Oeste e na região subtropical do Atlântico Oeste, próximo à costa sudeste da América do Sul.

5 Agradecimentos

Nossos sinceros agradecimentos à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pelo financiamento deste trabalho através da bolsa de iniciação científica do primeiro autor. À profa. Dra. Michelle Simões Reboita pela disponibilização do algoritmo de rastreamento da ASAS. Ao editor e revisor da revista, cujas sugestões contribuíram para a versão final deste artigo.

6 Referências

- Bastos, C.C. & Ferreira, N.J. 2000. Análise Climatológica da Alta Subtropical do Atlântico Sul. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, p. 612-619. Disponível em: http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1915/2005/03.15.19.20/doc/Bastos_Analise_climatologica.pdf. Acesso em: 14/04/2016.
- Chen, S.; Wei, K.; Chen, W. & Song, L. 2014. Regional changes in the annual mean Hadley circulation in recent decades. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 119: 7815-7832. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JD021540/abstract>. Acesso em: 10 set. 2016.
- Dee, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M.A.; Balsamo, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A.C.M.; Van de Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A.J.; Haimberger, L.; Healy, S.B.; Hersbach, H.; Hólm, E.V.; Isaksen, I.; Kallberg, P.; Köhler, M.; Matricardi, M.; McNally, A.P.; Monge-Sanz, B.M.; Morcrette, J.-J.; Park, B.-K.; Peubey, C.; Rosnay, P. de; Tavolato, C.; Thépaut, J.-N. & Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137: 553-597. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.828/pdf>. Acesso em: 12 jul. 2016.
- Degola, T.S.D. 2013. Impactos e variabilidade do anticiclone subtropical do atlântico sul sobre o Brasil no clima presente e em cenários futuros. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 92p. Disponível em: <http://www.iag.usp.br/pos/meteorologia/portugues/dissertacoestestes/impactos-e-variabilidade-do-anticiclone-subtropical-do-atl>. Acesso em: 14 abr. 2016.
- Ferreira, A.G. & Mello, N.G.S. 2005. Principais Sistemas Atmosféricos Atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a Influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no Clima da Região. *Revista Brasileira de Climatologia*, 1: 15-26. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/viewFile/25215/16909>. Acesso em: 23 fev. 2017.
- Freitas, A.C.V. & Ambrizzi, T. 2015. Recent Changes in the Annual Mean Regional Hadley Circulation and Their Impacts on South America. *Advances in Meteorology*, 2015: 1-22.
- Giorgi, F.; Coppola, E.; Solmon, F.; Mariotti, L.; Sylla, M.B.; Bi, X.; Elguindi, N.; Diro, G.T.; Nair, V.; Giuliani, G.; Turuncoglu, U.U.; Cozzini, S.; Güttler, I.; Tawfik, A.B.; Shalaby, A.; Zakey, A.S.; Steiner, A.L.; Stordal, F.; Sloan, L.C. & Brankovic, C. 2012. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52: 7-29. Disponível em: https://www.int-res.com/articles/cr_oa/c052p007.pdf. Acesso em: 23 fev. 2017.
- Grimm, A.M. & Ambrizzi, T. 2009. Teleconnections into South America from the Tropics and Extratropics on Interannual and Intraseasonal Timescales. In: FRANÇOISE VIMEUX; FLORENCE SYLVESTRE; MYRIAM KHODRI. (Org.). Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions. *Netherlands: Springer Netherlands*, 14: 159-191.
- Hu, Y. & Zhou, C. 2010. Decadal changes in the Hadley Circulation. *Advances in Geosciences*, 16: 61-74.
- Hu, Y. & Fu, Q. 2007. Observed poleward expansion of the Hadley Circulation since 1979. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7: 5229-5236.
- Liebmann, B. & Smith, C.A. 1996. Description of a complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77: 1275-1277.
- Lobo, P.R. 1982. *Um estudo climatológico da zona de convergência intertropical e sua influencia sobre o nordeste do Brasil*.

- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Dissertação de Mestrado, 93p. Disponível em: <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2005/06.28.17.24/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2017.
- Lu, J.; Vecchi, G.A. & Reichler, T. 2007. Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophysical Research Letters*, 34: 1-5.
- Lu, J.; Chen, G & Frierson, D.M. 2008. Response of the Zonal Mean Atmospheric Circulation to El Niño versus Global Warming. *Journal of Climate*, 21(22): 5835–5851.
- Lu, J.; Deser, C. & Reichler, T. 2009. Cause of the widening of the tropical belt since 1958. *Geophysical Research Letters*, 36: 1-5.
- Padilha, C.K. 2005. Estagnação de massa de ar quente e seco sobre a região central do Brasil. Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Dissertação de Mestrado, 139p. Disponível em: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-13@80/2005/08.18.14.09/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2016.
- Rayner, N.A.; Parker, D.E.; Horton, E.B.; Folland, C.K.; Alexander, L.V.; Rowell, D.P.; Kent, E.C. & Kaplan, A. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*, 108(14): 1–37.
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; Rocha, R.P. & Ambrizzi, T. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(2): 185-204. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v25n2/a04v25n2.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2016.
- Rodwell, M.J. & Hoskins, B.J. 2001. Subtropical anticyclones and summer monsoons. *Journal of Climate*, 14: 3192–3211.
- Reynolds, R.W.; Rayner, N.A.; Smith, T.M.; Stokes, D.C. & Wang, W. 2002. An improved *in situ* and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15: 1609-1625.
- Seager, R.; Murtugudde, R.; Naik, N.; Clement, A.; Gordon, N. & Miller, J. 2003. Air–Sea Interaction and the Seasonal Cycle of the Subtropical Anticyclones. *Journal of Climate*, 16: 1948 – 1966.
- Seidel, D.J.; Fu, Q.; Randel, W.J. & Reichler, T.J. 2008. Widening of the tropical belt in a changing climate. *Nature Geosciences*, 1: 21-24.
- Schneider, U.; Becker, A.; Finger, P.; Meyer-Christoffer, A.; Ziese, M. & Rudolf, B. 2014. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled *in situ* data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1-2): 15-40.
- Valverde, M.C. & Marengo, J.A. 2010. Mudanças na Circulação Atmosférica Sobre a América do Sul para Cenários Futuros de Clima Projetados pelos Modelos Globais do IPCC AR4. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(1):125-145.
- Vianello, R.L. & Maia, L.F.P.G. 1986. Estudo Preliminar da Climatologia Dinâmica do Estado de Minas Gerais. In: I CONGRESSO INTERAMERICANO DE METEOROLOGIA. Anais I, p. 185-194.