

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

**RELAÇÕES ENTRE O ÍNDICE DE OSCILAÇÃO ANTÁRTICA E  
AS VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI,  
REGIÃO SUL DO BRASIL**

**Fábio Guimarães Oliva**

RIO DE JANEIRO

2011

# **RELAÇÕES ENTRE O ÍNDICE DE OSCILAÇÃO ANTÁRTICA E AS VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI, REGIÃO SUL DO BRASIL**

**Fábio Guimarães Oliva**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientadora: Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva

Rio de Janeiro

Agosto/2011

# **RELAÇÕES ENTRE O ÍNDICE DE OSCILAÇÃO ANTÁRTICA E AS VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI, REGIÃO SUL DO BRASIL**

**Fábio Guimarães Oliva**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM METEOROLOGIA.

Examinada por:

---

Prof<sup>ª</sup>. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva, D.Sc.

---

Prof. Isimar de Azevedo Santos, D.Sc.

---

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

---

Prof. Edilson Marton, D.Sc.

---

Prof<sup>ª</sup>. Claudine Pereira Dereczynski, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - BRASIL

Agosto de 2011

Oliva, Fábio Guimarães.

Relações entre o Índice de Oscilação Antártica e as vazões na bacia hidrográfica do rio Uruguai, região Sul do Brasil/ Fábio Guimarães Oliva. - Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN, 2011.

xv, 68 f. : il.; 29,7 cm.

Orientador: Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN  
Programa de Pós-graduação Meteorologia, 2011.

Referências Bibliográficas: f. 61-68.

1. Oscilação Antártica. 2. Região Sul do Brasil. 3. Variabilidade climática. 4. Vazões 5. Precipitação I. Justi da Silva, Maria Gertrudes Alvarez. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPGM/IGEO/CCMN, Programa de Pós-graduação em Meteorologia. III. Título

*“O sofrimento é passageiro, desistir é para sempre.”*

(Lance Armstrong)

*“Try not to become a man of success, but rather a man of value.”*

(Albert Einstein)

*Dedico esta dissertação aos meus pais, **Henrique e Marilse**, pois suas presenças foram vitais para a conclusão desta importante etapa da minha vida.*

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## **RELAÇÕES ENTRE O ÍNDICE DE OSCILAÇÃO ANTÁRTICA E AS VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI, REGIÃO SUL DO BRASIL**

**Fábio Guimarães Oliva**

**Agosto/2011**

Orientadora: Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva  
Programa de Pós-graduação em Meteorologia

A região Sul do Brasil apresenta um dos maiores potenciais econômicos do país, principalmente através de atividades como a agricultura e a geração de energia hidroelétrica. Fenômenos e eventos meteorológicos de diversas escalas influenciam o clima da região provocando chuvas intensas ou períodos de estiagem que podem afetar a atividade agrícola e o setor elétrico. A Antártica desempenha um importante papel sobre o sistema climático global e influencia a circulação atmosférica do Hemisfério Sul. O objetivo principal deste trabalho foi o de analisar as relações entre a Oscilação Antártica (AAO), um padrão de teleconexão de variabilidade climática, e o regime de vazões e de precipitação na região hidrográfica do rio Uruguai. Por ser outro padrão de variabilidade climática, foi investigado também o papel dos eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS) na influência sobre as vazões e a precipitação. Finalmente, verificou-se a influência combinada da AAO e do ENOS sobre estas variáveis. Para realizar estas análises, foram utilizados dados de: Índice de Oscilação Antártica obtidos do Climate Prediction Center/National Centers for Environmental Prediction (CPC/NCEP); vazões naturais do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS); movimento vertical das reanálises do National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR); precipitação tanto das reanálises 2 do NCEP como do CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP) e Índice de Oscilação Sul obtidos do CPC/NCEP. Todos os dados são mensais e foram obtidos para um período de 30 anos (1979-2008). A metodologia empregada consiste na aplicação do teste estatístico de *Aspin Welch* cuja estatística de teste é comparada com a distribuição *t-student* que verifica a significância estatística entre duas médias de amostras utilizando um grau de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Os resultados indicaram uma tendência de a região de estudo apresentar valores médios de vazões e de precipitação mais elevados (reduzidos) durante a fase negativa (positiva) da AAO, apresentando, em algumas áreas, resultados estatisticamente significativos entre as médias de precipitação observadas em cada fase distinta da AAO. Ademais, o fim da primavera, principalmente o mês de novembro, parece ser a época do ano em que a AAO mostra-se mais ativa. Na análise da relação entre o ENOS e as vazões e precipitação, verificou-se que a região de estudo tende a apresentar médias de vazões e precipitação mais elevadas (reduzidas) quando da influência de episódios El Niño (La Niña), revelando resultados estatisticamente significativos, não apenas entre as médias de precipitação verificadas em cada episódio do ENOS, mas também entre as médias de vazões observadas em alguns postos estudados. A influência combinada da AAO e do ENOS revelou-se de grande importância, pois pode acarretar, dependendo da combinação, em volumes extremos tanto elevados como reduzidos de vazões, o que pode impactar significativamente a geração de energia hidroelétrica e a atividade agrícola na região.



Abstract of Dissertation presented to PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## **RELATIONSHIPS BETWEEN THE ANTARCTIC OSCILLATION INDEX AND THE DISCHARGES IN THE URUGUAI RIVER HYDROGRAPHIC BASIN, SOUTH REGION OF BRAZIL**

**Fábio Guimarães Oliva**

**August/2011**

Advisor: Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva  
Department: Meteorology

The south region of Brazil has one of the greatest economic potentials of the country, through many important economic activities, mainly agriculture and hydroelectric power generation. The climate of the region is influenced by meteorological events of various scales that can cause intense precipitation or periods of drought that can affect agriculture and energy sector. The Antarctic continent plays an important role over the global climate system and influences the southern hemisphere atmospheric circulation. The aim of this work was to analyze the relationships between the Antarctic Oscillation (AAO), a teleconnection pattern of climate variability, and the discharges and precipitation regimes in the Uruguai river hydrographic region. This work, also, investigated the influence of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events over the discharges and precipitation. Finally, the combined influence of AAO and ENSO over these variables was also analyzed. This work used various data sources, such as: Antarctic Oscillation Index obtained from Climate Prediction Center/National Centers for Environmental Prediction (CPC/NCEP); natural discharges from Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS); vertical velocity from National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis; precipitation rates from NCEP reanalysis 2 and from CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP) and Southern Oscillation Index obtained from CPC/NCEP. The methodology consists in application of Aspin Welch statistical test where the statistic of the test is compared with t-student distribution that verifies the statistical significance among two sample means using a significance level of 5%. The studied region showed a tendency to present higher (lower) discharges and precipitation rates during the AAO negative (positive) phase, showing, in some areas, statistically significant results between precipitation rates observed in each opposite AAO phases. Also, late spring, in special November, seems to be the period of the year where AAO is more active. Analysis showing the relationship between ENSO and discharges and precipitation exhibits a tendency to present higher (lower) discharges and precipitation rates during the influence of El Niño (La Niña) episodes, showing statistically significant results, not only between precipitation rates verified in each ENSO episodes, but also between the discharges rates in some studied areas. The combined influence between AAO and ENSO has great importance because, depending on the combination, can cause extreme precipitation rates, reduced or increased, affecting significantly the hydroelectric power generation and the agriculture in the region.

## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

	<b>Pág.</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
1.1. Apresentação.....	01
1.2. Caracterização da área de estudo.....	04
<b>CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>09</b>
2.1. Meteorologia e climatologia da região antártica.....	09
2.2. O papel da Antártica no clima global.....	13
2.3. Variabilidade do clima na Antártica.....	14
2.4. Oscilação Antártica ou Modo Anular do Sul.....	15
<b>CAPÍTULO 3: DADOS E METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
3.1. Dados.....	28
3.2. Métodos.....	30
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>32</b>
4.1. Fases da AAO e relações com as vazões.....	32
4.2. Influência da AAO nas variações mensais das vazões.....	34
4.3. Relações entre AAO, movimento vertical e precipitação.....	36
4.4. Influência dos eventos ENOS sobre a precipitação.....	45
4.5. Fases do ENOS e relações com as vazões.....	49
4.6. Influência combinada entre AAO e ENOS.....	51
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES.....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>61</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.1</b> - Mapa da bacia hidrográfica do rio Uruguai.....	04
<b>Figura 2.1</b> - Mapa fisiográfico do continente antártico.....	09
<b>Figura 2.2</b> - Média da extensão do gelo marinho entre 1979 e 2007.....	10
<b>Figura 2.3</b> - (a) Modelo conceitual da circulação troposférica sobre a Antártica. (b) Divergência em superfície resultante em ventos catabáticos.....	11
<b>Figura 2.4</b> - Representação esquemática da circulação atmosférica na região antártica.....	12
<b>Figura 2.5</b> - Seção transversal latitude x altura mostrando típicas amplitudes de anomalias de vento geostrófico médio zonal e altura geopotencial na baixa troposfera.....	17
<b>Figura 2.6</b> - Série temporal do Índice de Oscilação Antártica.....	20
<b>Figura 2.7</b> - Esquema representativo das propriedades dos ciclones extratropicais durante ambas as fases da AAO.....	23
<b>Figura 3.1</b> - Área de estudo com a localização dos postos.....	29
<b>Figura 3.2</b> - Representação esquemática das regiões de rejeição do teste.....	31
<b>Figura 4.1</b> - Vazões médias mensais observadas durante as fases opostas da AAO para os 10 postos.....	32
<b>Figura 4.2</b> - Campos médios de movimento vertical em 500 hPa para as fases positiva e negativa da AAO.....	38
<b>Figura 4.3</b> - Diferença entre os campos médios de movimento vertical observados nas fases positiva e negativa da AAO.....	39
<b>Figura 4.4</b> - Campos médios de precipitação para as fases positiva e negativa da AAO.....	40
<b>Figura 4.5(a)</b> - Diferença entre os campos médios de precipitação observados nas fases positiva e negativa da AAO.....	41
<b>Figura 4.5(b)</b> - Diferença entre os campos médios de precipitação observados nas fases positiva e negativa da AAO (destaque na área de estudo.....	42
<b>Figura 4.6</b> - Área de estudo exibindo os pontos de grade.....	43
<b>Figura 4.7</b> - Área de estudo mostrando os pontos de grade que apresentaram diferenças estatisticamente significativas na relação AAO x precipitação.....	44

<b>Figura 4.8</b> - Precipitação média mensal observada durante as fases da AAO nos pontos que apresentaram diferenças estatisticamente significativas.....	45
<b>Figura 4.9</b> - Área de estudo mostrando os pontos de grade que apresentaram diferenças estatisticamente significativas na relação ENOS x precipitação.....	47
<b>Figura 4.10</b> - Precipitação média mensal observada durante os episódios ENOS nos pontos que apresentaram diferenças estatisticamente significativas.....	48
<b>Figura 4.11</b> - Vazões médias mensais observadas durante os episódios El Niño e La Niña para os 10 postos.....	50
<b>Figura 4.12</b> - Percentagem dos casos em que ocorreu El Niño, La Niña ou episódios neutros observados durante as fases negativa e positiva da AAO.....	52

## LISTA DE TABELAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabela 1</b> - Total anual acumulado de precipitação e médias de precipitação dos meses mais chuvosos e menos chuvosos para 4 estações do INMET representativas da área de estudo.....	07
<b>Tabela 2</b> - Total anual acumulado de precipitação para as 3 estações do INMET mais chuvosas e menos chuvosas localizadas na região Sul do Brasil.....	07
<b>Tabela 3</b> - Vazão média, desvio-padrão ( $\sigma$ ) e estatística de teste ( $Z$ ) para os dez postos de medição estudados neste trabalho.....	33
<b>Tabela 4</b> - Valores médios de vazões ( $m^3/s$ ) nas fases negativa (azul) e positiva (vermelho) da AAO, considerando a série de 30 anos entre 1979-2008.....	34
<b>Tabela 5</b> - Precipitação média, desvio-padrão ( $\sigma$ ) e estatística de teste ( $Z$ ) para os oito pontos que apresentaram diferenças estatisticamente significativas na relação AAO x precipitação.....	45
<b>Tabela 6</b> - Precipitação média, desvio-padrão ( $\sigma$ ) e estatística de teste ( $Z$ ) para os doze pontos que apresentaram diferenças estatisticamente significativas na relação ENOS x precipitação.....	49
<b>Tabela 7</b> - Vazão média, desvio-padrão ( $\sigma$ ) e estatística de teste ( $Z$ ) para os dez postos de medição estudados neste trabalho.....	51
<b>Tabela 8</b> - Valores médios de vazões ( $m^3/s$ ) observados nos dez postos de medição para as possíveis influências combinadas estudadas.....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAO - Oscilação Antártica (*Antarctic Oscillation*)  
AO - Oscilação Ártica (*Arctic Oscillation*)  
ANA - Agência Nacional de Águas  
AS - América do Sul  
CCM - Complexos Convectivos de Mesoescala  
CE - Ciclones Extratropicais  
CPC - *Climate Prediction Center*  
CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos  
CMAP - *CPC Merged Analysis of Precipitation*  
ENOS - El Niño – Oscilação Sul  
EN - El Niño  
EOF - Função Ortogonal Empírica (*Empirical Orthogonal Function*)  
HLM - Modo de Altas Latitudes (*High-Latitude Mode*)  
HN - Hemisfério Norte  
HS - Hemisfério Sul  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
LN - La Niña  
NAO - Oscilação do Atlântico Norte (*North Atlantic Oscillation*)  
NCAR - *National Center for Atmospheric Research*  
NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*  
NPO - Oscilação do Pacífico Norte (*North Pacific Oscillation*)  
OMJ - Oscilação de Madden-Julian  
OA - Oceano Austral  
ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico  
PA - Península Antártica  
PNRH - Plano Nacional de Recursos Hídricos  
PSA - Pacífico - América do Sul (*Pacific South America*)  
PR - Paraná  
PT - Pacífico Tropical  
RS - Rio Grande do Sul  
SAM - Modo Anular do Sul (*Southern Annular Mode*)

SC - Santa Catarina

SCAR - *Scientific Committee on Antarctic Research*

SO - Oscilação Sul (*Southern Oscillation*)

SOI - Índice de Oscilação Sul (*Southern Oscillation Index*)

SP - São Paulo

SRH/MMA - Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente

TSM - Temperatura da Superfície do Mar

UHEs - Usinas Hidroelétricas

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

# **CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO**

## **1.1. Apresentação**

Esta dissertação de mestrado analisa as relações entre o Índice de Oscilação Antártica e as vazões de rios situados na região hidrográfica do rio Uruguai. Este estudo também investiga as relações deste índice com a precipitação na região e a influência do fenômeno El Niño - Oscilação Sul sobre o regime de vazões e precipitação nesta mesma área de estudo.

A região Sul do Brasil é uma das mais industrializadas e desenvolvidas do país possuindo elevado potencial econômico, principalmente através dos setores de energia e agrícola. A bacia hidrográfica do rio Uruguai, localizada nesta região, detém um dos maiores potenciais hidroelétricos do Brasil abarcando uma capacidade total de produção de 40,5 KW/km<sup>2</sup>, considerando-se o setor brasileiro e o argentino numa das maiores relações energia/km<sup>2</sup> do mundo (SRH/MMA, 2006).

O regime de monção de verão na América do Sul (AS) é responsável pela estação chuvosa na maior parte do Brasil e sua variabilidade interanual causa impactos significativos em atividades econômicas importantes, como a geração de energia hidroelétrica e a agricultura (Grimm, 2003). O regime de precipitação da região Sul do Brasil é afetado principalmente por sistemas frontais e pelos complexos convectivos de mesoescala (CCM). A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) também pode atuar contribuindo para a ocorrência de períodos de estiagem na região Sul ou forte precipitação no norte da região durante o verão. Os eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS) desempenham importante função na variabilidade do clima sendo responsáveis por grandes oscilações interanuais de temperatura e de precipitação na região. Eventos de precipitação intensa podem ocasionar enchentes, inundações e deslizamentos de encostas na região, entretanto períodos de longa estiagem são comuns e podem impactar de forma significativa a agricultura e o setor elétrico.

Os padrões de teleconexões são muito importantes, auxiliando no entendimento das flutuações climáticas ao redor do globo. Através da análise de sua influência na variabilidade e na estrutura da circulação atmosférica, estes padrões podem ser úteis para uma melhor compreensão de eventos anômalos em regiões remotas, desencadeadas



por forçantes locais. A região antártica exerce um forte controle sobre o sistema climático global desempenhando também importante papel na variabilidade climática do Hemisfério Sul (HS) em função de sua vasta cobertura de gelo e neve, elevado albedo, balanço radiativo com grandes contrastes sazonais e também devido às complexas interações entre a criosfera, a atmosfera e os oceanos. A Oscilação Antártica (AAO), também chamada de Modo Anular do Sul (SAM) ou Modo de Altas Latitudes (HLM), uma das teleconexões mais importantes do HS, foi documentada primeiramente por Walker (1928). Caracteriza-se por um padrão tipo oscilação no cinturão de pressão que cruza o Chile e a Argentina em oposição ao Mar de Weddell e ao Mar de Bellingshausen, mares que circundam o continente antártico. Nas duas últimas décadas do século XX, a AAO foi reconhecida como um dos modos de variabilidade nas médias e altas latitudes do HS (Gong & Wang, 1998). Para muitos autores, a AAO representa o modo dominante da circulação atmosférica extratropical no HS e influencia diversos componentes do sistema climático neste hemisfério (Kidson, 1988; Limpasuvan & Hartmann, 2000; Thompson & Wallace, 2000).

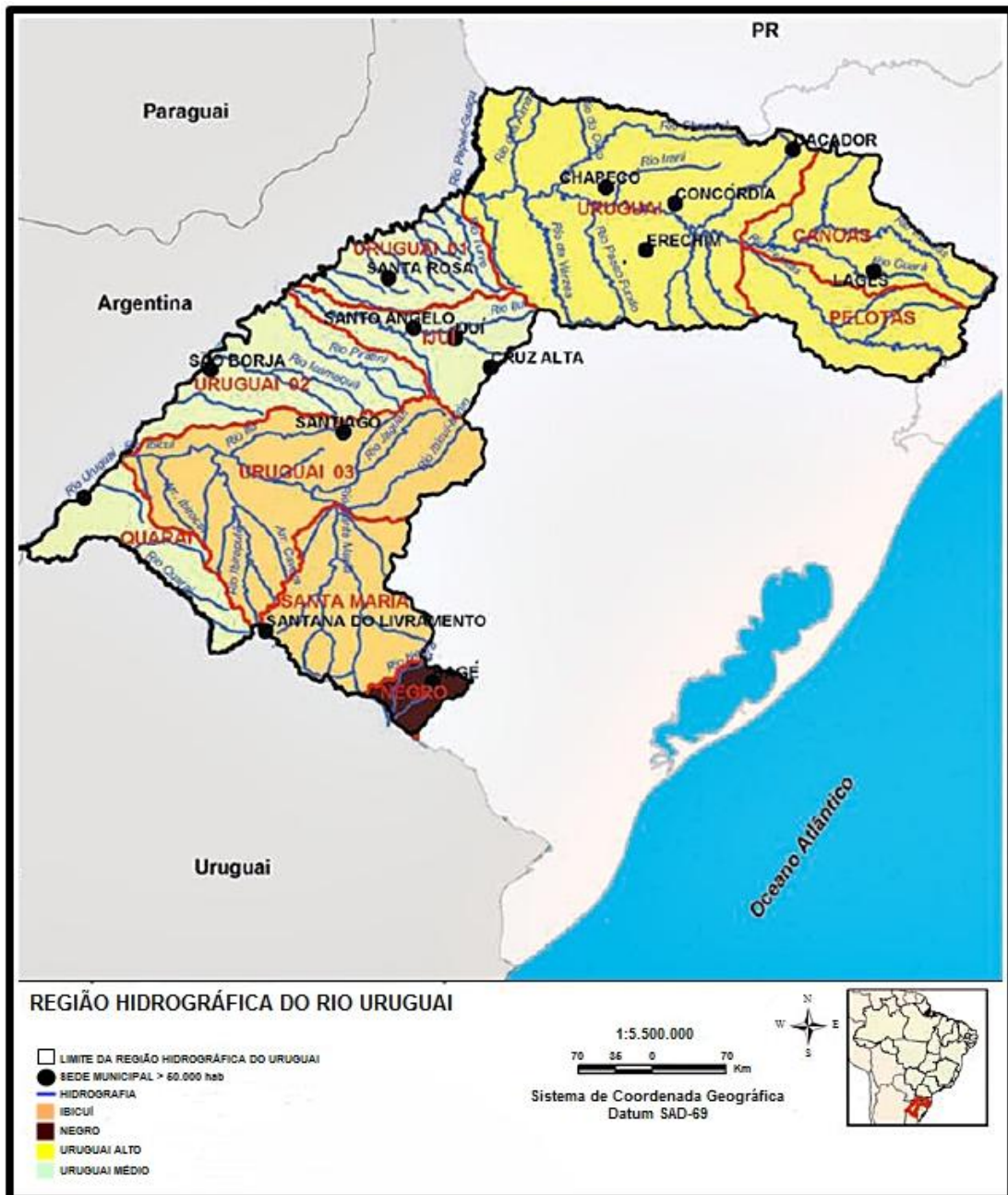
Principalmente nas últimas duas décadas, muitos estudos foram realizados buscando relacionar a AAO com indicadores climáticos e/ou parâmetros meteorológicos no HS, tais como variações na extensão do gelo marinho na Antártica (Renwick, 2001; Hall & Visbeck, 2002; Lefebvre *et al.*, 2004; Sen Gupta & England, 2006), oscilações de temperatura na Antártica (Kwok & Comiso, 2002; Thompson & Solomon, 2002; Schneider *et al.*, 2004), precipitação e temperatura nas latitudes médias do HS (Jones & Widmann, 2003; Silvestri & Vera 2003; Gillett *et al.*, 2006; Hendon *et al.*, 2007; Feng *et al.*, 2010), atividades intrasazonais e interanuais nos trópicos e fases do ENOS (Carvalho *et al.*, 2005; Gong *et al.*, 2010) e variações na velocidade do vento na Antártica (Turner *et al.*, 2005). Entretanto, poucos trabalhos foram realizados associando a AAO com precipitação e temperatura no Brasil como os estudos de Vasconcellos & Cavalcanti (2010a), que relacionaram precipitação na região Sudeste do Brasil com a AAO durante o verão austral, de Reboita *et al.* (2009), que verificaram as relações entre a AAO e os sistemas atmosféricos no HS e de Silvestri & Vera (2003) que associaram o sinal da AAO com anomalias de precipitação sobre o Sudeste da América do Sul, incluindo parte do Brasil.

O objetivo principal desta dissertação de mestrado é realizar uma investigação e avaliar as relações entre a AAO e as vazões de determinados rios situados na bacia hidrográfica do rio Uruguai. Esta relação é importante para a previsão de elevados ou reduzidos volumes de vazões, que constituem informações fundamentais para o setor elétrico brasileiro em função da geração de energia hidroelétrica. Como objetivo secundário, este trabalho busca verificar as relações da AAO com a precipitação sobre a região da bacia do rio Uruguai e regiões adjacentes, assim como observar e analisar a influência do ENOS nas vazões e na precipitação sobre esta mesma área de estudo.

Este trabalho está organizado em cinco capítulos: o **primeiro capítulo** apresenta o tema, a justificativa, os objetivos e a área de estudo. O **segundo capítulo** caracteriza a meteorologia e a climatologia da região antártica e seu papel no clima global, e faz uma revisão bibliográfica sobre a Oscilação Antártica e sua relação com o tempo e o clima em diversas regiões do globo. O **terceiro capítulo** se dedica a apresentação dos dados utilizados e a descrição dos métodos de análise empregados. O **quarto capítulo** descreve os resultados e sua discussão, discutindo as relações entre a Oscilação Antártica e o regime de vazões e de precipitação na região de estudo, bem como as relações entre o ENOS e estas variáveis. Por fim, o **quinto capítulo** aborda as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 1.2. Caracterização da área de estudo

A área de estudo desta dissertação abrange a bacia hidrográfica do rio Uruguai e alguns de seus principais rios. Esta bacia destaca-se pelas atividades agroindustriais e pelo potencial hidroelétrico, tendo grande importância econômica para o país. O rio Uruguai, considerado o segundo mais importante sistema fluvial da bacia do rio da Prata, possui 2.200 km de extensão e origina-se da confluência dos rios Pelotas e Canoas (**Figura 1.1**).



**Figura 1.1** – Mapa da bacia hidrográfica do rio Uruguai, incluindo sua hidrografia e suas sub-bacias de nível 1. Fonte: Bases do PNRH (2005).

Neste trecho, o rio escoar no sentido oeste, dividindo os estados do Rio Grande do Sul (RS) e de Santa Catarina (SC). Após a sua confluência com o rio Peperi-Guaçu, toma o sentido sudoeste materializando a fronteira entre o Brasil e a Argentina. Ao receber a afluência do rio Quaraí, que limita o Brasil e o Uruguai no extremo sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, deixa de banhar o território brasileiro e se dirige para o sul fazendo a fronteira entre a Argentina e o Uruguai, até sua foz no estuário do rio da Prata (SRH/MMA, 2006).

Seu curso é dividido em três partes: alto rio Uruguai, que se caracteriza por um acentuado gradiente topográfico, apresentando corredeiras e baixo tempo de concentração o que propicia alto potencial de geração hidroelétrica; médio rio Uruguai, assumindo a condição de fronteiro com economia local baseada em suinocultura e agricultura de soja e milho; e médio/baixo rio Uruguai, que se desenvolve na região da campanha gaúcha, com aproveitamento de suas águas para irrigação da rizicultura. Os principais afluentes do rio Uruguai, no estado do Rio Grande do Sul, são os rios Pelotas, Várzea, Ijuí, Piratinim, Ibicuí e Quaraí (SRH/MMA, 2006).

A área total drenada pelo rio Uruguai, que se configura na bacia hidrográfica de mesmo nome conforme Resolução n.º 30/2003 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), é de 385.000 km<sup>2</sup>, dos quais 174.412 km<sup>2</sup> no Brasil (27% no estado de Santa Catarina e 73% no estado do Rio Grande do Sul), o que equivale a 2% do território nacional (SRH/MMA, 2006). Esta bacia é delimitada ao norte e nordeste pela Serra Geral, ao sul pela fronteira com o Uruguai, a leste pela Depressão Central Rio-Grandense e a oeste pela Argentina.

Conforme preconiza a Resolução CNRH n.º 30/2003, para a preparação da base física territorial para o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), a bacia hidrográfica foi dividida em quatro sub-bacias de nível 1 que, por sua vez, foram subdivididas em dez unidades. Estas sub-bacias de nível 1 são: sub-bacia do rio Uruguai (trecho alto); sub-bacia do rio Uruguai (trecho médio); sub-bacia do rio Ibicuí e sub-bacia do rio Negro. Cerca de 3,8 milhões de pessoas vivem na parte brasileira da bacia hidrográfica do rio Uruguai.

Uma das características hidrológicas mais importantes da bacia é a baixa capacidade de armazenamento devido à geomorfologia predominante que apresenta relevo acidentado no trecho alto da bacia, seguido de um trecho mais plano na região da campanha gaúcha, com solo pouco profundo, o que faz com que o rio Uruguai escoe em leito rochoso. Esta característica implica um regime de vazões que acompanha o regime de chuvas: quando da ocorrência de períodos de precipitações intensas, ocorrem inundações nas áreas ribeirinhas; da mesma forma, quando ocorrem períodos de estiagens, as vazões são bruscamente reduzidas, até mesmo comprometendo a garantia de atendimento das demandas. Como o regime de chuvas na bacia é bastante variado, as vazões seguem este regime, o que dificulta o planejamento da utilização da água (SRH/MMA, 2006).

Enchentes são comuns na região e podem ocorrer em qualquer trecho do curso do rio Uruguai. Na região da cabeceira do rio Uruguai, há municípios que apresentam, periodicamente, problemas de racionamento de água relacionados à falta de regularização de vazões. A vazão média anual da região hidrográfica do Uruguai é de 4.117 m<sup>3</sup>/s, que corresponde a 2,6% da disponibilidade hídrica do país (ANA, 2011). Esta informação já aponta um relativo equilíbrio quanto ao balanço hídrico, pois a região hidrográfica ocupa 2% do território nacional, possui 2,3% de sua população e ainda tem 2,6% da disponibilidade hídrica.

Por se situar na extremidade meridional do Brasil, as sub-bacias apresentam grandes amplitudes térmicas anuais, atingindo temperatura no entorno ou abaixo de 0°C durante o inverno, e dias quentes, com temperaturas superiores a 30°C, e úmidos durante o verão. A região mais fria está situada nas altitudes mais elevadas dos campos do alto da serra, enquanto a região mais quente situa-se no extremo oeste do estado do Rio Grande do Sul (Nimer, 1979).

A distribuição da precipitação sobre a região Sul do Brasil ao longo do ano ocorre de maneira bastante uniforme. Em toda a região Sul, o total anual de precipitação varia de 1.200 mm a cerca de 2.200 mm, de forma que não há nenhuma localidade onde o total anual acumulado seja extremo, máximo ou mínimo. Os sistemas de circulação que ocasionam precipitação atuam com uma frequência anual similar em todo o território regional e o relevo não interfere criando diferenciações muito significativas no total anual acumulado (Nimer, 1979). As localidades de Xanxerê, situada no oeste

catarinense, e Paranaguá, no litoral paranaense, são as que registram os totais anuais mais elevados: 2.227,4 mm e 2.003,5, respectivamente. No estado do RS, a localidade que registra o volume anual mais elevado é Caxias do Sul com 1.823,0 mm. Por outro lado, as três localidades que apresentam menor volume de precipitação anual são: Araranguá (1.158,8 mm), no litoral sul de SC, Santa Vitória do Palmar (1.228,9 mm) e Rio Grande (1.233,6 mm), ambas situadas no sul gaúcho. Com relação especificamente à região de estudo, observa-se, em média, um total anual de precipitação em torno de 1.750 mm, considerando as estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que se localizam próximas aos pontos onde se obteve dados de vazões, a saber: Campos Novos (SC) com 1.826,5 mm; Passo Fundo (RS) com 1.803,1 mm; Chapecó (SC) com 1.653,9 mm e São Luiz Gonzaga (RS) com 1.770,9 mm (**Tabelas 1 e 2**). O setor norte da bacia hidrográfica do rio Uruguai é o que apresenta as médias de precipitação mais elevadas, com destaque para a localidade de Xanxerê, citada anteriormente.

**Tabela 1** - Total anual acumulado de precipitação e médias de precipitação dos meses mais chuvosos e menos chuvosos para 4 estações do INMET representativas da área de estudo.

Estação INMET	Mês mais chuvoso	Mês menos chuvoso	Total anual (mm)
Campos Novos (SC)	Fev (196,8 mm)	Abr (106,9 mm)	1826,5
Passo Fundo (RS)	Set (197,7 mm)	Abr (99,7 mm)	1803,1
Chapecó (SC)	Fev (173,4 mm)	Mar (103,4 mm)	1653,9
São Luiz Gonzaga (RS)	Jun (180,2 mm)	Mai (118,3 mm)	1770,9

**Tabela 2** - Total anual acumulado de precipitação para as 3 estações do INMET mais chuvosas e para as 3 estações menos chuvosas localizadas na região Sul do Brasil.

Estação INMET (mais chuvosas)	Total anual (mm)	Estação INMET (menos chuvosas)	Total anual (mm)
Xanxerê (SC)	2227,4	Araranguá (SC)	1158,8
Paranaguá (PR)	2003,5	Santa Vitória do Palmar (RS)	1228,9
Caxias do Sul (RS)	1823,0	Rio Grande (RS)	1233,6

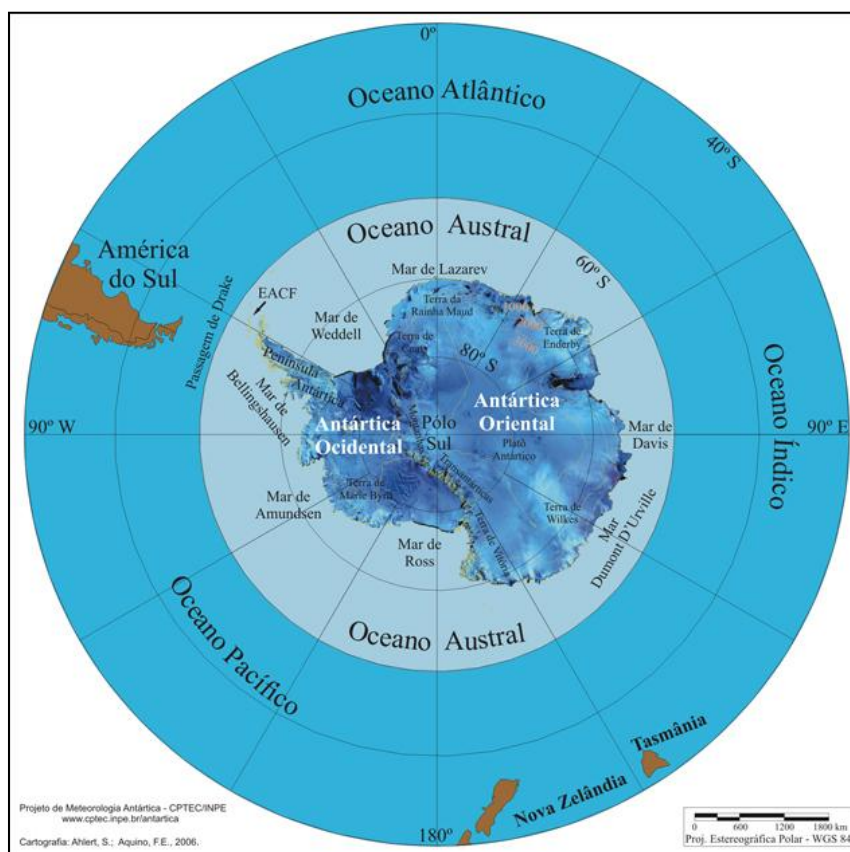
Como afirma Cavalcanti *et al.* (2009), o clima da região Sul do Brasil possui grandes contrastes nos regimes de precipitação e temperatura, sendo boa parte resultado da localização geográfica da região, entre os trópicos e as latitudes médias. O relevo também é responsável por estes contrastes. O regime de precipitação apresenta transição bem definida: enquanto, no norte da região Sul, predomina o regime típico de monção com estação chuvosa iniciando na primavera e terminando no início do outono, resultando em grande contraste entre verão e inverno, no sul desta região, ocorre distribuição mais uniforme de chuva ao longo do ano com um regime semelhante ao de latitudes médias que estão associados com a passagem de sistemas frontais e ciclones extratropicais.

A ZCAS também pode influenciar a precipitação no norte da região Sul, dependendo dos seus deslocamentos latitudinais. Durante o verão, o aquecimento da superfície e o aporte de umidade para dentro do continente tendem a instabilizar a atmosfera, produzindo mais convecção em associação com a monção sul-americana. O aquecimento e a convergência de umidade são maiores na porção norte da região Sul, nas proximidades da ZCAS, motivo pelo qual esta é a área onde a chuva de verão é mais intensa (Grimm *et al.*, 1998). Nas estações de transição, o jato subtropical de altos níveis está centrado sobre o sul do Brasil/nordeste da Argentina, o que influencia os máximos de precipitação na região a partir da ocorrência de CCM, cuja origem é resultante da interação deste jato com o vento de baixos níveis, quente e úmido proveniente do norte (Cavalcanti *et al.*, 2009). No período quente (outubro a abril), os CCM são freqüentes e respondem por grande parte da precipitação total, especialmente na primavera e outono. Na região, ocorre variabilidade do clima em escala temporal, como as oscilações interanuais de temperatura e precipitação em resposta aos eventos ENOS que representam a principal fonte de variabilidade interanual do clima do Brasil. Porém, esta influência dominante do ENOS não exclui a possibilidade de influência por parte de alguns outros padrões de variabilidade climática.

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Meteorologia e climatologia da região antártica

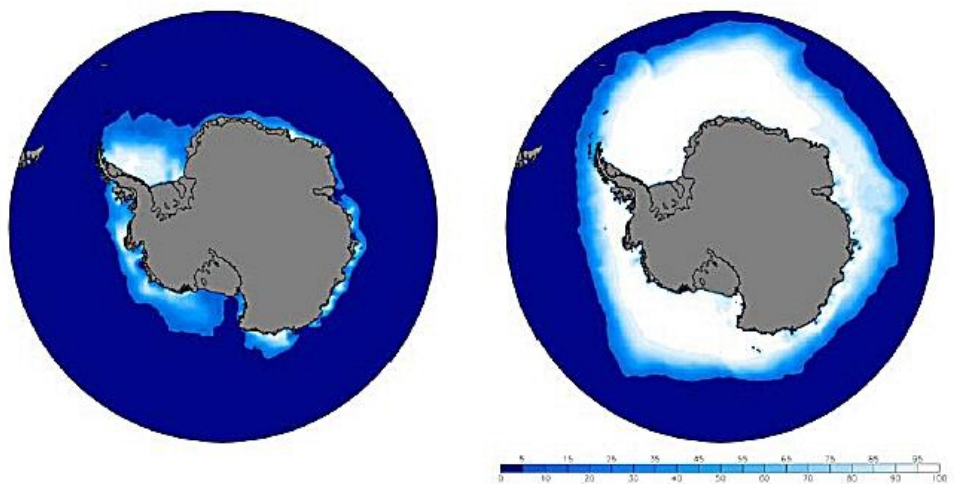
A região antártica situa-se ao sul da latitude de 60° S abrangendo toda a região do pólo sul do globo e inclui, além do próprio continente, um conjunto de ilhas, os mares próximos, as plataformas de gelo e o Oceano Austral (OA) que o circunda e é composto pelos mares de Weddell, Bellingshausen, Amundsen, Ross, Dumont D'Urville, Lazarev e Davis (**Figura 2.1**). O continente antártico, o mais austral do planeta, apresenta condições meteorológicas e climatológicas únicas, sendo o mais frio, o mais seco, o que possui os ventos mais intensos e o de altitude média mais elevada. Compreende uma área de aproximadamente  $14 \times 10^6 \text{ km}^2$  (1,6 vezes a área do Brasil), que é quase toda coberta por gelo (99,6%). Ainda abrange em torno de 10% da superfície terrestre e 90% do gelo da Terra ( $25 \times 10^6 \text{ km}^3$  de volume). A altitude média do manto de gelo é de 2.500 m e chega a alcançar mais de 4.000 m de altitude na região do platô antártico (<http://www.scar.org>).



**Figura 2.1** – Mapa fisiográfico do continente antártico mostrando sua localização geográfica centrada no pólo sul e os oceanos e principais mares que o circundam.



O continente antártico é cercado por um cinturão de gelo marinho que tem efeito significativo na interação oceano-atmosfera. Ao longo do ano, este cinturão atinge sua extensão máxima no fim do inverno/início da primavera (setembro) com área de cerca de  $20 \times 10^6 \text{ km}^2$  e alcança sua extensão mínima no fim do verão (fevereiro/março) apresentando uma área de aproximadamente  $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ , o que resulta numa variação de cerca de  $17 \times 10^6 \text{ km}^2$  superando a própria área do continente ( $14 \times 10^6 \text{ km}^2$ ). Este cinturão de gelo atinge, em alguns pontos, a latitude de  $55^\circ \text{ S}$  no fim do inverno e desempenha um importante papel em muitos processos meteorológicos causando impactos no clima das regiões costeiras e marinhas (King & Turner, 1997) (**Figura 2.2**).

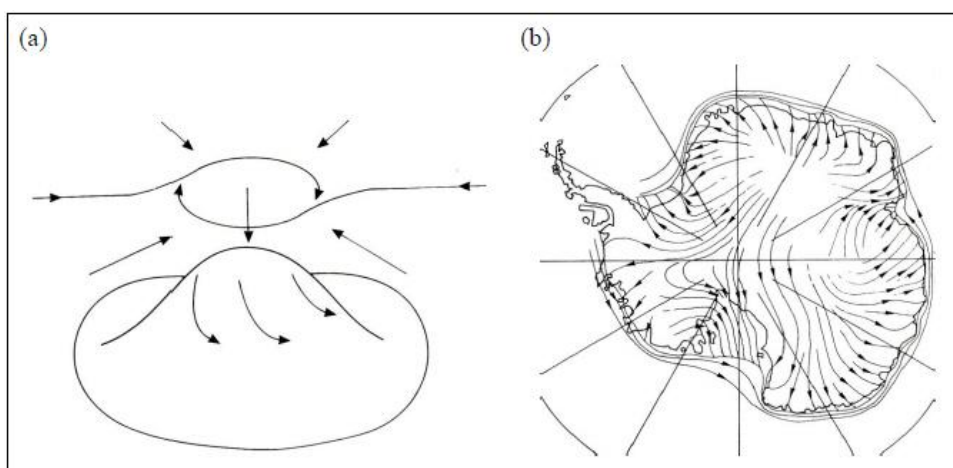


**Figura 2.2** – Média da extensão do gelo marinho entre 1979 e 2007. A figura à esquerda representa o mês de fevereiro e a da direita representa o mês de setembro. Fonte: *National Snow and Ice Data Center (NSIDC)*

O gelo que ocupa as porções interiores da Antártica apresenta a dinâmica da fluidez gradual para as bordas do continente em movimentos que fluem a uma velocidade média de 500 metros por ano. Um dos mais rápidos escoamentos glaciais em direção às bordas do continente situa-se na porção oeste e alimenta, principalmente, a plataforma de gelo Ross, a maior de toda a Antártica com  $500.000 \text{ km}^2$  de área. As plataformas de gelo representam feições bem características e permanentes em determinadas porções do continente antártico, compondo 11% de sua área total (King & Turner, 1997).

A península antártica representa uma importante feição geomorfológica que se estende para norte atingindo a latitude de  $63^{\circ}$  S e apresenta largura média de 70 km e elevação média de 1.500 m. Atua como barreira efetiva ao fluxo zonal tanto na atmosfera como no oceano, determinando diferenciação climática entre os dois lados situados a oeste e a leste da mesma (Ferron, 1999).

O campo de vento na região é uma das características mais marcantes com destaque para a circulação catabática. Para o desencadeamento deste processo, de grande importância é a altitude do domo de gelo que ultrapassa 4.000 m na região do platô. Esta elevada altitude, aliada à vasta cobertura de gelo permanente e temperaturas extremamente baixas, leva a formação de um centro de alta pressão sobre o continente, que gera uma forte e persistente circulação catabática na baixa atmosfera que conduz ar frio do interior em direção à costa. Os fortes ventos catabáticos, resultado da divergência em superfície, possuem uma resultante orientada para a esquerda, devido à força de Coriolis, e adquirem uma forte componente de leste próximo à costa estando concentrada nos principais vales glaciais (**Figura 2.3**). O continente age como um eficiente gerador de Ondas de Rossby, em função de sua orografia não ser simétrica com relação ao pólo sul, as quais se propagam em direção ao norte afetando a circulação nas latitudes médias (King & Turner, 1997).

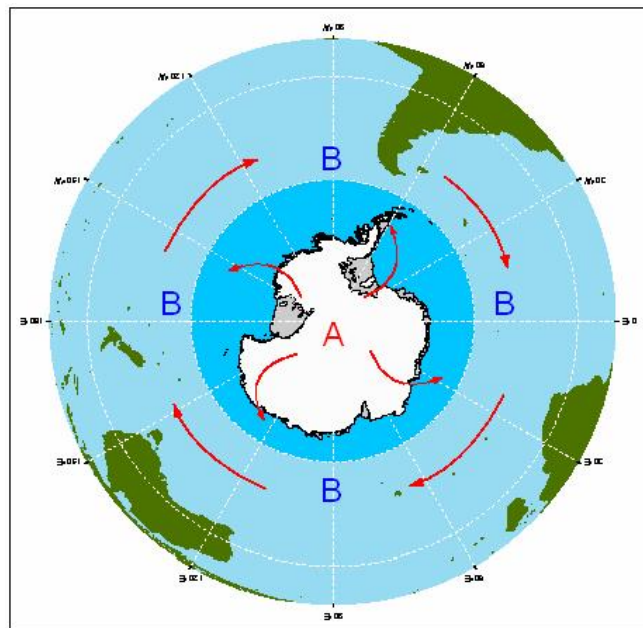


**Figura 2.3** – (a) Modelo conceitual da circulação troposférica sobre a Antártica. (b) Divergência em superfície resulta em ventos catabáticos que adquirem forte componente de leste próximo à costa (King & Turner, 1997).

A precipitação sobre a região é sustentada pelo transporte de ar úmido oriundo das latitudes médias para o sul. Ao sul de  $60^{\circ}$  S de latitude, os totais pluviométricos

decrecem nitidamente à medida que se avança para latitudes mais altas. A precipitação, ao longo da região costeira a sudeste do Mar de Bellingshausen, área de frequente ciclogênese com baixas desenvolvendo-se à sudeste e movendo-se para nordeste, é reforçada pela ausência da cobertura de gelo marinho no Mar de Bellingshausen durante os meses de verão o que aumenta o fluxo de calor e de vapor d'água nas camadas mais baixas da atmosfera. No interior do continente, os totais pluviométricos são consideravelmente inferiores. Desta forma, a região elevada localizada na porção leste da Antártica apresenta totais pluviométricos anuais inferiores a 50 mm.

A região que cobre o OA, próximo à latitude de  $60^{\circ}$  S, apresenta cobertura de nuvens em torno de 85-90% ao longo do ano sendo a região com maior cobertura de nuvens do HS. Nesta latitude, a variação sazonal é pequena com uma ligeira redução na quantidade de nuvens durante os meses de inverno, devido provavelmente à presença de gelo marinho no entorno do continente que ocasiona diminuição do fluxo de vapor d'água nas camadas mais baixas da atmosfera. Associada com a Baixa Pressão Circumpolar (**Figura 2.4**), o cinturão em torno de  $60-70^{\circ}$  S representa a região com a maior cobertura de nuvens de todo o planeta em virtude do encontro do ar frio proveniente das altas latitudes com o ar relativamente mais quente das latitudes mais baixas (King & Turner, 1997).



**Figura 2.4** – Representação esquemática da circulação atmosférica na região antártica, enfatizando a Baixa Pressão Circumpolar e a alta pressão sobre o continente. Fonte: *Australian Antarctic Division*.

A circulação oceânica na região antártica é composta por uma componente dirigida pelo vento e uma componente termohalina. A circulação governada pelos ventos domina as correntes de superfície restrita a poucas centenas de metros, enquanto que a circulação em maiores profundidades é controlada pela circulação termohalina. Uma notável característica inerente à circulação governada pelos ventos de oeste em superfície é a Corrente Circumpolar Antártica, ao longo de 55° S, latitude da passagem de Drake que separa o continente sul-americano do continente antártico. Esta corrente é responsável pelo transporte de água mais aquecida moderando as temperaturas sobre áreas costeiras em altas latitudes do HS durante o inverno (Wallace & Hobbs, 2006).

## **2.2. O papel da Antártica no clima global**

Toda a região antártica desempenha função destacada no sistema climático global, especialmente por sua dimensão, elevado albedo e balanço de radiação com grandes contrastes sazonais, além das complexas interações existentes entre a atmosfera, os oceanos e a criosfera. O termo criosfera (do termo “crio” - congelamento e esfera) refere-se aos componentes do sistema terrestre que são formados por água no seu estado sólido. A criosfera é importante para o equilíbrio do sistema climático, contribuindo para a refletividade ou albedo da Terra. Influencia a circulação oceânica termohalina e armazena quantidade de água suficiente para exercer forte controle sobre o nível do mar global (Wallace & Hobbs, 2006).

A atmosfera terrestre é uma grande máquina de calor caracterizada pelo aquecimento excessivo nos trópicos e um resfriamento nas altas latitudes. A circulação atmosférica global atua no sentido de transportar e distribuir calor entre os trópicos e os pólos. A Antártica representa um grande sorvedouro de calor para o planeta e principalmente para o HS, exercendo forte controle sobre a circulação atmosférica nas médias e altas latitudes. Sua vasta cobertura de gelo e neve faz com que a região possua um elevado albedo, contribuindo para o chamado mecanismo de *feedback* gelo-albedo, o qual se revela de extrema importância nas variações e mudanças do clima polar que proporciona impactos no sistema climático global (King & Turner, 1997).

Turner (2003) considera que, por se caracterizar por um imenso manto de gelo centrado próximo ao pólo sul, a Antártica gera enorme impacto na circulação atmosférica do HS. Suas características peculiares, tal como temperatura média do ar entre -20° e -60° C, somados à sua grande dimensão, gigantesco volume de gelo e elevada altitude, conferem a Antártica a importante função de contribuir decisivamente para a condução do clima no HS além de desempenhar papel essencial no controle da circulação atmosférica e oceânica nas médias e altas latitudes deste hemisfério (Flohn, 1987).

### **2.3. Variabilidade do clima na Antártica**

De acordo com Wallace & Hobbs (2006), a variabilidade do clima pode ser provocada por processos internos na atmosfera, processos acoplados com outros componentes do sistema terrestre (oceanos e criosfera) e por forçantes externas (variabilidade solar, erupções vulcânicas ou mudanças na composição atmosférica induzidas pelas ações antrópicas).

O continente antártico, assim como o gelo marinho que o circunda, recebe, ao longo do ano, uma menor quantidade de radiação solar na superfície do que as regiões tropicais. Além disto, o albedo da neve e do gelo marinho varia entre 80 e 90%, contrastando com o albedo do mar não congelado que oscila em torno de 10 a 15% (Lamb, 1982 *apud* King & Turner, 1997). Estas características da superfície do continente provocam a reflexão da maior parte da radiação solar que chega à superfície de volta para o espaço. Durante os meses de inverno, o gelo marinho atua de forma eficaz controlando a formação de nuvens, a estabilidade da atmosfera e, conseqüentemente, a precipitação sobre a região. A variabilidade sazonal da temperatura na Antártica está diretamente associada com a cobertura de gelo. Desta forma, muitos estudos utilizando modelos climáticos sugerem que uma redução na extensão do gelo marinho ao redor do continente pode produzir mudanças profundas no clima da Antártica (King & Turner, 1997).

Segundo Turner (2003), em função dos mecanismos de *feedback* relacionados à neve e à cobertura de gelo marinho, a variabilidade climática interanual na Antártica é

maior do que em regiões de latitudes mais baixas. De acordo com Aquino *et al.* (2006), este processo é reforçado pelas grandes interações existentes entre a atmosfera, os oceanos e a criosfera. Diferentemente do pólo norte, que possui imensas áreas cobertas por neve e gelo que variam sazonalmente e respondem de forma rápida às mudanças de temperatura, o continente antártico é coberto por uma superfície de gelo permanente e, dessa forma, é o gelo marinho que o circunda que possui o elevado potencial de contribuir para a mudança e a variabilidade do clima (King & Turner, 1997).

Um dos mais importantes modos de variabilidade climática nas médias e altas latitudes do HS é a Oscilação Antártica (Gong & Wang, 1999), usualmente referida por alguns autores como Modo Anular do Sul (Thompson & Wallace, 2000) ou Modo de Altas Latitudes (Rogers & Van Loon, 1982).

#### **2.4. Oscilação Antártica ou Modo Anular do Sul**

Durante o século XX, muita atenção foi dada ao estudo da circulação atmosférica em baixos níveis para um melhor entendimento de anomalias climáticas em escalas locais e em escala global. Gilbert Walker, durante as décadas de 1920 e 1930, foi um dos pioneiros neste assunto, realizando estudos sobre oscilações atmosféricas onde três delas foram reveladas e nomeadas como: Oscilação do Atlântico Norte (*NAO*), Oscilação do Pacífico Norte (*NPO*) e Oscilação Sul (*SO*).

Walker (1928) documentou a existência de um padrão tipo oscilação no cinturão de pressão que cruza o Chile e a Argentina em oposição ao cinturão de pressão que cruza a região do Mar de Weddell e do Mar de Bellingshausen. Após o trabalho de Walker, muitos artigos foram publicados a respeito destas oscilações, e mais dados foram revelados e se tornaram disponíveis (Shiotani, 1990; Hartmann & Lo, 1998; Gong & Wang, 1999; Thompson & Wallace, 2000). Assim, a Oscilação Antártica foi identificada como um dos modos de variabilidade nas médias e altas latitudes do HS (Gong & Wang, 1998). Estes autores definiram a Oscilação Antártica como uma oscilação ao nível do mar entre os cinturões de pressão das latitudes médias e altas do HS e uma alternância de grande escala de massa atmosférica entre estes cinturões de pressão. Gong & Wang (1999) descobriram que a Antártica e sua vizinhança

representam um centro de mesmo sinal enquanto as latitudes de 40°-50° S são cobertas por um centro de sinal oposto e que esta “gangorra” de pressão ao nível do mar entre os diferentes cinturões de pressão é estável e significativa. Quando a pressão ao nível do mar em torno de 40° S está alta, nas latitudes de 60°-70° S ela se torna baixa e vice-versa. Gong & Wang (1999) definiram um índice objetivo para a AAO na tentativa de compreender a estrutura espacial do campo de pressão ao nível do mar e a variabilidade da Oscilação Antártica e sua possível conexão com anomalias climáticas do HS. Possui o importante papel de monitorar e medir as condições da circulação atmosférica nas altas latitudes do HS. Denominaram-no de Índice de Oscilação Antártica (*Antarctic Oscillation Index*), sendo definido como a diferença de pressão ao nível do mar média zonal normalizada entre as latitudes de 40° e 65° S. Assim, a definição numérica do índice dada por Gong & Wang (1999) é a seguinte:

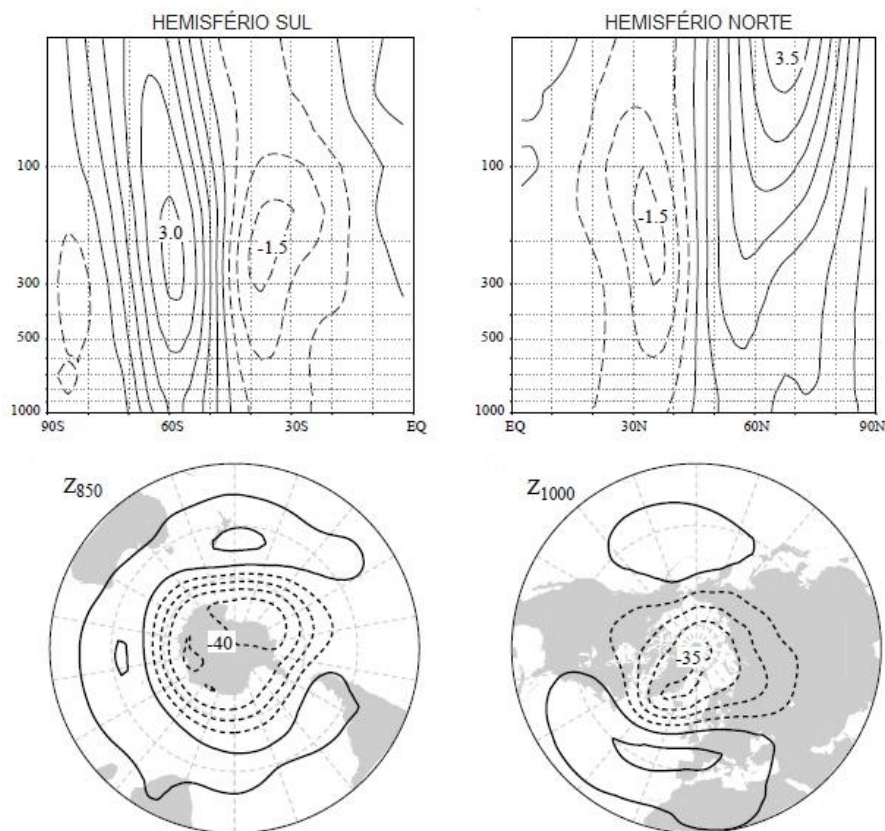
$$AOI = P^*_{40^{\circ}S} - P^*_{65^{\circ}S}$$

onde  $P^*_{40^{\circ}S}$  e  $P^*_{65^{\circ}S}$  representam a pressão ao nível do mar média zonal normalizada em 40° S e 65° S, respectivamente. Os valores positivos (negativos) do índice estão associados com anomalias negativas (positivas) de pressão ao nível do mar nas altas latitudes e anomalias positivas (negativas) de pressão ao nível do mar nas latitudes médias (Gong & Wang, 1999; Thompson & Wallace, 2000; Lefebvre *et al.*, 2004).

Thompson & Wallace (2000) definiram a Oscilação Antártica por meio da análise de componentes principais de anomalias de altura geopotencial em 850 hPa ao sul de 20° S, além de ser o padrão dominante de variações da circulação troposférica não sazonal ao sul desta latitude. Valores positivos (negativos) do índice estão associados com anomalias negativas (positivas) de altura geopotencial sobre a Antártica e anomalias positivas (negativas) sobre as latitudes médias. Assim como Gong & Wang (1999), estes autores consideram que a AAO caracteriza-se por anomalias de pressão de um sinal centrado na Antártica e anomalias de sinal oposto centradas em torno de 40°-50° S.

Thompson & Wallace (2000) identificaram o que eles chamaram de “Modo Anular” em dados mensais de anomalias de altura geopotencial em ambos os hemisférios. Estes modos de variabilidade são estruturas anulares zonalmente simétricas

caracterizadas por perturbações de altura geopotencial de sinais opostos centrados nos pólos e em torno de 45° S de latitude. Desta forma, a Oscilação Antártica possui um modo equivalente no Hemisfério Norte (HN) denominado Oscilação Ártica (AO) (**Figura 2.5**). Da mesma forma que o seu modo equivalente, a AAO é evidente durante o ano todo na troposfera, mas também está acoplada à circulação da baixa estratosfera durante as estações em que o vórtice polar estratosférico é perturbado por ondas que se dispersam da troposfera para as camadas superiores da atmosfera (Thompson & Solomon, 2002). Este acoplamento deve ocorrer quando a circulação na baixa estratosfera é de oeste. As anomalias dos ventos de oeste amplificam com a altura desde a superfície até a baixa estratosfera. No índice positivo, os ventos de oeste e a baroclinicidade sofrem realce em altas latitudes.



**Figura 2.5** – No alto, seção transversal latitude x altura mostrando típicas amplitudes de anomalias de vento geostrófico médio zonal dos modos anulares (pressão expressa em hPa, intervalo dos contornos é de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ ). Embaixo, altura geopotencial na baixa troposfera (o intervalo dos contornos é de 10 m). O esquema refere-se à fase positiva da AAO. (Thompson & Wallace, 2000; adaptado de Holton, 2004).



Thompson & Wallace (2000) observaram que a primavera é a estação do ano mais ativa da circulação na baixa estratosfera no HS e a flutuação da AAO durante esta estação está associada com um significativo resfriamento (aquecimento) no nível da tropopausa na região polar (tropical). Ressaltaram que esta relação entre as temperaturas polares e tropicais não são evidentes durante as outras estações.

Além de Thompson & Wallace (2000), outros autores definem a AAO como o modo dominante da circulação atmosférica extratropical do HS (Kidson, 1988; Limpasuvan & Hartmann, 2000). Em função de se caracterizar por um padrão de variabilidade climática de escala hemisférica, influencia variáveis atmosféricas e indicadores climáticos no HS, como oscilações de temperatura sobre a Antártica (Kwok & Comiso, 2002; Schneider *et al.*, 2004), precipitação e temperatura nas latitudes médias do HS (Jones & Widmann, 2003; Gillett *et al.*, 2006) e variações na extensão do gelo marinho e circulação oceânica (Hall & Visbeck, 2002; Lefebvre *et al.*, 2004). A variabilidade atmosférica associada com a AAO possui um impacto significativo na cobertura de gelo marinho ao redor do continente antártico e na circulação oceânica (Lefebvre *et al.*, 2004).

Jones & Widmann (2004) também definem a AAO como o modo principal de circulação atmosférica extratropical do HS além de representar flutuações na intensidade do vórtice circumpolar. Para estes autores, a AAO caracteriza-se como a primeira Função Ortogonal Empírica (*EOF*) e seu índice como a primeira componente principal da pressão extratropical ao nível do mar. Um índice positivo (negativo) indica uma intensificação (enfraquecimento) do escoamento circumpolar de oeste.

O conceito de vórtice circumpolar também foi abordado por Thompson & Solomon (2002). Para estes autores, a variabilidade climática nas altas latitudes do HS é dominada pela AAO, que representa um padrão de grande escala de variabilidade caracterizada por flutuações na intensidade do vórtice circumpolar. A circulação atmosférica neste hemisfério seria dominada, em parte, por este vórtice, que se estende da superfície até níveis mais elevados, atingindo a estratosfera. O vórtice é mais forte durante o inverno na estratosfera quando as temperaturas polares estão mais baixas e é mais fraco durante os meses de verão quando a circulação em níveis acima de 30 hPa reverte o sinal e se enfraquece. O vórtice exibe considerável variabilidade em escalas de tempo mensais e anuais. Os meses correspondendo às fases positivas são caracterizados

por temperaturas polares mais baixas, baixa altura geopotencial sobre o pólo e forte escoamento circumpolar em torno de 60° S. Os meses que correspondem às fases negativas são caracterizados por anomalias opostas.

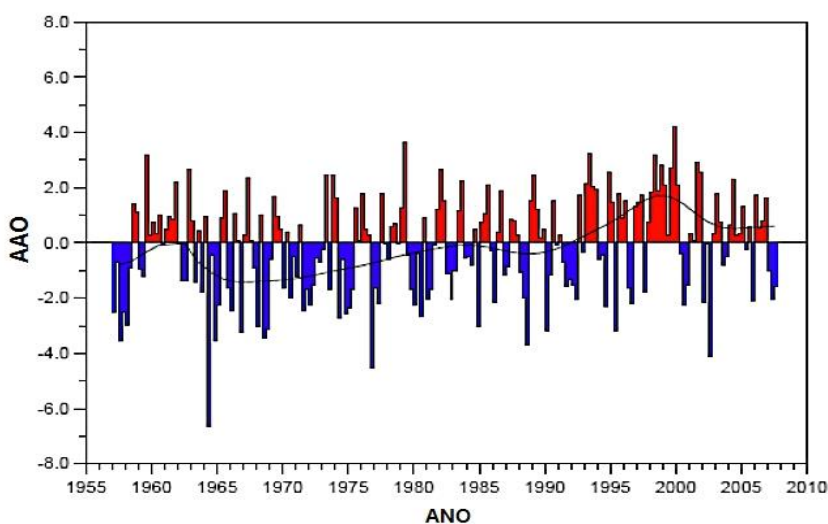
A relação entre as variações nas anomalias de pressão em diferentes cinturões, como a região dos pólos (altas latitudes) e a região de latitudes médias e a intensificação ou enfraquecimento dos ventos de oeste pode ser explicada pela seguinte equação:

$$U_g = - \frac{1}{\rho f} \frac{\delta p}{\delta y}$$

onde  $f$  representa o parâmetro Coriolis, que é sempre negativo no HS, portanto, o fator  $(-1/\rho f)$  torna-se positivo neste hemisfério. Para determinar o sinal do fator  $(\delta p/\delta y)$ , deve-se saber que  $\delta p$  é a variação entre a pressão no pólo ( $P_a$ ) e a pressão nas latitudes médias ( $P_b$ ). Se, por exemplo, a pressão no pólo ( $P_a$ ) é menor do que a pressão nas latitudes médias ( $P_b$ ), a variação entre os diferentes cinturões de pressão ( $P_b - P_a$ ), representada por  $\delta p$ , terá sinal positivo. Consequentemente,  $U_g$  também será positivo, o que significa que as anomalias da componente zonal do vento geostrófico são positivas e isto reflete em uma intensificação dos ventos de oeste na região entre os diferentes cinturões de pressão. Esta intensificação dos ventos é representada pela AAO positiva. Desta forma, pode-se explicar o porquê da AAO positiva estar associada à intensificação dos ventos e às anomalias de pressão inferiores nas altas latitudes em relação às latitudes médias. Por outro lado, quando  $P_a$  é maior do que  $P_b$ ,  $P_b - P_a$  terá sinal negativo. Sendo  $\delta p$  negativo, o sinal de  $U_g$  também será negativo, contribuindo para um enfraquecimento dos ventos de oeste devido às anomalias negativas do vento. Isto configura uma situação de AAO negativa.

Nos últimos anos, a AAO despertou o interesse de muitos pesquisadores principalmente por ter apresentado, nas últimas décadas, tendências positivas significativas, particularmente durante o outono e o verão austral (Thompson *et al.*, 2000; Marshall, 2003). As tendências positivas foram mais marcantes a partir de meados da década de 1960 até o fim dos anos 1990 (**Figura 2.6**). Gong & Wang (1999) afirmaram que o índice apresentou valores baixos durante os anos 60 e meados dos anos 70, enquanto valores mais elevados foram registrados nos anos 80 e 90. De acordo com

estes autores, deve-se atentar para a variabilidade decadal da AAO e sua relação com as mudanças climáticas.



**Figura 2.6** – Série temporal do Índice de Oscilação Antártica. A curva em cor preta indica a tendência do índice, sugerindo variações decadais (adaptado do IPCC, 2007).

Atualmente, as razões destas tendências ainda estão sob questionamento, mas considera-se uma possível variabilidade decadal da AAO e já se sabe que o aumento na concentração de gases estufa e a diminuição do ozônio estratosférico são fatores importantes que afetam a AAO (Turner, 2004) como mostram alguns estudos que relacionam estas tendências positivas às causas antropogênicas, como diminuição do ozônio estratosférico (Thompson & Solomon, 2002; Gillett & Thompson, 2003; Miller *et al.*, 2006, Perlwitz *et al.*, 2008) e emissão de gases estufa (Stone *et al.*, 2001; Cai *et al.*, 2003; Miller *et al.*, 2006). De acordo com Marshall (2002), esta tendência positiva resultou em uma intensificação dos ventos de oeste (*westerlies*) em torno de 15% contribuindo para uma variabilidade espacial de mudança de temperatura na Antártica (Kwok & Comiso, 2002; Schneider *et al.*, 2004). Lefebvre *et al.* (2004) também consideraram que uma tendência de valores positivos do índice possa refletir em uma intensificação dos ventos de oeste na região da Corrente Circumpolar Antártica, porém sofrendo enfraquecimento ao norte da latitude de 40° S.

Segundo Thompson & Wallace (2000), a fase positiva da AAO está associada com um resfriamento sobre a maior parte da Antártica. A PA representa a exceção, pois os intensos ventos de oeste associados com a fase positiva aumentam a advecção de ar oceânico relativamente quente sobre a PA provocando um significativo aquecimento da

região. Thompson & Solomon (2002) também relataram esta ocorrência, observando que os fortes ventos de oeste agem diminuindo a incidência de ar frio, proveniente das latitudes mais altas, sobre a PA e, assim, permitindo aumento da advecção de ar quente oriundo do OA. O resfriamento sobre os pólos durante a fase positiva também é explicado pelo fato de a AAO estar acompanhada por movimentos verticais termicamente indiretos em altas latitudes.

O trabalho realizado por Gillett *et al.* (2006) corrobora com estes resultados, pois ao estudarem temperatura e precipitação com o objetivo de identificar a influência da AAO em regiões continentais do HS, descobriram que este padrão causa forte impacto na temperatura e na precipitação sobre determinadas áreas, sendo a fase positiva associada à um significativo resfriamento sobre a Antártica e Austrália e aquecimento sobre a PA, Argentina, Tasmânia e sul da Nova Zelândia. Esta fase também está relacionada a condições anormalmente secas sobre o sul da América do Sul, Nova Zelândia e Tasmânia devido a um deslocamento para o sul das trajetórias de tempestades e também condições anormalmente úmidas sobre a Austrália e a África do Sul. Rao *et al.* (2003) ao examinarem como a AAO está relacionada à variabilidade interanual das trajetórias de tempestades no HS, encontraram uma maior ocorrência das perturbações baroclínicas nas latitudes médias durante as fases positivas e uma redução nas fases negativas.

Carvalho *et al.* (2005) relacionaram as fases positivas e negativas da AAO com a atividade tropical intra-sazonal e interanual e com as fases do ENOS durante o verão austral. Este trabalho teve como foco o estudo da variabilidade diária do índice e em como ele pode ser modulado pela atividade nos trópicos. Considerando que os modos anulares possuem uma forte correlação com a circulação na alta troposfera e na baixa estratosfera (Thompson & Wallace, 2000), é possível que as fases do ENOS desempenhem importante papel na modulação das fases da AAO, uma vez que a circulação nos extratropicos pode ser amplificada pelo transporte de transientes (O'Sullivan & Salby, 1990).

Carvalho *et al.* (2005), ao analisarem a variabilidade diária da AAO, observaram que, durante episódios El Niño (La Niña), há um predomínio de valores negativos (positivos) da AAO. Esta ocorrência também foi constatada por Gong *et al.* (2010) onde mostraram que este fato pode estar relacionado ao escoamento básico troposférico

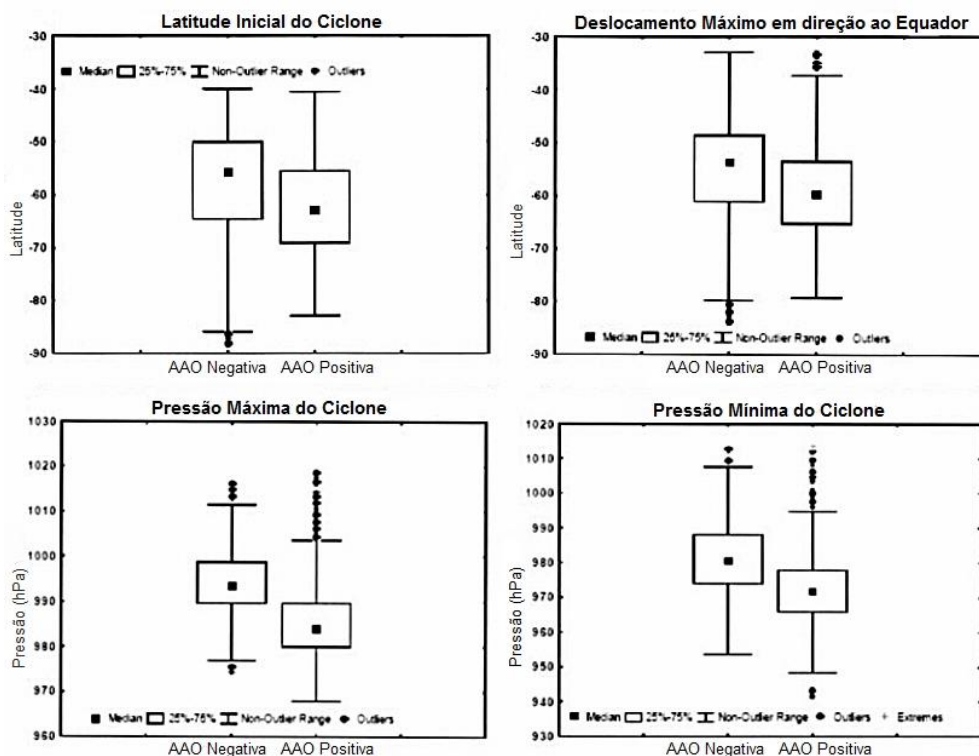
associado com El Niño (La Niña) e a conseqüente convergência/divergência de fluxo de *momentum* turbulento que guia a fase negativa (positiva) da AAO. Estes resultados conduzem à questão se é o gradiente meridional de vorticidade potencial, associado ao ENOS, que determina esta relação com as fases da AAO. Marshall & Connolley (2006) mostraram que um aumento da temperatura da superfície do mar (TSM) nas altas latitudes do HS provoca aquecimento da atmosfera e, por meio de processos termodinâmicos, ocasiona levantamento do centro de massa da atmosfera e aumento da altura geopotencial, assim gerando mais índices negativos da AAO.

Segundo Thompson (2007), enquanto o ENOS representa um exemplo mais conhecido de padrão de grande escala de variabilidade climática e deve sua existência às interações oceano-atmosfera no Pacífico Tropical (PT), os modos anulares (AAO e AO) devem sua existência à dinâmica atmosférica nas latitudes médias. O ENOS é o mais importante, em termos de variância explicada, padrão de grande escala de variabilidade climática nos trópicos e os modos anulares são os mais importantes padrões de variabilidade nas altas e médias latitudes de ambos os hemisférios. Os modos anulares descrevem a variabilidade no escoamento atmosférico anômalo, isto é, variabilidade não associada com o ciclo sazonal. No campo de pressão, são caracterizados por alternâncias norte-sul de massa atmosférica entre as regiões polares e as latitudes médias e, no campo de vento, descrevem oscilações norte-sul no vento zonal extratropical com centros de ação localizados em 55°-60° e 30°-35° de latitude.

Embora a existência da AAO seja devido a mecanismos dinâmicos internos entre as altas e médias latitudes, a Oscilação Madden-Julian (OMJ) e o ENOS são os mais importantes modos de variabilidade tropical em escalas de tempo intrasazonais e interanuais e podem ter importantes interações com a AAO. Análises de *EOF* de altura geopotencial de altas e baixas frequências em eventos ENOS indicam enfraquecimento (intensificação) da AAO durante anomalias positivas (negativas) de altura geopotencial sobre a Antártica em episódios de El Niño (La Niña). Contudo, a natureza das interações entre os trópicos e os extratropicos sugere que os episódios extremos do ENOS não devem ser sempre associados às fases extremas opostas da AAO conforme aponta Carvalho *et al.* (2005).

Carvalho *et al.* (2005) mostram que os padrões de teleconexões em anomalias diárias de vento zonal em 200 hPa evidenciam duas feições zonalmente simétricas em

aproximadamente 45° e 60° S, o que parece estar relacionada com os jatos subtropical e polar, respectivamente. Segundo estes autores, a intensificação (enfraquecimento) do jato subtropical de altos níveis e também o enfraquecimento (intensificação) do jato polar de altos níveis estão relacionados com as fases negativas (positivas) da AAO. A importância das variações da AAO pode ser também observada nas propriedades dos ciclones extratropicais (CE), como origem, pressões centrais e seu deslocamento em direção ao Equador. Durante as fases negativas da AAO, os CE tendem a se formarem e se moverem para latitudes mais baixas, assim como possuem pressões centrais mais altas quando comparados com a fase positiva (Figura 2.7). Ademais, CE formados relativamente próximos a Antártica durante fases negativas da AAO possuem pressões centrais mais altas do que aqueles que se desenvolvem mais afastados deste continente. Isto ocorre, provavelmente, em função da forte baroclinia próximo ao continente antártico. Estas relações entre a AAO e a instabilidade baroclínica e, conseqüentemente, a dinâmica extratropical a partir das propriedades dos CE, são consistentes com o fato de a AAO ser um modo interno das médias para as altas latitudes.



**Figura 2.7** – Análise estatística das propriedades dos ciclones extratropicais, obtida através do método de Murray e Simmonds (1991) durante ambas as fases da AAO: pressão máxima e pressão mínima do ciclone; latitude inicial do ciclone e seu máximo deslocamento em direção ao Equador durante o seu ciclo de vida (modificado de Carvalho *et al.*, 2005).

Fases distintas da AAO, com seus próprios padrões de circulação atmosférica, influenciam a latitude de formação dos CE e seus deslocamentos máximos para o Equador em função do deslocamento do jato subtropical em direção ao Equador durante a fase negativa, o que favorece os ciclones a iniciarem e se dissiparem em latitudes mais baixas (Carvalho *et al.*, 2005). O tempo na região subtropical e nas regiões polares é sistematicamente afetado pela propagação de CE. O regime de precipitação sobre o sudeste da América do Sul durante o verão pode ser influenciado por estes sistemas assim como modulam a atividade da ZCAS sobre o Oceano Atlântico subtropical (Carvalho *et al.* 2004).

As condições frontogenéticas mostradas por Reboita *et al.* (2009) corroboram com as investigações feitas por Carvalho *et al.* (2005), uma vez que estes autores notaram que o posicionamento das trajetórias dos sistemas ciclônicos é influenciado pelas fases da AAO e, conseqüentemente, o regime de precipitação sobre a América do Sul também deve ser alterado. Durante a fase negativa, estes autores verificaram a ocorrência de frontogênese mais intensa e anomalias positivas de precipitação sobre o sul do Brasil, Uruguai e centro-norte da Argentina, especialmente no verão e no outono. Foi observada a ocorrência de frontólise sobre o sul e o norte do Chile em distintas estações do ano e sobre o nordeste do Brasil durante o ano todo. Durante a fase positiva, os resultados mostrados por Reboita *et al.* (2009) evidenciam nítida redução nas condições frontogenéticas sobre o sudeste da América do Sul e Oceano Atlântico Sul, especialmente durante outono e inverno. Além disso, é nítido um regime de precipitação oposto ao das fases negativas quando anomalias negativas (positivas) são verificadas sobre o Sul (Sudeste) do Brasil.

O mapa de densidade ciclônica mostrado no estudo realizado por Reboita *et al.* (2009) sugere que, nas fases negativas, o cinturão ciclogênético em torno do continente Antártico se encontra mais expandido e deslocado para o norte em relação à fase positiva quando há grande concentração de ciclones no entorno do continente antártico. Isto mostra concordância com as análises de teleconexão de Carvalho *et al.* (2005) onde identificaram que, durante as fases positivas da AAO, o jato subtropical que age como guia de ondas subtropical, parece movimentar-se para o sul. Além disto, o mapa de densidade ciclônica de Reboita *et al.* (2009) sugere que uma menor quantidade de ciclones atravesse o sul da América do Sul durante a fase positiva o que também está de

acordo com os mapas frontogenéticos que exibem frontogênese mais fraca e anomalias negativas de precipitação nesta região para esta fase. Já nas fases negativas, o jato subtropical intensifica-se e parece dirigir-se para o Equador contribuindo para a propagação de ciclones em direção ao sul e sudeste da América do Sul.

Como discutido por Sen Gupta & England (2006), a região Sudeste da América do Sul parece ser a região continental do HS onde a relação da AAO com anomalias de precipitação se manifesta de forma mais intensa considerando o período iniciado em 1979. A relação das distintas fases da AAO com anomalias de precipitação sobre a região Sudeste da América do Sul foi bem examinada por Silvestri & Vera (2003). Estes autores descobriram que a influência é mais forte no inverno e no fim da primavera quando as fases positivas (negativas) da AAO estão associadas com a intensificação de uma anomalia anticiclônica (cyclônica) em altos níveis, enfraquecimento (fortalecimento) da convergência de umidade e diminuição (aumento) da precipitação sobre esta região da América do Sul. Ademais, observaram que, durante a primavera, a influência combinada da AAO e do ENOS gera valores significativos de correlação resultando em uma forte modulação do sinal do ENOS pela atividade da AAO nas anomalias de precipitação sobre o Sudeste da América do Sul. Os resultados encontrados por estes autores parecem concordar com Rao *et al.* (2003) que encontraram correlação negativa entre a AAO e as trajetórias de tempestades em latitudes altas e subtropicais e uma correlação positiva em latitudes médias.

Em outro estudo, Silvestri & Vera (2009) mencionaram que, durante a primavera austral, episódios quentes (frios) das fases do ENOS, que configuram episódios El Niño (La Niña), associam-se com aumento (redução) da precipitação sobre o sudeste da AS. Estes autores também encontraram, nas décadas de 1960 e 1970, o desenvolvimento de uma circulação anticiclônica, no setor sudoeste do Atlântico Subtropical associada com a fase positiva da AAO, que aumenta a advecção de umidade e intensifica a precipitação sobre o sudeste da AS, bem como contribui para anomalias negativas de temperatura sobre a PA. Em contrapartida, nas décadas de 1970 e 1980, esta circulação cobre a maior parte da porção sul da AS e o Atlântico adjacente, gerando enfraquecimento da convergência de umidade e redução da precipitação sobre o sudeste da AS, assim como anomalias positivas de temperatura na região da Patagônia e na PA. Para estes autores,



isso sugere que mudanças nas anomalias de temperatura sobre a PA poderiam ser também influenciadas pela variabilidade natural do clima.

Vasconcellos & Cavalcanti (2010a) realizaram um estudo relacionando a AAO com precipitação extrema sobre parte da região Sudeste do Brasil durante o verão austral. Estes autores observaram que a precipitação anômala positiva na região Sudeste do Brasil ocorre na região da ZCAS durante a fase positiva da AAO e quando o padrão *Pacific South America (PSA)* exibe forte centro ciclônico em 120° W, próximo a Antártica. Precipitação anômala negativa ocorre ao sul da ZCAS. Concluíram que precipitação intensa sobre a região Sudeste brasileira ocorre na fase positiva da AAO, enquanto condições de seca na região ocorrem na fase negativa. Sugeriram que a AAO intensifica o centro ciclônico na parte sudoeste da AS, que é parte do trem de ondas tipo PSA, contribuindo para a intensificação da circulação anômala sobre o Sudeste do Brasil. De acordo com Reboita *et al.* (2009), parece que a ZCAS tende a se enfraquecer durante o verão quando das fases negativas da AAO.

Nan & Li (2003), ao examinarem estatisticamente a relação entre a AAO na primavera boreal (abril e maio) e a precipitação no vale do rio Yangtze durante o verão seguinte (junho a agosto), notaram que há uma significativa correlação positiva. Notou-se que um forte sinal da AAO é seguido de um enfraquecimento da monção de verão no leste asiático e um enfraquecimento e expansão para oeste da Alta Subtropical do Pacífico Oeste. Segundo estes autores, as anomalias na circulação atmosférica de grande escala durante o verão sobre o leste da Ásia também estão relacionadas com a AAO.

Santos & Franco (2010) indicaram que a fase positiva da AAO produz uma feição de bloqueio na porção leste do Oceano Pacífico Sul, costa leste da América do Sul e Oceano Atlântico Sul. Este resultado sugere que esta fase da AAO bloqueia os CE em suas travessias por este cinturão, além de impor uma configuração de três vórtices na costa leste da AS. Outro interessante resultado é a banda de vorticidade negativa que inclui a Amazônia, o setor leste da AS e a parte subtropical do Atlântico Sul. Esta configuração indica que a fase positiva da AAO favorece o estabelecimento da ZCAS com vorticidade ciclônica. Na região mais ao sul, a fase positiva gera vorticidade anticiclônica e períodos secos.

Sun *et al.* (2009), ao estabelecerem uma ligação entre a AAO na primavera boreal (ou outono austral) com a monção de verão no oeste da África, notaram que os resultados revelaram variações em escalas decadais. Os autores descobriram também que a AAO na primavera boreal produz uma anomalia na TSM sobre o Atlântico Sul tropical em função da propagação de um trem de Ondas de Rossby em direção ao equador.

Hendon *et al.* (2007), avaliaram as relações da AAO com a precipitação na Austrália e com variações na temperatura da superfície. Descobriram que, durante o verão, a fase positiva está associada com aumento da precipitação diária no sul da costa leste do país e diminuição na porção oeste da Tasmânia, enquanto, no inverno, a fase positiva está associada com redução da precipitação diária sobre as regiões Sudeste e Sudoeste da Austrália. Esta redução da precipitação no inverno durante a fase positiva também foi constatada por Feng *et al.* (2010), que sugeriram que esta aparente relação inversa entre a AAO e a precipitação nesta região pode ser causada pelo ano extremo de 1964, que provocou o inverno mais úmido na região durante o período de 1948-2007. Estes autores mostram que ambas as fases da AAO causam impacto reduzido na precipitação desta região se os dados deste ano forem excluídos da análise completa. Para estes autores, os resultados indicam que a AAO não influencia significativamente a precipitação de inverno no sudoeste da Austrália, estando esta região mais suscetível à variabilidade da circulação atmosférica regional sobre o Oceano Índico.

## CAPÍTULO 3: DADOS E METODOLOGIA

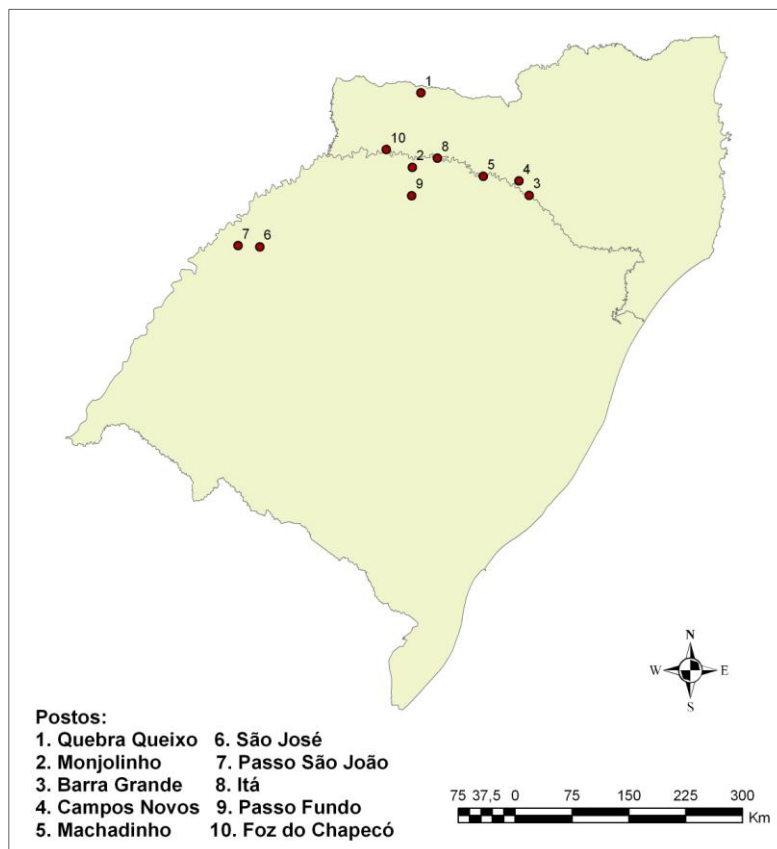
Este item do trabalho dedica-se à apresentação dos dados utilizados bem como à descrição dos métodos de análise empregados para a obtenção dos resultados.

### 3.1. Dados

Foram utilizados dados de médias mensais do Índice de Oscilação Antártica obtidos através do *Climate Prediction Center/National Centers for Environmental Prediction (CPC/NCEP)* para o período compreendido entre janeiro de 1979 e dezembro de 2008. O CPC computa o Índice de Oscilação Antártica diariamente através da projeção das anomalias de altura geopotencial em 700 hPa sobre o modo principal da EOF (EOF-1) derivado de médias mensais de anomalias de altura geopotencial em 700 hPa de 20° a 90° S (mais informações disponíveis em <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/>). O EOF-1 captura o máximo da variância explicada. Estes dados são baseados nas reanálises do *National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR)* e foram empregados em uma resolução horizontal de latitude x longitude = (2,5° x 2,5°) para o período que se iniciou em 1979, e o ciclo sazonal é removido do campo médio mensal do geopotencial. Em seguida a matriz de covariância é usada para a análise da EOF. Para este trabalho, determinou-se que as distintas fases da AAO seriam baseadas a partir de limiares de forma a representar as fases negativas significativas (representadas por valores mensais do índice inferiores ou iguais a - 1) e as fases positivas significativas (representadas por valores mensais do índice superiores ou iguais a + 1). Os valores compreendidos no intervalo entre (-1) e (+1) representariam uma fase neutra da AAO.

Os dados mensais de vazões naturais utilizados neste trabalho foram obtidos junto ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para um período de 30 anos compreendido entre janeiro de 1979 e dezembro de 2008. Estes dados referem-se às vazões naturais de rios localizados na bacia hidrográfica do rio Uruguai e que são medidas a partir de postos situados nestes rios. O setor elétrico tem adotado o termo vazão natural para identificar a vazão que ocorreria em uma seção do rio, se não houvesse as ações antrópicas na sua bacia contribuinte, tais como regularizações de vazões realizadas por reservatórios, desvios de água, evaporações em reservatórios e

usos consuntivos (irrigação, criação animal e abastecimentos urbano, rural e industrial). A vazão natural é obtida por meio de um processo de reconstituição, que considera a vazão observada no local e as informações relativas às ações antrópicas na bacia (<http://www.ons.org.br>). A série de vazões naturais mensais dos aproveitamentos desta bacia foi obtida no âmbito do Projeto de Revisão das Séries de Vazões Naturais, coordenado pelo ONS, que contou com o acompanhamento técnico da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), da ANA, do Ministério de Minas e Energia (MME) e dos Agentes de Geração responsáveis pelos aproveitamentos desta bacia. Neste estudo, foram incluídos os dados de 10 postos e, para cada posto, têm-se um total de 360 valores mensais de vazões naturais (12 meses x 30 anos) totalizando 3600 valores considerando-se os 10 postos. Estes postos estão localizados a montante das Usinas Hidroelétricas (UHEs) de: Quebra-Queixo (*Rio Chapecó/SC*); Monjolinho e Passo Fundo (*Rio Passo Fundo/RS*), Barra Grande (*Rio Pelotas/RS*), Campos Novos (*Rio Canoas/SC*), Machadinho, Itá e Foz do Chapecó (*Rio Uruguai/SC/RS*), São José e Passo São João (*Rio Ijuí/RS*). Desta forma, utilizou-se o nome de cada UHE para identificar o posto a ela correspondente (**Figura 3.1**).



**Figura 3.1** – Área de estudo com a localização dos postos de medição de vazões.

### 3.2. Métodos

Para analisar os dados e investigar as relações entre a AAO e as vazões dos referidos rios inseridos na bacia do rio Uruguai, empregou-se o teste estatístico de hipóteses de *Aspin-Welch* cujo índice ou estatística de testes é comparado com a distribuição *t-student*. O nível de significância do teste, considerada a região suficientemente improvável da distribuição nula, foi de 5% ( $\alpha = 0,05$ ).

Para relacionar os dados de vazões médias mensais com a AAO para cada um dos dez postos, calculou-se a média da vazão na fase negativa e a média na fase positiva. Portanto, obtiveram-se, para cada um dos dez postos de medição, duas diferentes médias de vazões: uma relativa à fase negativa e outra referente à fase positiva. Com o emprego do teste estatístico, é possível verificar se as diferenças entre as médias das vazões durante as fases negativas e as médias das vazões durante as fases positivas são diferentes ou estatisticamente significativas.

Para isso, deve-se obter a estatística de teste ( $Z$ ) de cada posto de medição de vazões. Como mostra a **Figura 3.2**, para que o teste considere tais diferenças significativas, o valor de  $Z$  de cada posto deve ser superior (inferior) a  $t_{\alpha/2}$  ( $-t_{\alpha/2}$ ) que situa-se na faixa de 5% (áreas hachuradas na **Figura 3.2**) que representa o nível de significância do teste. O ponto  $t_{\alpha/2}$  representa o ponto da distribuição *t-student* com  $f$  graus de liberdade. Para determinar o valor deste ponto, consulta-se uma tabela (por exemplo, Choi, 1978, p. 244), que, a partir do valor de  $f$  e do valor de  $\alpha/2$ , tem-se o valor de  $t_{\alpha/2}$  que pode ser diferente para cada caso. O teste considera a hipótese nula ( $H_0$ ) nos casos em que não há diferença significativa entre as médias e, a hipótese alternativa ( $H_A$ ), nos casos em que existe uma diferença significativa entre as duas diferentes médias. Portanto, determina-se  $Z$  por:

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

$\bar{X}_1$  - média da série na fase negativa;  
 $S_1$  - desvio-padrão da série na fase negativa;  
 $n_1$  - tamanho da amostra na fase negativa;  
 $\bar{X}_2$  - média da série na fase positiva;  
 $S_2$  - desvio-padrão da série na fase positiva;  
 $n_2$  - tamanho da amostra na fase positiva.

Formalmente, o teste pode ser considerado como:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \qquad H_A: \mu_1 \neq \mu_2$$

Sendo um teste bilateral deve-se rejeitar  $H_0$ , se:

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} < -t_{\alpha/2} \text{ ou } > t_{\alpha/2} \quad \text{onde } \alpha = 0,05 \text{ e } \alpha/2 = 0,025$$

Sendo  $t_{\alpha/2}$  o ponto da distribuição *t-student* com  $f$  graus de liberdade que é definido por:  $f = \text{mín}(n_1, n_2) - 1$

Se  $H_0$  for rejeitada, aceita-se a  $H_A$ , onde  $\mu_1 \neq \mu_2$ . Para  $\alpha = 0,05$  significa que estaremos cometendo um erro de no máximo 5%, no caso, de rejeição da  $H_0$ .

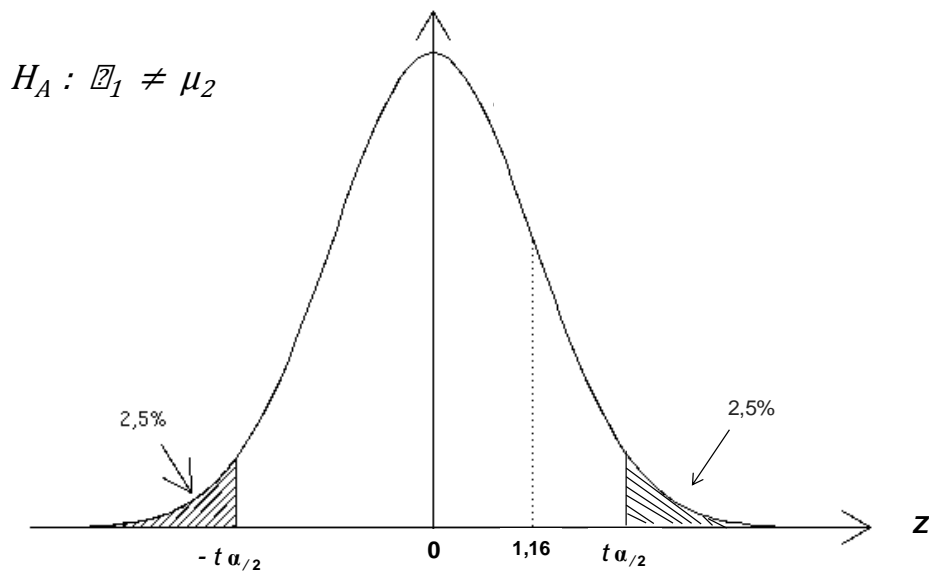
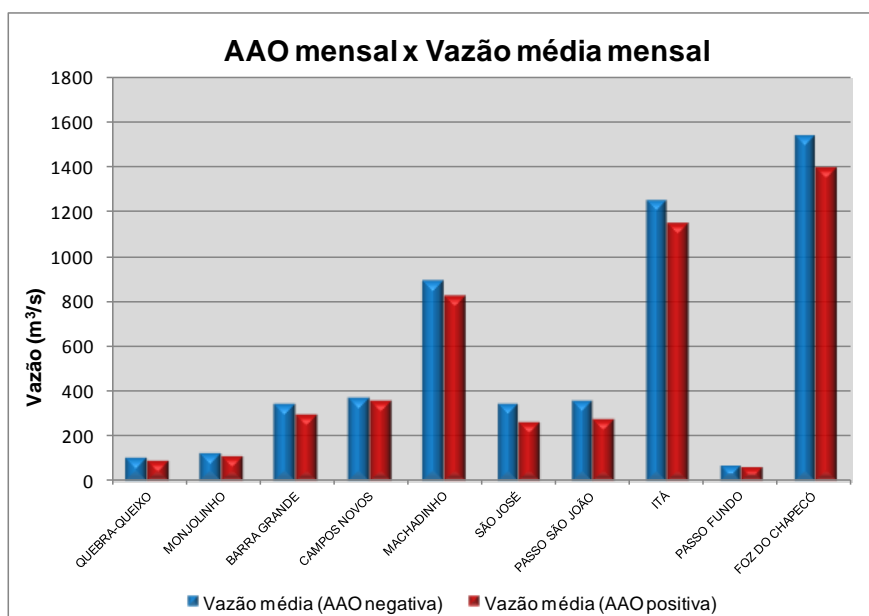


Figura 3.2 - Regiões de rejeição assumindo que  $\alpha = 0,05$  e  $\alpha/2 = 0,025$ .

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Fases da AAO e relações com as vazões

Ao relacionar as fases da AAO com as vazões dos referidos rios situados na bacia do rio Uruguai, os resultados mostraram que, durante a fase negativa, as vazões médias em todos os dez postos de medição apresentaram-se mais elevadas quando comparadas com as vazões médias observadas durante a fase positiva (**Figura 4.1**). Os limiares para se determinar se as diferenças são estatisticamente significativas, neste caso, são:  $-t_{\alpha/2} = -2,009$  e  $t_{\alpha/2} = +2,009$ .



**Figura 4.1** – Vazões médias mensais observadas durante as fases da AAO, para todos os dez postos. Nota-se que todos os postos apresentaram vazões médias mais elevadas durante a fase negativa.

O teste estatístico aplicado não conseguiu rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ) de que as vazões médias durante a fase negativa e as vazões médias durante a fase positiva, em todos os dez postos, sejam iguais, pois os valores da estatística de teste  $Z$  referentes a cada um dos dez postos situaram-se no intervalo entre  $-2,009$  e  $+2,009$  (**Tabela 3**). Para isto ocorrer e configurar uma situação em que as diferenças se mostrassem estatisticamente significativas, ou seja, considerar a hipótese alternativa ( $H_A$ ) como verdadeira, o valor de  $Z$  deveria ser inferior ao valor de  $-2,009$  ou superior ao valor de  $+2,009$ . Os valores de  $Z$  de cada um dos postos variaram entre o valor mais baixo de

0,187 (posto de Campos Novos) e o valor mais alto de 1,621 (posto de Passo São João). Com relação aos valores de vazões médias observados em cada posto nas diferentes fases da AAO, a menor diferença entre cada fase da AAO foi notada justamente no posto de Campos Novos (368,4 na fase negativa e 356,3 na fase positiva) e a maior diferença proporcional foi constatada no posto de Passo São João (358,8 na fase negativa e 273,9 na fase positiva). O posto de Foz do Chapecó também revelou uma grande diferença, porém o valor de Z mostrou-se muito baixo. Isto se deve ao fato de que o valor de Z não depende somente dos valores de vazões médias observados nas fases opostas da AAO (como mostra a equação descrita na metodologia), mas também dos valores dos desvios-padrão verificados na série, de modo que um desvio-padrão alto, que indica uma grande variabilidade entre os valores da série, influencia significativamente o valor de Z. Nota-se que o posto de Foz do Chapecó apresenta, na fase positiva, um desvio-padrão mais elevado do que a própria média de vazão nesta fase. Isto também ocorre em outros postos que, não coincidentemente, revelam baixos valores de Z.

**Tabela 3** – Vazão média, desvio-padrão ( $\sigma$ ) e estatística de teste (Z) para os dez postos de medição estudados neste trabalho.

Posto	AAO Negativa $n_1 = 52$		AAO Positiva $n_2 = 58$		Z
	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$	
Quebra-Queixo	106,6	68,6	92,4	92,9	<b>0,917</b>
Monjolinho	126,7	99	108,9	115,6	<b>0,871</b>
Barra Grande	341,3	214,2	298,7	292,2	<b>0,878</b>
Campos Novos	368,4	243	356,3	419,8	<b>0,187</b>
Machadinho	890,4	556,5	823,9	876,6	<b>0,480</b>
São José	346,6	303	264	229,8	<b>1,597</b>
Passo São João	358,8	303,1	273,9	238,1	<b>1,621</b>
Itá	1247,4	797,6	1147,8	1227,1	<b>0,509</b>
Passo Fundo	72,3	49	60	62,3	<b>1,160</b>
Foz do Chapecó	1538,1	1017,5	1393,6	1482,8	<b>0,601</b>

Embora o teste estatístico aplicado não tenha considerado as diferenças estatisticamente significativas entre as vazões médias observadas durante cada distinta fase da AAO, deve-se ressaltar o fato de que todos os dez postos de medição apresentaram vazões médias mais elevadas durante a fase negativa.



## 4.2. Influência da AAO nas variações mensais das vazões

As relações entre as vazões dos rios na área de estudo e a AAO também foram investigadas neste trabalho. Foi calculada uma média mensal de vazão para cada mês do ano considerando toda a série de 30 anos entre 1979-2008. Desta forma, gerou-se a **Tabela 4** que mostra os valores médios de vazão em cada posto para cada mês do ano.

**Tabela 4** – Valores médios de vazão (m<sup>3</sup>/s) nas fases negativa (azul) e positiva (vermelho) da AAO, considerando a série de 30 anos entre 1979-2008.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
QUEBRA QUEIXO	77,6	74,5	76	82,5	131,4	139,2	94,6	54,6	139,2	140	151	85,3
	103	50	39	190,5	66,1	76	164,2	71,6	80,5	174	61,5	65,1
MONJOLINHO	53,6	51,2	47	66,2	165,6	192,1	131	100,6	146,5	175,5	213	96,1
	116	44	10	183,5	43,7	89,6	254,8	128	101,1	167,2	46	80,9
BARRA GRANDE	229	239,5	154,3	210,5	427,8	379,6	399,6	296	524	390,5	418,7	297,6
	232	216	108	337,5	149,4	213,1	691,5	318,6	324	528	156	177,5
CAMPOS NOVOS	256	234,5	275	210,7	368	438,2	358,3	250	642,5	460,5	541,2	313,6
	377	291	191	540,5	187,8	216,5	753	226	368,1	720,5	196,5	217,3
MACHADINHO	573	562	523	525,5	998,2	1034,1	953,3	692	1470,2	1076	1265	752,3
	741	618	352	1158	430,8	555,1	1818,2	683,3	856,7	1575,2	444,5	499,5
SÃO JOSÉ	193,6	190	121,6	217,2	536	451,3	335,6	147	236,7	765,5	578,7	318,6
	167	151	47	286,5	108,2	208,5	465,4	380,3	332,5	463	179,5	226,3
P. S. JOÃO	197,6	193	126,3	223,7	537,8	478,3	344,5	152,6	245,5	795	606,7	330,3
	173	157	48	290	111,5	216,3	481	403,3	344,5	479,7	187,5	235,7
ITÁ	763,6	728,5	712	771,7	1385,6	1497,7	1305,3	977,3	1992,7	1566,5	1845,7	1046,1
	960	785	458	1677,5	618,4	811,6	2526	944,6	1194	2256,7	652	686,7
PASSO FUNDO	35,3	33,2	34,6	41,5	91,6	104,6	75,8	57,6	80,2	98	114,2	59,5
	45	28	9	74	27,2	54,8	143,7	57	60,4	106,5	20,5	42,1
FOZ DO CHAPECÓ	898	863,5	842,3	930,2	1761,2	1950	1573	1188	2330	1868	2403	1252,1
	1253	916	506	2007	725,8	1012,6	3062,2	1162	1433,7	2695	784	864,1

Os resultados revelam que, na maioria dos meses, a média das vazões apresentou-se maior nos casos de AAO negativa com 7 a 8 meses de um total de 12 onde a maior vazão ocorreu nesta fase. Quebra-Queixo apresentou vazão mais elevada na fase negativa em 7 dos 12 meses; Monjolinho em 8 dos 12 meses; Barra Grande em 7; Campos Novos em 7; Machadinho em 7; São José em 8; Passo São João em 8; Itá em 7; Passo Fundo em 8 e Foz do Chapecó em 7.

Em todos os postos, os meses de março, maio, junho, novembro e dezembro mostraram médias de vazões mais elevadas na fase negativa da AAO, enquanto os meses de abril e julho revelaram médias de vazões mais elevadas na fase positiva. Nos demais meses (janeiro, fevereiro, agosto, setembro e outubro), não houve casos em que todos os postos apresentaram ou média de vazão maior na fase negativa ou maior na fase positiva, mas vale mencionar que o mês de janeiro apresentou maior vazão na AAO positiva em 8 de 10 postos e o mês de setembro também apresentou maior vazão em 8 de 10 postos, porém na AAO negativa.

Nos meses de novembro e dezembro, principalmente no primeiro, registra-se a maior diferença entre as vazões médias observadas na fase negativa e na fase positiva, para todos os dez postos, sugerindo intensa atividade da AAO nesta época do ano, como ressalta Vasconcellos e Cavalcanti (2010b) que apontaram o final da primavera como o período mais ativo desta oscilação. No mês de novembro, na fase negativa, geralmente se observa a maior vazão do ano nestes postos. Por outro lado, neste mesmo mês, observam-se vazões baixas durante a fase positiva. Inclusive, a vazão média de novembro na fase positiva acaba sendo inferior a vazão média em outros meses nesta mesma fase. É possível que isto indique uma intensa manifestação da AAO em novembro, mas não apenas na fase negativa como já foi mencionado, como também na fase positiva. A atividade da AAO na fase negativa parece favorecer a ocorrência de mais precipitação, e conseqüentemente maiores vazões, numa época do ano já chuvosa, intensificando a natureza daquela estação do ano. Porém, isto parece não ocorrer quando da fase positiva, pois mesmo se tratando de uma estação chuvosa, parece que a esta fase da AAO contribui para uma diminuição do volume de precipitação na região.

### **4.3. Relações entre a AAO, movimento vertical e precipitação**

Considerando que a vazão de um determinado rio depende de muitos fatores (Wisler & Brater, 1964; Tucci, 2007), considerou-se ao menos alguns deles para a discussão dos resultados acerca das relações entre a AAO e vazões. Segundo estes autores, são inúmeros os fatores que determinam e influenciam a vazão de um rio. Estes fatores são divididos em dois grupos bem distintos, de forma que um deles depende do clima, notadamente no que se refere à precipitação, enquanto o outro depende essencialmente das características físicas da bacia de drenagem estudada. O primeiro grupo depende dos seguintes fatores: tipo de precipitação, intensidade da precipitação, duração da precipitação, distribuição da precipitação sobre a bacia, direção do deslocamento da chuva, precipitação antecedente, umidade do solo e condições climáticas que interferem na evaporação e na transpiração. A influência do segundo grupo é determinada pelas características físicas da bacia, a saber: uso do solo, tipo de solo, área e forma da bacia, altitude, declividade, geomorfologia e extensão da drenagem indireta.

A precipitação é a fonte de todas as vazões e, desta forma, é o mais importante de todos os fatores climáticos que influenciam a vazão e que determinam a sua intensidade (Wisler & Blaster, 1964). Outros fatores, como temperatura, ventos, umidade relativa e pressão atmosférica também contribuem para determinar o clima de uma região e influem também sobre a vazão de um rio, porém de forma indireta, de modo que suas contribuições agregam-se para determinar o volume de precipitação sobre uma bacia que será convertido para outras finalidades que não seja a vazão de um rio, como a evaporação e a transpiração da vegetação. No fim, embora a vazão ocorra em resposta à chuva sobre uma bacia, nem toda a precipitação sobre a bacia será convertida em vazão, sendo uma parte utilizada para os fins citados anteriormente. Para determinar uma equação simples com a finalidade de calcular a vazão de um rio ou de uma bacia, deve-se considerar que esta equação tem de ser expressa em função de todas as variáveis citadas, uma vez que todas influenciam no resultado final.

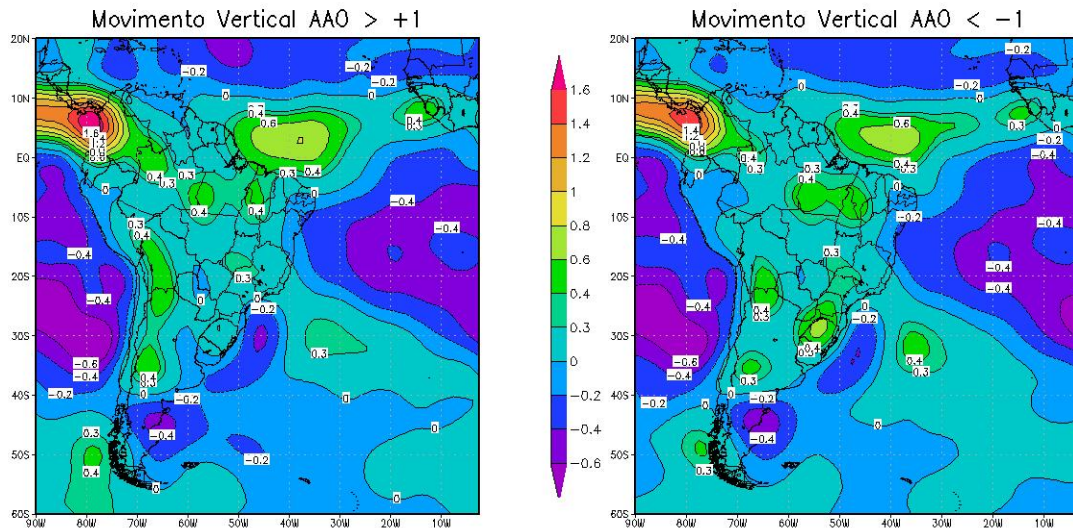
De acordo com Tucci (2007), uma bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico de captação natural da água da precipitação onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando

como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados profundamente. No trajeto em direção à superfície terrestre a precipitação já sofre evaporação, sendo que em algumas regiões esta evaporação pode ser significativa havendo casos em que pode ser totalmente evaporada antes de chegar à superfície. Caindo sobre um solo com cobertura vegetal, parte do volume precipitado sofre interceptação em folhas e caules, de onde evapora. Excedendo a capacidade de armazenar água na superfície dos vegetais, ou por ação dos ventos, a água interceptada pode cair, como precipitação, para o solo.

Sabendo-se que a vazão de um rio ou de uma bacia hidrográfica depende de diversos fatores e o cálculo para se obter corretamente as taxas de vazões de rios depende da contribuição de cada um destes fatores em uma equação extremamente complexa, decidiu-se estudar e analisar a precipitação sobre a área de estudo que, como foi mencionado, é a fonte da vazão de um rio e, por isso, o fator climático mais decisivo. Porém, foi estudado inicialmente o movimento vertical que é importante e caracteriza-se por um fator atmosférico de grande relevância por ocasionar movimentos ascendentes que induzem a formação de nuvens e, conseqüentemente, chuva, ou movimentos subsidentes que inibem a formação de chuva.

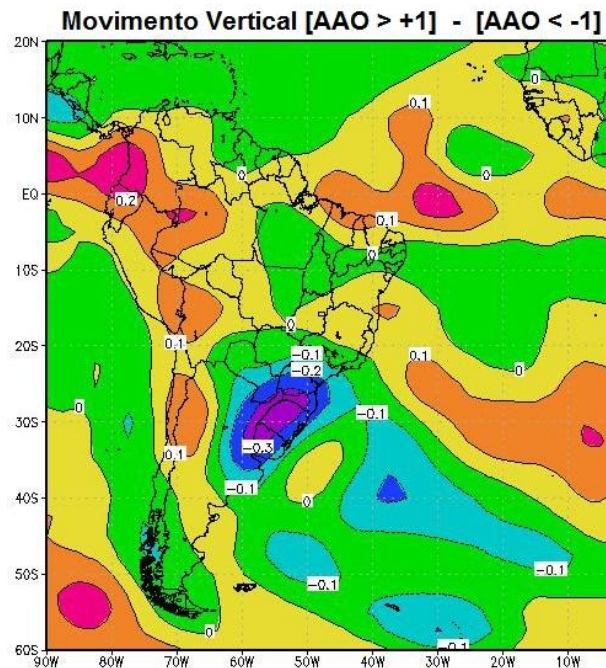
Primeiramente, obtiveram-se, através das Reanálises do NCEP/NCAR (Kalnay, *et al.*, 1996), dados mensais de movimento vertical em 500 hPa através da variável ômega ( $\omega = Dp/Dt$ ) dada em Pa/s convertida para velocidade vertical (dado em cm/s) por meio da equação  $\omega = -\rho g w$  que, por sua vez, é obtida aplicando a aproximação hidrostática na definição da variável  $\omega$ . Para a análise das relações entre o movimento vertical e a AAO, foram selecionados os meses em que a AAO esteve na fase negativa ( $< -1$ ) e as médias mensais para o movimento vertical correspondentes a estes meses. O mesmo procedimento foi realizado para a fase positiva. Utilizou-se o *software Grid Analysis and Display System (GrADS)* para gerar campos médios de movimento vertical quando a AAO  $< -1$ ; campos médios de movimento vertical quando a AAO  $> +1$  assim como os campos da diferença do movimento vertical nos casos em que a AAO  $> +1$  e AAO  $< -1$ . A **Figura 4.2** mostra o movimento vertical médio em 500 hPa durante a fase negativa e a fase positiva da AAO. Notam-se valores entre 0,4 e 0,8 cm/s na região da bacia do rio Uruguai durante a fase negativa da AAO, sugerindo movimento ascendente, que contribuiria para a formação de nuvens e precipitação. Na fase positiva, a relação

mostra o registro de valores entre 0 e 0,3 cm/s na área de estudo, portanto valores inferiores àqueles verificados durante a fase negativa. Estes valores também sugerem movimento vertical ascendente que favorece a ocorrência de precipitação, porém menos intenso do que o observado na fase negativa.



**Figura 4.2** – Campos médios de movimento vertical em 500 hPa para as fases positiva (esquerda) e negativa (direita) da AAO. Unidade: cm/s. Modificado de Santos & Franco (2010).

Tendo em vista as diferenças apresentadas, em ambos os mapas, para as distintas fases da AAO, gerou-se um terceiro mapa que mostra a diferença no movimento vertical entre a fase positiva e a fase negativa. Os resultados mostram valores entre  $-0,2$  e  $-0,3$  cm/s na área de estudo (áreas roxa e azul marinho), confirmando a presença de movimento vertical ascendente mais intenso na fase negativa da AAO do que na fase positiva, apresentando maiores diferenças em todo o oeste do estado do RS e do estado de SC (área roxa), onde se insere quase a totalidade da bacia do rio Uruguai, além de regiões adjacentes como parte do estado do PR, nordeste da Argentina e grande parte do Uruguai (**Figura 4.3**). A área em azul claro também revela movimento vertical ascendente mais intenso na fase negativa.

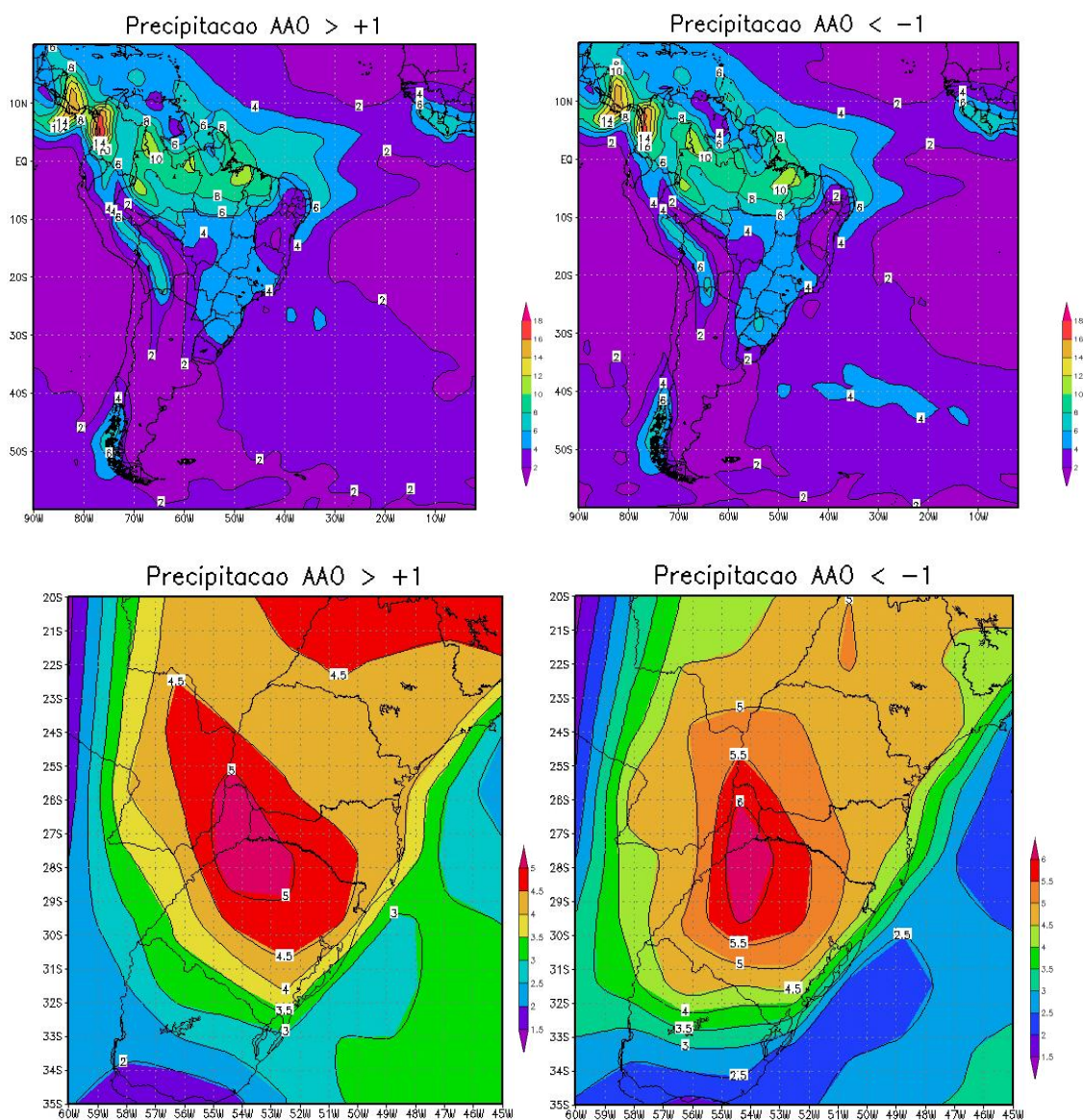


**Figura 4.3** - Diferença entre os campos médios de movimento vertical observados nas fases positiva e negativa da AAO. Unidade: cm/s. Adaptado de Santos & Franco (2010).

Sabendo-se do papel essencial da precipitação como o fator climático mais decisivo que influencia e controla a vazão de um rio (Wisler & Blaster, 1964) e tendo como motivação os resultados obtidos por meio das análises das relações entre a AAO e o movimento vertical, buscou-se verificar o comportamento da precipitação sobre a área de estudo de acordo com as distintas fases da AAO. Esta etapa do trabalho teve como objetivo verificar de que forma as fases opostas da AAO influenciam a precipitação na região, uma vez que as vazões dos referidos rios, foco desta dissertação, depende essencialmente da precipitação, mas sabendo-se de antemão que ela não é a única responsável pelas vazões de rios.

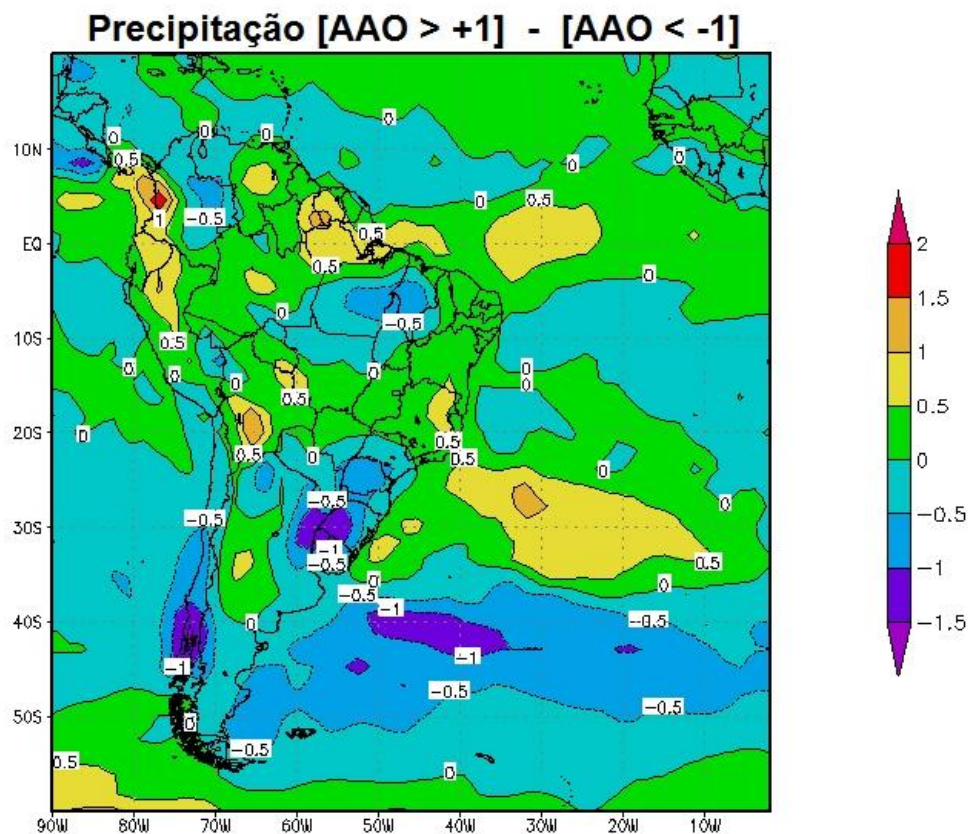
Portanto, para verificar a influência da AAO sobre a precipitação, foram utilizados dados de precipitação das Reanálises 2 do NCEP expressos em mm/dia (Kanamitsu, *et al.*, 2002) empregados com uma resolução horizontal de latitude x longitude = (2,5° x 2,5°) para o período de 30 anos entre janeiro de 1979 e dezembro de 2008. O *software* GrADS foi utilizado para gerar campos médios de precipitação quando  $AAO > +1$ ; campos médios de precipitação quando  $AAO < -1$ ; assim como os campos da diferença da precipitação nos casos em que a  $AAO > +1$  e  $AAO < -1$ . Estes mapas têm como objetivo mostrar possíveis diferenças nos campos médios de

precipitação observados nas fases opostas da AAO. A **Figura 4.4** mostra os campos médios de precipitação para ambas as fases da AAO. Na fase negativa (direita) foram observadas taxas de precipitação entre 4 e 6 mm/dia em praticamente toda a área de estudo, com exceção do noroeste do estado do RS que apresentou taxas um pouco mais elevadas, entre 6 e 8 mm/dia. Durante a fase positiva (esquerda), as taxas de precipitação observadas foram inferiores, variando entre 4 e 6 mm/dia em boa parte da área de estudo, porém apresentando valores reduzidos (entre 2 e 4 mm/dia) no setor sul do estado do RS, onde localiza-se uma porção da bacia do rio Uruguai. Portanto, as taxas médias de precipitação verificadas durante a fase negativa são mais elevadas.



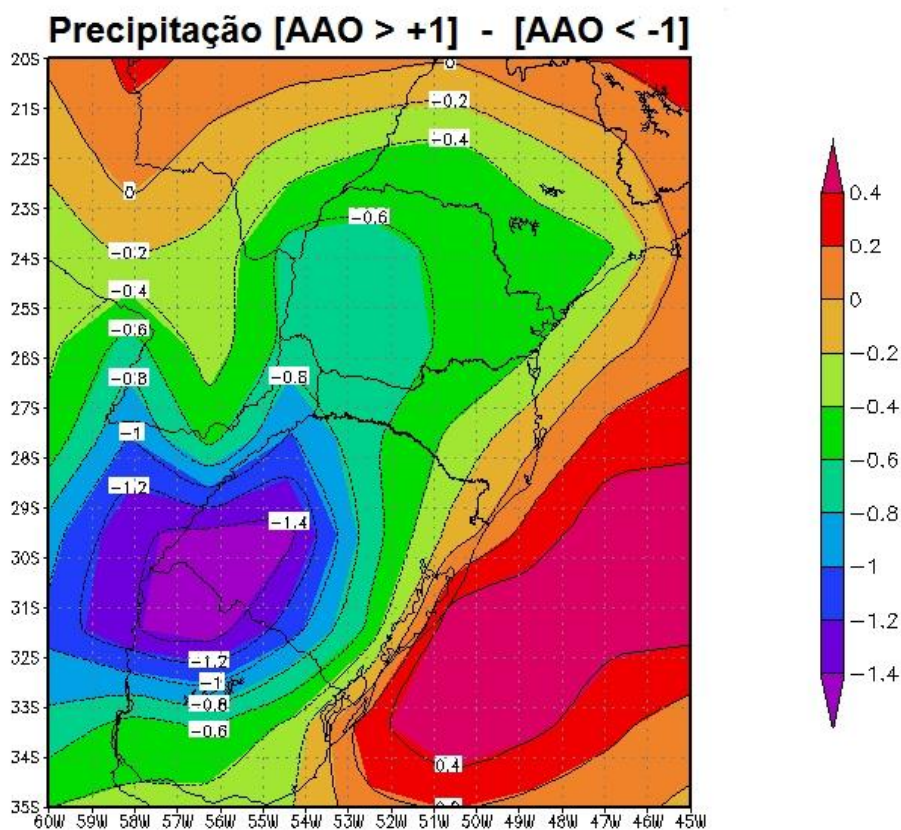
**Figura 4.4** – Campos médios de precipitação para as fases positiva (esquerda) e negativa (direita) da AAO. As figuras inferiores mostram a área de estudo em destaque. Unidade: mm/dia.

As constatações com relação aos regimes de precipitação registrados durante as fases opostas da AAO, onde se notam médias de precipitação mais elevadas durante a fase negativa, motivou a elaboração de um terceiro mapa que mostra a diferença entre os campos médios de precipitação observados na fase positiva e na fase negativa. Os resultados mostram valores entre  $-0,5$  e  $-1,0$  mm/dia na parte central do estado do RS (azul mais forte) e valores oscilando entre  $-1,0$  e  $-1,5$  mm/dia na porção sudoeste deste estado (área roxa) (**Figura 4.5(a) e 4.5(b)**). A área azul clara também apresenta valores inferiores a zero e abrange regiões adjacentes a região Sul do Brasil. Estes valores negativos, principalmente o correspondente a região sudoeste do estado do RS, confirmam a ocorrência de médias de precipitação mais elevadas durante a fase negativa, concordando com os resultados apresentados anteriormente nos mapas de AAO x movimento vertical que sugeriram movimento vertical ascendente mais intenso durante a fase negativa, o que induziria à um aumento da precipitação na região.



**Figura 4.5 (a)** – Diferença entre os campos médios de precipitação observados nas fases positiva e negativa da AAO. Unidade: mm/dia.



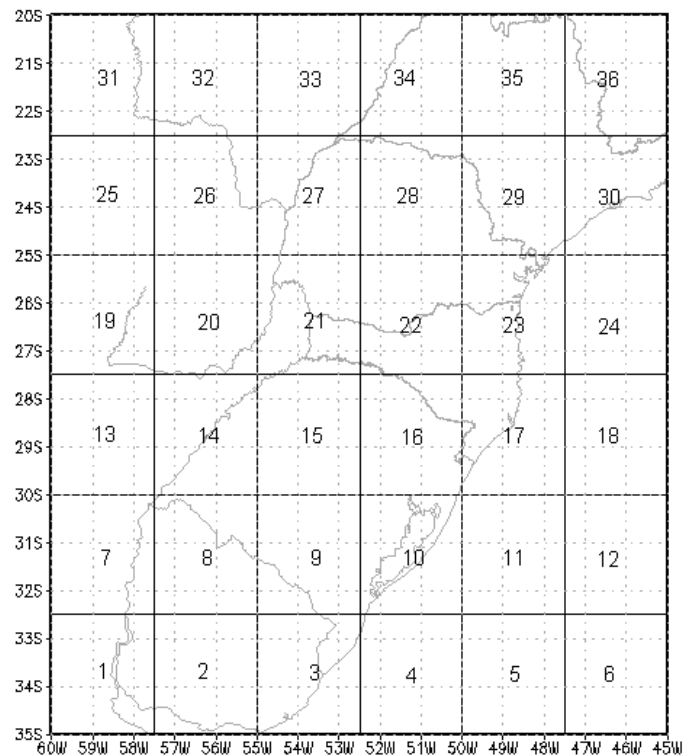


**Figura 4.5 (b)** – Diferença entre os campos médios de precipitação observados nas fases positiva e negativa da AAO com destaque para a área de estudo. Unidade: mm/dia.

Prosseguindo com o objetivo de verificar as relações entre a AAO e a precipitação sobre a região, foram obtidos dados de precipitação do *CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP)*, com resolução espacial de latitude x longitude = (2,5° x 2,5°) para o mesmo período compreendido entre janeiro de 1979 e dezembro de 2008. As taxas de precipitação são obtidas a partir de cinco tipos de estimativas feitas por satélites (*GPI, OPI, SSM/I SCATTERING, SSM/I EMISSION e MSU*). Este conjunto de dados consiste em taxas médias de precipitação expressas em mm/dia. Os valores foram obtidos para um total de 36 pontos de grade compreendendo uma área entre as coordenadas (20°-35° S; 45°-60° W) que abrange além da região Sul do Brasil (**Figura 4.6**).

Para relacionar os dados de precipitação média para cada ponto com as distintas fases da AAO, calculou-se a média das precipitações na fase negativa e também na fase positiva da AAO. Portanto, obtiveram-se, para cada um dos 36 pontos de grade, duas médias de precipitação: uma relativa à fase negativa e outra referente à fase positiva.

Neste caso, o teste estatístico descrito na metodologia foi aplicado para verificar se as diferenças entre estas duas médias eram consideradas estatisticamente significativas. O objetivo desta análise foi relacionar a AAO com a precipitação utilizando dados de origem diferente do que já foi empregado, ou seja, dados que não eram das Reanálises 2 do NCEP.

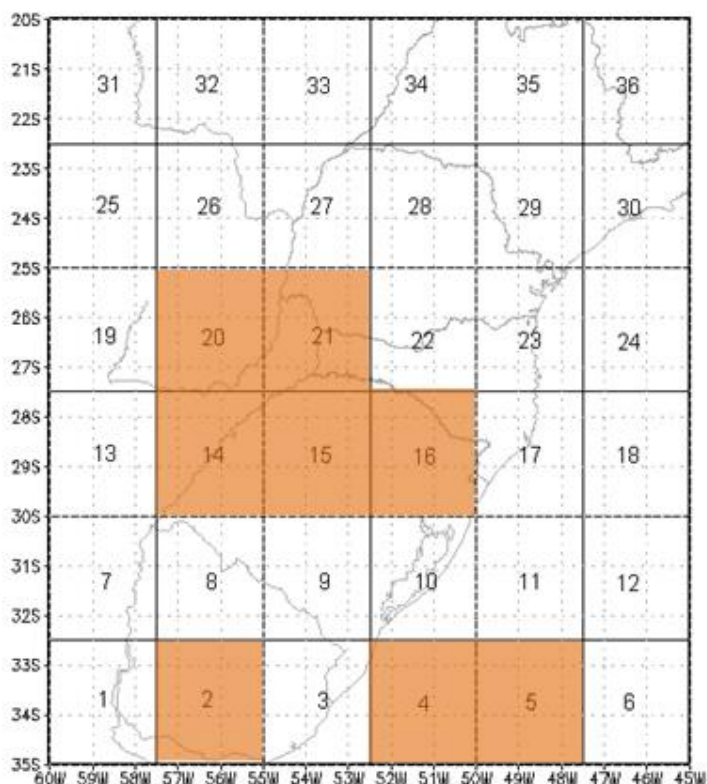


**Figura 4.6** – Área de estudo exibindo os pontos de grade.

Na análise das relações entre as fases da AAO e a precipitação média verificada, os resultados indicam que, dos 36 pontos analisados, praticamente todos apresentaram taxas médias de precipitação mais elevadas durante a fase negativa da AAO, com exceção de três pontos (pontos 23, 35 e 36) que apresentaram taxa de precipitação mais elevada durante a fase positiva. Estes três pontos abrangem todo o litoral do estado do PR e litoral norte do estado de SC (ponto 23), centro-norte do estado de SP (ponto 35) e nordeste do estado de SP e sudoeste e parte do sul do estado de MG (ponto 36). Os outros 33 pontos apresentaram precipitação média mais elevada durante a fase negativa.

O teste estatístico considerou as diferenças observadas entre a precipitação média durante a fase negativa e durante a fase positiva, estatisticamente significativas

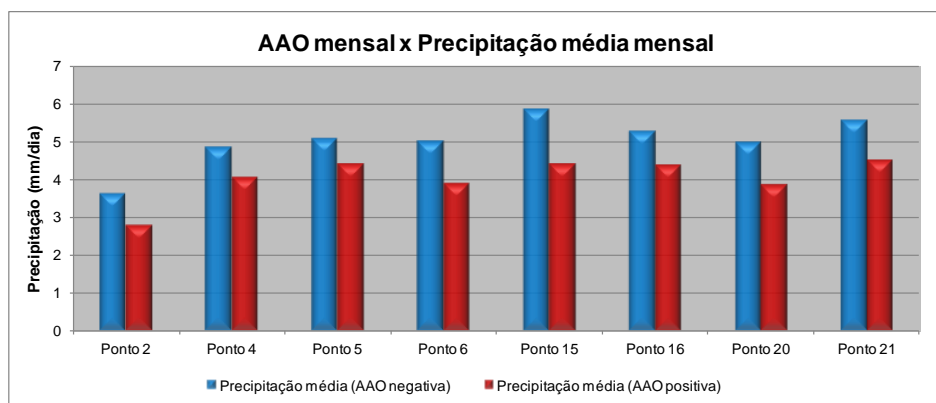
para 8 dos 36 pontos (**Figuras 4.7**), a saber: centro-sul do Uruguai (ponto 2), Oceano Atlântico Sul adjacente à costa do Uruguai (pontos 4 e 5), oeste, centro-norte e nordeste do estado do RS (pontos 14, 15 e 16), parte do Paraguai (ponto 20) e leste do estado de SC, sudoeste do estado do PR e pequeno trecho do nordeste da Argentina (ponto 21).



**Figura 4.7** – Área de estudo mostrando os pontos de grade, em laranja, que são os que apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre a precipitação média observada nas fases negativa e positiva da AAO.

A **Figura 4.8** mostra a comparação entre a precipitação média observada nas fases opostas da AAO, em cada um dos oito pontos que revelaram diferenças estatisticamente significativas. Neste gráfico, fica evidente que a precipitação é mais elevada sempre durante a fase negativa. Através da **Tabela 5**, observa-se que o ponto 15 e o ponto 21 são, dentre todos os pontos, os que apresentaram médias mais elevadas na fase negativa, com 5,82 mm/dia e 5,55 mm/dia, respectivamente. Na fase positiva, a precipitação foi mais elevada no ponto 21 (4,46 mm/dia) seguido do ponto 15 (4,37 mm/dia). Observou-se também que o valor de Z do ponto 15 é o mais elevado (3,207) seguido do ponto 20 que apresentou valor de Z de 2,591, o que demonstra a diferença significativa entre as distintas fases da AAO. Pode-se concluir que os pontos 15 e 21 são

os que registraram a precipitação média mais elevada, tanto na fase positiva como na fase negativa, além de revelarem altos valores de Z.



**Figura 4.8** - Precipitação média observada durante as fases da AAO nos pontos que apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

**Tabela 5** – Precipitação média, desvio-padrão ( $\sigma$ ) e estatística de teste (Z) para os oito pontos que apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Ponto de Grade	AAO Negativa $n_1 = 52$		AAO Positiva $n_2 = 58$		Z
	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$	
Ponto 2	3,59	2,08	2,78	1,98	<b>2,085</b>
Ponto 4	4,83	1,73	4,03	1,70	<b>2,418</b>
Ponto 5	5,05	1,50	4,37	1,74	<b>2,180</b>
Ponto 6	5,01	1,84	3,85	1,86	<b>2,378</b>
Ponto 15	5,82	2,37	4,37	2,36	<b>3,207</b>
Ponto 16	5,24	1,81	4,35	2,30	<b>2,279</b>
Ponto 20	4,96	2,43	3,83	2,08	<b>2,591</b>
Ponto 21	5,55	2,78	4,46	2,57	<b>2,121</b>

#### 4.4. Influência dos eventos ENOS sobre a precipitação

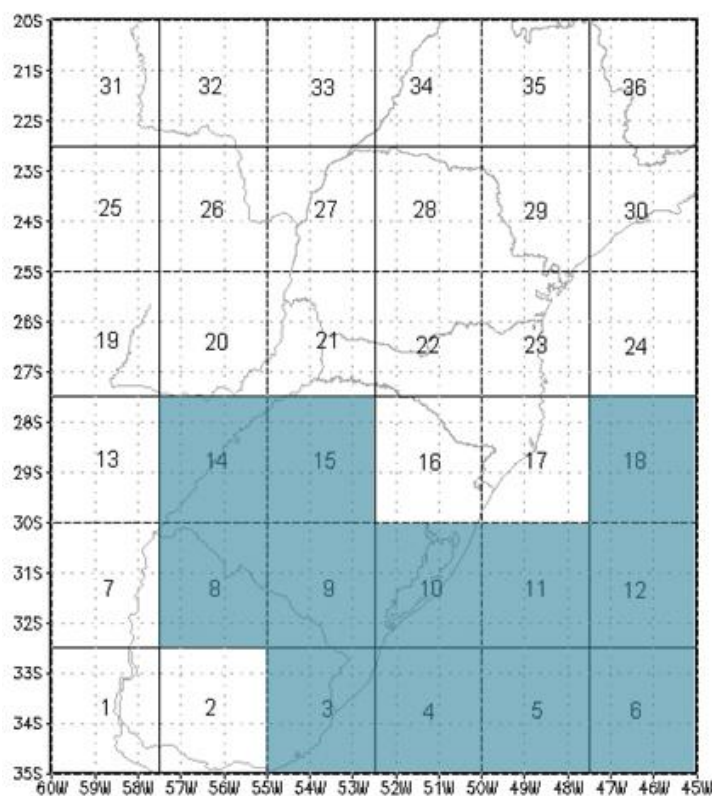
Notou-se, a partir destes resultados, certa influência da AAO no regime de precipitação e vazão de rios da região de estudo. Porém, a influência deste padrão de teleconexão não exclui a possibilidade de interferência por parte de outros mecanismos atmosféricos e dinâmicos. A precipitação na região Sul do Brasil e na bacia do rio

Uruguai, inserida nesta região, é influenciada por sistemas frontais e diversos outros fenômenos atmosféricos, como os complexos convectivos de mesoescala e até mesmo a ZCAS, que pode favorecer a ocorrência de precipitação no norte desta região. O ENOS, entretanto, tem sido apontado como a principal fonte de variabilidade climática interanual na região, provocando oscilações interanuais de precipitação e de temperatura (Grimm *et al.*, 1998; Grimm, 2003).

Visando verificar a influência do ENOS na precipitação da região Sul do Brasil e em específico na área da bacia do rio Uruguai, buscou-se analisar as relações do ENOS com a precipitação sobre a região. Portanto, foram utilizados dados mensais do Índice de Oscilação Sul (*Southern Oscillation Index* – SOI) para o intervalo de 30 anos entre janeiro de 1979 e dezembro de 2008, disponíveis no site do CPC/NCEP. Este índice mede flutuações de grande escala de pressão atmosférica que ocorre entre os setores leste e oeste do Pacífico Tropical (PT) durante episódios El Niño e La Niña. Tradicionalmente, este índice é calculado baseado nas diferenças das anomalias de pressão atmosférica normalizadas entre o Taiti, na Polinésia e Darwin, na Austrália. A fase negativa do índice (El Niño) é representada por anomalias (+) de pressão na Indonésia, em Darwin e no setor oeste do PT bem como anomalias (-) no Taiti e no setor leste do PT. Por outro lado, a fase positiva (La Niña) é caracterizada por anomalias (+) de pressão no Taiti e no setor leste do PT, assim como anomalias (-) sobre a Indonésia, Darwin e setor oeste do PT. Períodos prolongados com valores negativos do índice estão associados com condições anormalmente quentes da TSM ao longo do setor leste do PT, configurando-se um episódio típico de El Niño. Em contrapartida, longos períodos apresentando valores positivos do índice coincidem com condições anormalmente frias da TSM ao longo do setor leste do PT. Os dados de precipitação e os métodos empregados nesta análise foram os mesmos utilizados na análise da relação AAO x precipitação discutida anteriormente. Desta forma, para verificar a relação da precipitação média, para cada ponto, com as fases opostas do ENOS, foram calculadas duas médias de precipitação, uma referente aos episódios El Niño e outra relativa aos episódios La Niña. É importante ressaltar que, neste trabalho, foram considerados episódios El Niño significativos os casos em que foram registrados valores do SOI inferiores a (-1). Da mesma forma, para considerar como episódios La Niña significativos, o SOI deveria situar-se acima de (+1). A partir destas diferentes médias

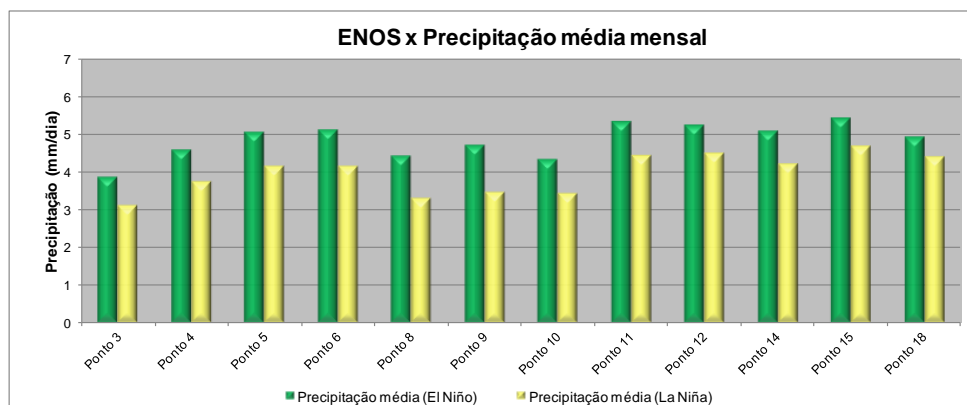
de precipitação, foi empregado o teste estatístico para verificar a significância estatística das diferenças entre estas duas médias de precipitação.

Os resultados das análises realizadas mostraram uma tendência de médias de precipitação mais elevadas quando da ocorrência de episódios El Niño, uma vez que, dos 36 pontos de grade analisados, um total de 28 pontos apresentaram precipitação média mais elevada durante estes episódios. Portanto, em oito pontos a precipitação média foi mais elevada durante episódios La Niña. De acordo com o teste estatístico, destes 36 pontos, doze apresentaram diferenças estatisticamente significativas quando da ocorrência de precipitação mais elevada durante episódios El Niño (**Figura 4.9**), são eles: leste do Uruguai e Oceano Atlântico Sul adjacente à costa uruguaia (pontos 3, 4, 5 e 6), noroeste do Uruguai (ponto 8), sul e sudeste do estado do RS (pontos 9 e 10), Oceano Atlântico Sul próximo à costa do estado do RS (pontos 11 e 12), oeste e centro-norte do estado do RS (pontos 14 e 15) e Oceano Atlântico Sul adjacente à costa dos estados do RS e de SC (ponto 18). Importante mencionar que, entre os oito pontos que apresentaram precipitação média mais elevada em episódios La Niña (pontos 17, 23, 28, 30, 33, 34, 35, 36), nenhum revelou diferenças estatisticamente significativas.



**Figura 4.9** – Área de estudo mostrando os pontos de grade, em azul, que são os que apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre a precipitação média observada nos episódios negativos (El Niño) e nos episódios positivos (La Niña).

A **Figura 4.10** mostra a comparação entre a precipitação média observada nas fases opostas do ENOS, em cada um dos doze pontos que revelaram diferenças estatisticamente significativas. Neste gráfico, fica evidente que a precipitação é mais elevada sempre durante a fase negativa do SOI (episódios El Niño).



**Figura 4.10** – Precipitação média mensal observada durante episódios ENOS nos pontos que apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Analisando os dados da **Tabela 6**, percebe-se que o ponto 15, o ponto 11 e o ponto 12 são os que registraram médias mais elevadas durante episódios El Niño, com taxas de 5,42 mm/dia, 5,35 mm/dia e 5,23 mm/dia, respectivamente. Da mesma forma, durante episódios La Niña, o ponto 15 também foi o que apresentou média mais elevada (4,68 mm/dia), seguido do ponto 12 (4,49 mm/dia) e do ponto 11 (4,44 mm/dia). Entretanto, quanto aos valores de Z, os mais altos referem-se aos pontos 4 (que registrou 4,380), ponto 5 (que apresentou 4,266) e ponto 9 (que revelou 4,216). Isto demonstra a diferença significativa entre as distintas fases do ENOS. Concluiu-se que os pontos 15, 11 e 12 são os que registraram as médias de precipitação mais elevadas, com destaque para o primeiro que registrou médias mais elevada durante o El Niño e também durante a La Niña. Estes resultados concordam com os obtidos quando se relacionou a precipitação com a AAO, pois, neste caso, a precipitação média mais elevada na fase negativa também foi verificada no ponto 15, além de ser o ponto que mostrou o segundo valor mais elevado de precipitação média durante a fase positiva, ficando atrás somente do ponto 21.

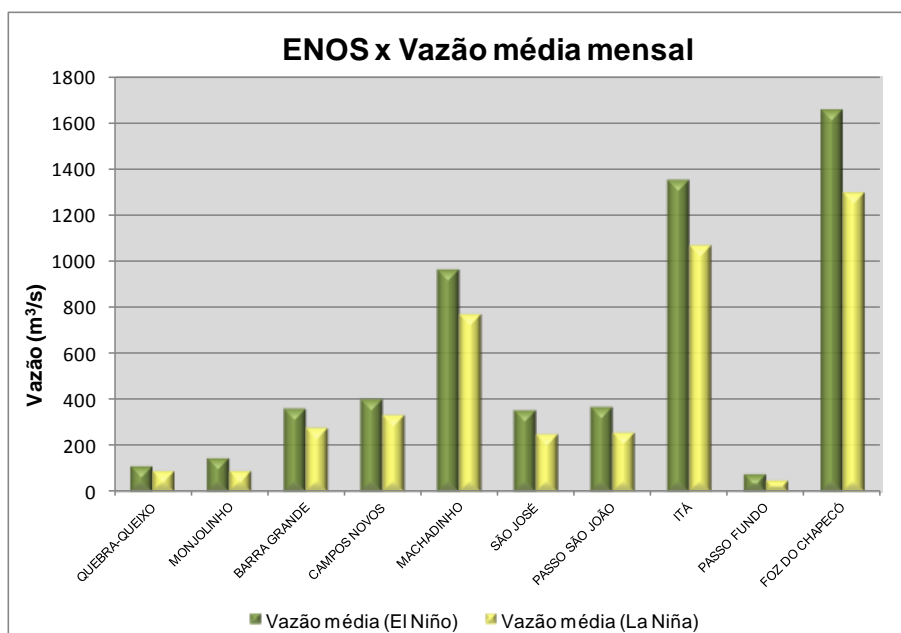
**Tabela 6** – Precipitação média, desvio-padrão ( $\sigma$ ) e estatística de teste ( $Z$ ) para os doze pontos que apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Ponto de Grade	El Niño $n_1 = 94$		La Niña $n_2 = 96$		Z
	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$	
Ponto 3	3,88	2,14	3,10	1,70	<b>2,754</b>
Ponto 4	4,59	1,37	3,75	1,30	<b>4,380</b>
Ponto 5	5,05	1,56	4,14	1,44	<b>4,266</b>
Ponto 6	5,11	1,89	4,13	1,67	<b>3,763</b>
Ponto 8	4,42	2,63	3,30	1,86	<b>3,365</b>
Ponto 9	4,70	2,38	3,45	1,66	<b>4,216</b>
Ponto 10	4,32	1,86	3,43	1,61	<b>3,539</b>
Ponto 11	5,35	1,70	4,44	1,48	<b>3,982</b>
Ponto 12	5,23	1,66	4,49	1,46	<b>3,288</b>
Ponto 14	5,10	2,70	4,20	2,35	<b>2,464</b>
Ponto 15	5,42	2,44	4,68	2,32	<b>2,145</b>
Ponto 18	4,94	1,72	4,40	1,46	<b>2,347</b>

#### 4.5. Fases do ENOS e relações com as vazões

Tendo como motivação os resultados obtidos a partir da análise das relações entre o ENOS e a precipitação, decidiu-se, desta forma, fazer uma análise das relações entre os eventos ENOS e as vazões na bacia do rio Uruguai. Foram utilizados os dados do SOI e os dados de vazão anteriormente descritos na metodologia deste trabalho e, utilizando o mesmo método, aplicou-se o teste estatístico para verificar se as diferenças observadas entre as vazões médias durante episódios El Niño e as vazões médias durante episódios La Niña são estatisticamente significativas ou não. Vale ressaltar que, neste caso, os limiares para se determinar a significância estatística, são:  $-t_{\alpha/2} = -1,984$  e  $t_{\alpha/2} = +1,984$ , uma vez que a distribuição *t-student*, neste caso, possui 93 graus de liberdade. Ao analisar as relações entre o ENOS e as vazões dos referidos rios situados na bacia do rio Uruguai, os resultados mostraram que, durante episódios El Niño, as vazões médias em todos os dez postos de medição sempre se apresentaram mais elevadas quando comparadas com as vazões médias observadas em episódios La Niña (**Figura 4.11**).





**Figura 4.11** – Vazão média observada durante os episódios El Niño (SOI -) e La Niña (SOI +), para todos os dez postos. Todos os dez postos apresentaram vazão média mais elevada durante episódios El Niño.

Analisando estas diferenças através do teste estatístico aplicado, este considerou as diferenças entre as vazões médias durante episódios El Niño e as observadas durante episódios La Niña, estatisticamente significativas para seis dos dez postos, a saber: Monjolinho, Barra Grande, São José, Passo São João, Passo Fundo e Foz do Chapecó. Estes postos apresentaram valores de estatística de teste ( $Z$ ) superiores à  $+ 1,984$  e, assim, permitindo, nestes casos, rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ) e considerar a hipótese alternativa ( $H_A$ ) como verdadeira, cometendo um erro de no máximo 5%. Os outros quatro postos revelaram valores de  $Z$  que se situaram no intervalo entre  $- 1,984$  e  $+ 1,984$ , não sendo significativamente diferentes o comportamento das vazões em fases diferentes do ENOS, são eles: Quebra-Queixo, Campos Novos, Machadinho e Itá (**Tabela 7**). Os valores de  $Z$  de cada um dos postos oscilaram entre o valor mais baixo de 1,393 (Campos Novos) e o valor mais alto de 3,138 (Monjolinho). Com relação às vazões médias constatadas para cada um dos postos nas fases opostas da AAO, observou-se que a menor diferença proporcional foi registrada justamente no posto de Campos Novos (400,86 na fase negativa e 334,42 na fase positiva) enquanto a maior foi notada, não por acaso, no posto de Monjolinho (143,55 na fase negativa e 93,82 na fase positiva), posto para o qual apareceu o maior valor de  $Z$ .

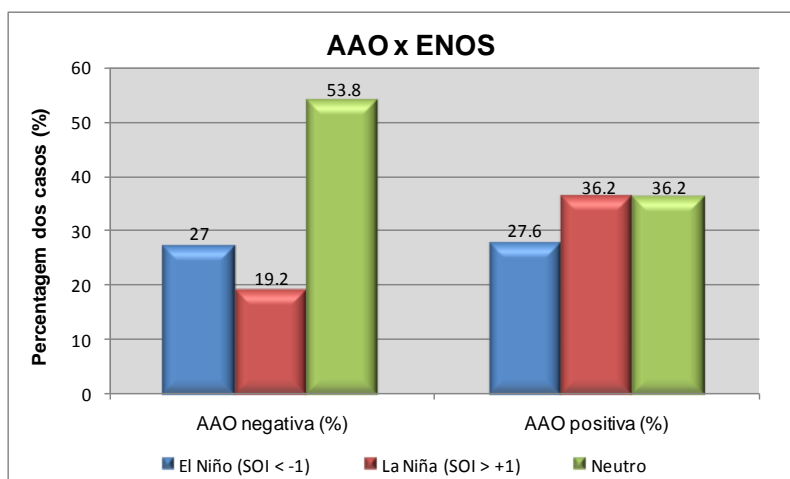
**Tabela 7** – Vazão média, desvio-padrão ( $\sigma$ ) e estatística de teste (Z) para os dez postos de medição estudados neste trabalho.

Posto	El Niño $n_1 = 94$		La Niña $n_2 = 96$		Z
	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$	
Quebra-Queixo	115	94,1	91,9	72,4	<b>1,887</b>
Monjolinho	143,5	132,6	93,8	78,3	<b>3,138</b>
Barra Grande	360	283	276,5	208,2	<b>2,311</b>
Campos Novos	400,8	384,2	334,4	259,4	<b>1,393</b>
Machadinho	957,8	832	765	574,1	<b>1,855</b>
São José	354	279,2	250	228,9	<b>2,804</b>
Passo São João	368	290	260	237,2	<b>2,805</b>
Itá	1346	1192,2	1065	807,1	<b>1,898</b>
Passo Fundo	78	69,4	53	41,6	<b>3,003</b>
Foz do Chapecó	1650	1466,4	1289	972,7	<b>1,995</b>

#### 4.6. Influência combinada entre a AAO e o ENOS

O regime de precipitação na região de estudo e, conseqüentemente, o regime de vazões de rios situados na bacia do rio Uruguai parece ser influenciado, de diferentes formas, pelas distintas fases da AAO. Os eventos ENOS parecem desempenhar um papel decisivo na modulação do clima da região, principalmente no que se refere à sua influência sobre a precipitação. Desta forma, a relação entre a AAO e o ENOS foi investigada com a finalidade de verificar de que forma a ação combinada destes dois padrões de variabilidade climática pode modular o regime de vazões dos rios. Portanto, checou-se a percentagem, em cada uma das fases distintas da AAO, de casos em que ocorre ou episódios El Niño, ou episódios La Niña ou episódios neutros. Nos 52 casos (100%) de ocorrência da fase negativa (AAO < -1), tem-se a ocorrência de 14 casos (27%) de El Niño, 10 casos (19,2%) de La Niña e 28 casos (53,8%) de episódios neutros. Já nos 58 casos (100%) de ocorrência da fase positiva (AAO > +1), foram observados 16 casos (27,6%) de El Niño, e 21 casos (36,2%) tanto de La Niña como de episódios neutros (**Figura 4.12**). Os resultados apontam uma tendência à ocorrência de mais episódios El Niño do que episódios La Niña quando a AAO está em sua fase negativa. Por outro lado, quando a fase da AAO é positiva, episódios La Niña tendem a ocorrer com mais freqüência do que episódios El Niño. Episódios representando as

fases neutras do SOI correspondem à maioria dos casos na fase negativa, aproximadamente 53,8%. Já na fase positiva, os episódios neutros respondem por 36,2%, percentual idêntico ao de ocorrência de episódios La Niña.



**Figura 4.12** – Percentagem dos casos em que ocorreu El Niño, La Niña ou evento Neutro durante as fases negativa e positiva da AAO.

A partir da investigação das relações da AAO e do ENOS com a precipitação e com as vazões dos rios situados na bacia do rio Uruguai, foram encontrados resultados que destacam certa influência de ambos os padrões de variabilidade climática no regime de precipitação e vazão da região, cada qual com sua peculiaridade. Assim surgiu a motivação para analisar a influência da ação combinada da AAO com o ENOS sobre a vazão dos rios, foco central deste trabalho.

Os resultados, divulgados na **Tabela 8**, estão dispostos de forma a seguir uma tendência de valores mais altos para valores mais baixos, da esquerda para a direita. As vazões médias mais elevadas foram registradas, em todos os postos, quando ocorreu influência combinada da fase positiva da AAO com El Niño (aqui representada por AAO+/EN). Estes valores foram superiores aos encontrados quando a influência é apenas do El Niño (EN). Todos os dez postos apresentaram um acréscimo em suas vazões de quase 30%, em média, quando a influência é AAO+/EN em relação à influência apenas de EN. Os resultados, quando se analisou a influência combinada da fase negativa da AAO com La Niña (AAO-/LN), da fase negativa da AAO com El Niño (AAO-/EN) e apenas da fase negativa da AAO (AAO-), são semelhantes. As influências

da fase positiva da AAO (AAO+), assim como da La Niña (LN) estão relacionadas a baixos volumes de vazões em todos os dez postos estudados. Quando se analisou a ação conjunta da fase positiva da AAO com La Niña (AAO+/LN) sobre as vazões, os resultados mostraram valores médios de vazões ainda mais reduzidos (**Tabela 8**). Dentre todas as possíveis ações combinadas, a comparação dos valores mais elevados de vazões médias (que ocorrem quando AAO+/EN) com os valores mais baixos (quando da influencia de AAO+/LN) revela diferenças relevantes, onde são encontrados acréscimos próximos ou superiores a 50% nos volumes de vazão nos casos de AAO+/EN.

**Tabela 8** – Valores de vazões médias (m<sup>3</sup>/s) observados nos dez postos para as possíveis influências combinadas estudadas.

	AAO+/EN	EN	AAO-/LN	AAO-/EN	AAO-	AAO+	LN	AAO+/LN
Quebra-Queixo	136,6	115	110,6	110,8	106,6	92,4	91,9	71,7
Monjolinho	177,9	143,5	127	127,4	126,7	108,9	93,8	77,9
Barra Grande	438	360	350,1	345,5	341,3	298,7	276,5	239,3
Campos Novos	538,9	400,8	409,9	383	368,4	356,3	334,4	281,7
Machadinho	1228,5	957,8	952,7	902,2	890,4	823,9	765	652,5
São José	393	354	291,4	373,2	346,6	264	250	199,5
Passo São João	407,8	368	302,6	390,2	358,8	273,9	260	207,2
Itá	1705,1	1346	1302,8	1249,4	1247,4	1147,8	1065	903,3
Passo Fundo	96,3	78	71,8	70,7	72,3	60	53	45,9
Foz do Chapecó	2070	1650	1585,3	1550,3	1538,1	1393,6	1289	1098

## CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo investigar e analisar as relações entre as fases opostas da AAO e as vazões de rios situados na bacia hidrográfica do rio Uruguai, localizada na região Sul do Brasil. Em função dos resultados encontrados a partir desta análise e considerando que a precipitação é a principal fonte de vazões de rios, decidiu-se investigar também a influência da variabilidade da AAO sobre a precipitação na região de estudo. O regime de precipitação na região Sul do Brasil é influenciado e controlado por diversos fenômenos e mecanismos atmosféricos e dinâmicos, como os sistemas frontais, os CCM e inclusive ZCAS, que pode atuar contribuindo para a ocorrência de chuva no norte da região ou influenciar trazendo períodos de seca. Entretanto, a principal fonte de variabilidade climática interanual na região Sul e no Brasil é o ENOS que representa uma oscilação acoplada oceano-atmosfera que produz alterações na TSM e em diversos outros parâmetros meteorológicos. Para verificar o regime de vazões de alguns rios situados na bacia do rio Uruguai, assim como o regime de precipitação na área de estudo durante as fases negativas e positivas da AAO como também durante as fases opostas do ENOS, foram calculadas médias destes indicadores climáticos para as diferentes fases destas oscilações. Empregou-se um teste para avaliar a significância estatística das diferenças encontradas nas distintas fases de ambos os padrões de variabilidade climática, tanto para o regime de vazões como para o de precipitação. A partir dos resultados obtidos, investigou-se a relação entre a AAO e o ENOS com o objetivo de avaliar a influência acoplada destas oscilações sobre o regime de vazões e de precipitação na bacia do rio Uruguai.

Na análise das relações entre a AAO e as vazões, o teste estatístico não considerou as diferenças entre as médias de vazões, para cada fase oposta da AAO, como significativas. Apesar deste resultado, verificou-se uma tendência a ocorrer médias de vazões mais elevadas (reduzidas) durante a fase negativa (positiva) da AAO, pois todos os 10 postos estudados neste trabalho apresentaram um volume médio de vazão mais elevado durante a fase negativa. O comportamento mensal das vazões, a partir de suas relações com as fases opostas da AAO, parece não apresentar uma tendência muito óbvia: dos 10 postos, nenhum apresentou, em todos os meses do ano, vazões mais elevadas na fase negativa ou na fase positiva. Alguns meses específicos do ano apresentaram vazões mais elevadas na fase negativa em todos os postos, o mesmo

ocorrendo para a fase positiva. Os meses de novembro e dezembro merecem destaque pela grande diferença nos volumes de vazões entre ambas as fases da AAO. Ambos registraram vazões médias muito superiores na fase negativa, principalmente o mês de novembro. Este resultado parece concordar com as investigações feitas por Vasconcellos & Cavalcanti (2010b) que estudaram a manifestação da AAO neste específico mês do ano sugerindo intensa atividade desta oscilação no final da primavera. Sabendo-se da relação entre vazões e precipitação, é importante ressaltar que o mês de novembro já se caracteriza por ser um dos mais chuvosos na região e é possível que este padrão se reflita no comportamento das vazões. Em novembro, sob a influência da fase positiva da AAO, a região registrou valores muito baixos de vazões, muitas vezes inferiores aos observados, também na fase positiva, em diversos outros meses que são caracterizados por serem climatologicamente menos chuvosos. Silvestri & Vera (2003) também observaram que a influência da AAO é mais forte no inverno e no fim da primavera, quando as fases positivas (negativas) da AAO estão associadas a uma diminuição (aumento) da precipitação sobre o sudeste da AS. Thompson & Wallace (2000) observaram, ainda, que a primavera é a estação do ano mais ativa da circulação na baixa estratosfera no HS.

A partir da análise das relações entre a AAO e o movimento vertical médio em 500 hPa, constatou-se a ocorrência de movimento vertical ascendente em ambas as fases, entretanto, na área de estudo, este se apresentou com mais intensidade durante a fase negativa. Através do mapa que exhibe a diferença nos campos médios de movimento vertical em 500 hPa, entre cada fase da AAO, nota-se com clareza a diferença entre a fase negativa e a positiva. Observou-se movimento vertical mais intenso em toda a região da bacia do rio Uruguai, além de regiões adjacentes como o restante da região Sul do Brasil, parte do estado de SP, Uruguai, nordeste da Argentina e parte do Paraguai. Quando se analisou as relações entre a AAO e a precipitação, os mapas exibindo os campos médios de precipitação revelaram a ocorrência de maior volume de chuva durante a fase negativa da AAO, em contraste com chuva reduzida na fase positiva. Aparentemente, esta diferença parece tênue, porém é realçada através do mapa que exhibe os campos médios de precipitação correspondentes à diferença de volume de chuva registrados em cada fase oposta da AAO. Este mapa mostra que, na área de estudo e região adjacente (restante da região Sul, parte do estado de SP, nordeste da Argentina, Uruguai e sudeste da AS), é a fase negativa da AAO que está relacionada

com maior volume de chuva. Estes resultados estão em concordância com as análises de Vasconcellos & Cavalcanti (2010a), que também observaram, sobre o Uruguai e nordeste da Argentina, precipitação anômala positiva na fase negativa da AAO. Considerando que o movimento vertical ascendente do ar contribui para a formação de nuvens favorecendo chuva, os resultados da análise entre a AAO e a precipitação concordam com os obtidos na análise entre a AAO e o movimento vertical, uma vez que, durante a fase negativa (positiva) da AAO, ocorre uma intensificação (enfraquecimento) do movimento vertical ascendente e também volume mais elevado (reduzido) de precipitação sobre a área de estudo e adjacências.

No mapa que exhibe os 36 pontos de grade, 33 pontos apresentaram taxas médias de precipitação mais elevadas na fase negativa da AAO, enquanto apenas três acusaram maior volume de chuva na fase positiva. Quanto aos resultados do teste, oito pontos apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as médias de precipitação. Estes pontos abrangem as seguintes áreas: centro-sul do Uruguai, Oceano Atlântico Sul adjacente à costa do Uruguai, grande área abrangendo o oeste e a metade norte do estado do RS, parte do Paraguai, pequeno trecho do nordeste da Argentina, extremo oeste do estado de SC e sudoeste do estado do PR.

Os resultados, aqui mostrados, das relações entre as fases da AAO e as vazões e a precipitação parecem corroborar com os resultados obtidos por Reboita *et al.* (2009) quando observaram que as trajetórias dos sistemas ciclônicos são influenciadas pela AAO e assim o regime de chuvas sobre a AS também poderá ser alterado. Estes autores detectaram frontogênese mais intensa e anomalias positivas de precipitação sobre o Uruguai e sul do Brasil durante a fase negativa. Na fase positiva, verificaram redução da frontogênese e anomalias negativas de precipitação sobre o sul do Brasil, como mostrados no presente estudo. As relações entre a fase negativa (positiva) da AAO com anomalias positivas (negativas) de precipitação sobre determinadas regiões da AS, incluindo a área de interesse deste trabalho, é explicada por Carvalho *et al.* (2005) na medida em que observaram duas feições zonalmente simétricas, em aproximadamente 45° e 60° S, que pareciam estar relacionadas com os jatos subtropical e polar, respectivamente. Segundo estes autores, a intensificação (enfraquecimento) do jato subtropical de altos níveis assim como o enfraquecimento (intensificação) do jato polar de altos níveis estão relacionados com as fases negativas (positivas) da AAO. A

intensificação e o deslocamento do jato subtropical para o Equador na fase negativa parecem contribuir para a migração de ciclones para o sudeste da AS e sul do Brasil. Como apontou Carvalho *et al.* (2004), o tempo na região subtropical é afetado pela propagação de CE, de modo que o regime de chuvas no sudeste da AS e sul do Brasil pode ser influenciado por estes sistemas.

É possível que a AAO influencie a precipitação e as vazões na região de estudo, porém sabe-se que a região não está sob influência apenas deste padrão de teleconexão. Os eventos ENOS desempenham um importante papel na modulação do clima da região (Grimm *et al.*, 1998) e, a partir deste conhecimento, investigaram-se as relações entre esta oscilação e os regimes de vazão e precipitação da região. Os resultados exibem uma tendência a ocorrer maiores volumes de precipitação durante episódios El Niño, pois dos 36 pontos de grade analisados, 28 registraram médias de precipitação mais elevadas durante episódios El Niño, enquanto 8 pontos revelaram médias mais elevadas durante episódios La Niña. O teste estatístico apontou diferenças significativas entre as médias de precipitação para cada fase distinta do ENOS em 12 dos 36 pontos que abrangem: leste e noroeste do Uruguai e Oceano Atlântico Sul adjacente à costa uruguaia, quase a totalidade do estado do RS com exceção do nordeste, Oceano Atlântico Sul próximo à costa do estado do RS e do estado de SC. A relação entre o ENOS e vazões também mostrou uma tendência a apresentar valores mais elevados (reduzidos) de vazões durante episódios El Niño (La Niña), pois todos os postos apresentaram vazão mais elevada durante episódios El Niño. Ao contrário do ocorrido na relação entre a AAO e vazões, a análise da relação entre o ENOS e vazões registrou diferenças estatisticamente significativas para seis postos.

Ao investigar a frequência em que ocorrem fases opostas do ENOS em cada fase distinta da AAO, foi observada uma tendência a ocorrer mais episódios El Niño (La Niña) do que episódios La Niña (El Niño) quando a AAO está em sua fase negativa (positiva). Os episódios caracterizados como neutros responderam pelo maior percentual de ocorrência, em ambas as fases da AAO. Carvalho *et al.* (2005) realizaram uma investigação similar, onde constataram, durante a análise da variabilidade diária da AAO, um predomínio de valores negativos (positivos) da AAO durante episódios El Niño (La Niña). Para estes autores, esta oscilação apresenta-se mais enfraquecida (intensificada) durante episódios El Niño (La Niña). Da mesma forma, Gong *et al.*



(2010) observaram que as fases negativas da AAO predominam durante o El Niño, enquanto fases positivas predominam durante a La Niña. Marshall & Connolley (2006) mostraram que um aumento da TSM nas altas latitudes do HS provoca aquecimento da atmosfera e, por meio de processos termodinâmicos, ocasiona levantamento do centro de massa da atmosfera e aumento da altura geopotencial, assim gerando mais índices negativos da AAO.

A partir da análise das possíveis influências acopladas entre as fases da AAO e fases do ENOS, os resultados mostraram que o volume mais elevado de vazões, em todos os postos, ocorreu quando da interferência conjunta da AAO+/EN, indicando um volume médio de vazões superior àqueles registrados quando há somente a atuação ou de EN, ou da AAO- e até mesmo da AAO-/EN. A influência da AAO+, da LN e da AAO+/LN são as que apresentaram os três volumes médios de vazões mais baixos em todos os 10 postos, com destaque para o último que registrou valores 50%, em média, mais baixos do que AAO+/EN.

É visível uma tendência de a região da bacia do rio Uruguai apresentar maiores volumes de chuva e de vazões durante a fase negativa da AAO e durante episódios El Niño, em contraste com volumes de chuva e de vazões mais reduzidos na fase positiva e em episódios La Niña. Além disto, o teste estatístico revelou algumas concordâncias em ambas as análises, pois os pontos de grade 4, 5, 14 e 15 foram considerados significativos nas relações entre ambas as oscilações com a precipitação. Estes pontos compreendem a região do Atlântico Sul próximo à costa do Uruguai (4 e 5) e a região centro-norte e oeste do estado do RS (14 e 15), que engloba uma grande porção da bacia do rio Uruguai. Por outro lado, há pontos que apresentaram valores de precipitação mais elevados durante a fase positiva da AAO e durante episódios La Niña, porém representam áreas mais ao norte, nas proximidades da ZCAS, onde ocorre influência de outros mecanismos atmosféricos associados ao aquecimento e a convergência de umidade que tendem a contribuir para provocar mais chuva, principalmente durante o verão (Grimm *et al.*, 1998).

Ademais, sempre que o teste estatístico considerou as diferenças entre as médias estatisticamente significativas, inclusive em regiões que compreendem a bacia do rio Uruguai, isso ocorreu quando as médias analisadas apresentaram valor mais elevado durante a fase negativa da AAO e durante episódios El Niño. De modo geral, as

diferenças nas médias de vazão e de precipitação entre as fases do ENOS se mostraram relativamente maiores do que as diferenças observadas entre as distintas fases da AAO. Talvez isto indique uma influência mais forte do ENOS, em comparação com a AAO, quanto à modulação do regime de chuvas e vazões na área de estudo.

Considerando que inúmeros fatores influenciam a vazão de um rio, mas que a precipitação é a principal fonte de vazão de um rio, e que a contribuição de cada um deles é que determinará o volume de chuva que será revertido em vazão (Wisler & Brater, 1964; Tucci, 2007), pode-se dizer que os resultados acerca da relação entre a AAO e o ENOS e as vazões parecem concordar com os obtidos a respeito da relação entre a AAO e o ENOS e a precipitação. O teste estatístico indicou que, na área de estudo, a diferença entre as influências distintas de cada fase da AAO são significativas no que diz respeito à precipitação. Por outro lado, não foi encontrada significância na diferença entre as médias de vazões de cada fase da AAO. Contudo, isto pode ser explicado pelo fato de a vazão de um rio não ocorrer em resposta exclusivamente da precipitação (Wisler & Brater, 1964; Tucci, 2007) e, embora ela seja a principal fonte, inúmeros são os fatores que influenciam: tanto aspectos físicos da bacia de drenagem, como uso do solo, tipo de solo, declividade e geomorfologia, como fatores climáticos tal como evaporação, transpiração, umidade do solo e precipitação antecedente. Desta forma, apesar de a relação da AAO com a precipitação ser aparentemente direta, conclui-se que este padrão de variabilidade climática estabeleceria uma relação indireta com as vazões de rios.

É possível que a AAO influencie de maneira considerável a precipitação e conseqüentemente as vazões dos rios na bacia do rio Uruguai, tanto através da fase negativa que parece contribuir para maiores volumes de precipitação e de vazões, como por meio da fase positiva que parece favorecer a ocorrência de períodos mais secos acarretando em menores volumes de vazões. Enfatiza-se que outros autores também observaram esta relação da fase negativa (positiva) da AAO com anomalias negativas (positivas) de precipitação sobre alguns setores da AS e outras regiões de latitudes médias do HS (Silvestri & Vera, 2003; Gillett *et al.*, 2006; Hendon *et al.*, 2007; Reboita *et al.*, 2009; Feng *et al.*, 2010; Vasconcellos & Cavalcanti, 2010a), entretanto nenhum deles havia associado este padrão com as variações das vazões numa dada região hidrográfica.

A influência combinada da AAO e do ENOS pode contribuir para provocar volumes de vazões muito elevados na região da bacia do rio Uruguai, mas também pode favorecer a ocorrência de estiagens, que poderá refletir em baixos volumes de vazões. Isto parece ocorrer quando da ação da AAO+, da La Niña e principalmente quando estas duas fases atuam conjuntamente. As informações e os resultados apresentados nesta dissertação de mestrado podem ser extremamente úteis, tanto no que diz respeito a precipitação como a vazão, pois grandes variações nos volumes observados destas variáveis como também oscilações em diversas escalas de tempo podem afetar de forma significativa algumas importantes atividades econômicas da região, principalmente o setor de geração de energia hidroelétrica e o setor agrícola.

Como sugestões para trabalhos futuros, surgem algumas ideias e motivações, como por exemplo:

- 1 – Investigar possíveis relações existentes entre as fases opostas da AAO e a variabilidade da extensão do gelo marinho na região antártica;
- 2 - Analisar relações entre este padrão de variabilidade climática e anomalias de temperatura na Antártica, principalmente na região da Península Antártica, notadamente uma das regiões que se mostrou mais vulnerável ao aquecimento nas últimas décadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em 10/02/2011.

AQUINO, F. E., SETZER, A., SIMÕES, J. C. 2006: Conexões Climáticas entre o Rio Grande do Sul e o Mar de Weddell. *In: Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 14, 2006. A Meteorologia a Serviço da Sociedade. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Meteorologia, p. 1-6.

CAI, W., WHETTON, P. H., KAROLY, D. J. 2003: The Response of the Antarctic Oscillation to Increasing and Stabilized Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Journal of Climate*, 16, 1525-1538.

CARVALHO, L. M. V., JONES, C., LIEBMANN, B. 2004: The South Atlantic Convergence Zone: persistence, intensity, form, extreme precipitation and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate*, 17, 88–108.

CARVALHO, L. M. V., JONES, C., AMBRIZZI, T. 2005: Opposite Phases of the Antarctic Oscillations and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity in the Tropics during the Austral Summer. *Journal of Climate*, 18, 702-718.

CAVALCANTI, I. F. A., FERREIRA, N. J., JUSTI DA SILVA, M. G. A., DIAS, M. A. F. S. 2009: *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 463 p.

CHOI, S. C. 1978: *Introductory Applied Statistics in Science*. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 278 p.

FENG, J., LI, J., LI, Y. 2010: Is There a Relationship between the SAM and Southwest Western Australian Winter Rainfall? *Journal of Climate*, 23, 6082-6088.

FERRON, F. A. 1999: Variações nas Razões de Isótopos Estáveis na Neve e no Gelo da Ilha Rei George, Antártica. Dissertação de Mestrado, IG/UFRGS, 125p.

FLOHN, H. 1987: The Role of Large-Scale Ice Sheets in Climate History. *The Physical Basis of Ice Sheet Modelling*, 231-241 (IAHS Publ. 170).

GILLETT, N. P., THOMPSON, D. W. J. 2003: Simulation of Recent Southern Hemisphere Climate Change. *Science*, 302, 273–275.

GILLETT, N. P., KELL, T. D., JONES, P. D. 2006: Regional Climate Impacts of the Southern Annular Mode. *Geophysical Research Letters*, 33, L23704, doi:10.1029/2006GL027721.

GONG, D., WANG, S. 1998: Antarctic Oscillation: concept and applications. *Chinese Science Bulletin*, Vol. 43, No. 9, 734-738.

GONG, D., WANG, S. 1999: Definition of Antarctic Oscillation Index. *Geophysical Research Letters*, 26, 459–462.

GONG, T., FELDSTEIN, S. B., LUO, D. 2010: The Impact of ENSO on Wave Breaking and Southern Annular Mode Events. *Journal of Atmospheric Sciences*, 67, 2854-2870.

GRIMM, A. M. 2003: The El Niño Impact on the Summer Monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. *Journal of Climate*, 16, 263–280.

GRIMM, A. M., FERRAZ, S. E. T., GOMES, J. 1998: Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 11, 2863-2880.

HALL, A., VISBECK, M. 2002: Synchronous Variability in the Southern Hemisphere Atmosphere, Sea Ice, and Ocean Resulting from the Annular Mode. *Journal of Climate*, 15, 3043–3057.

HARTMANN, D. L., LO, F. 1998: Wave-Driven Zonal Flow Vacillation in the Southern Hemisphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, 55, 1303–1315.

HENDON, H. H., THOMPSON, D. W. J., WHEELER, M. C. 2007: Australian Rainfall and Surface Temperature Variations associated with the Southern Hemisphere Annular Mode. *Journal of Climate*, 20, 2452-2467.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2007: IPCC Fourth Assessment Report: the Polar Perspective ([http://www.sciencepoles.org/index.php?articles/ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_the\\_polar\\_perspective&ds=2&drs=home&uid=897&dlg=en](http://www.sciencepoles.org/index.php?articles/ipcc_fourth_assessment_report_the_polar_perspective&ds=2&drs=home&uid=897&dlg=en)).

JONES, J. M., WIDMANN, M. 2003: Instrument and Tree-Ring-Based Estimates of the Antarctic Oscillation. *Journal of Climate*, 16, 3511–3524.

JONES, J. M. & WIDMANN, M. 2004. Atmospheric Science: Early Peak in Antarctic Oscillation Index. *Nature*, 432, 290-291.

KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R. *et al.* 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin American Meteorological Society*, 77, 437–471.

KANAMITSU, M., W. EBISUZAKI, J. WOOLLEN, S.-K. YANG, J. J. HNILO, M. FIORINO, and G. L. POTTER, 2002: NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin American Meteorological Society*, 83, 1631–1643.

KIDSON, J. W. 1988: Interannual Variations in the Southern Hemisphere Circulation. *Journal of Climate*, 1, 1177–1198.

KING, J. C., TURNER, J. 1997: *Antarctic Meteorology and Climatology*. Cambridge: University Press, 409 p.

KWOK, R., COMISO, J. C. 2002: Spatial Patterns of Variability in Antarctic Surface Temperature: Connections to the Southern Hemisphere Annular Mode and the Southern Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 29, 1705-1708.

LEFEBVRE, W., GOOSSE, H., TIMMERMANN, R., FICHEFET, T. 2004: Influence of the Southern Annular Mode on the Sea Ice–Ocean System. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, C09005, doi:10.1029/2004JC002403.

LIMPASUVAN, V., HARTMANN, D. L. 2000: Wave-Maintained Annular Modes of Climate Variability. *Journal of Climate*, 13, 4414–4429.

MARSHALL, G.J. 2002: Analysis of recent circulation and thermal advection in the northern Antarctic Peninsula, *International Journal of Climatology*, 22, 1557 – 1567.

MARSHALL, G. J. 2003: Trends in the Southern Annular Mode from Observations and Reanalysis, *Journal of Climate*, 16, 4134-4143.

MARSHALL, G. J., CONNOLLEY, W. M. 2006: The effect of changing Southern Hemisphere winter sea surface temperatures on Southern Annular Mode strength, *Geophysical Research Letters*, 33 (17), 4, pp. doi 10.1029/2006GL026627.

MILLER, R. L., SCHMIDT, G. A., SHINDELL, D. T. 2006: Forced Annular Variations in the 20th Century Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Models. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, D18101, doi: 10.1029/2005JD006323.

MURRAY, R. J., SIMMONDS, I. 1991: A Numerical Scheme for Tracking Cyclone Centers from Digital Data. Part I: Development and operation of the scheme. *Aust. Meteor. Mag.*, 39, 155–166.

NAN, S., LI, J. 2003: The Relationship between the Summer Precipitation in the Yangtze River Valley and the Boreal Spring Southern Hemisphere Annular Mode. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 24, 2266.

NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. 1979: Rio de Janeiro, RJ: IBGE/SUPREN. (Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente).

O'SULLIVAN, D., SALBY, M. L. 1990: Coupling of the Quasibiennial Oscillation and the Extratropical Circulation in the Stratosphere through Planetary Wave Transport. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 47, No. 5, 650-673.

PERLWITZ, J., PAWSON, S., FOGT, R. L., NIELSEN, J. E., NEFF, W. D. 2008: Impact of Stratospheric Ozone Hole Recovery on Antarctic Climate. *Geophysical Research Letters*, 35, L08714, doi:10.1029/2008GL033317.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS/MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – Plano Nacional de Recursos Hídricos: documento básico de referência. Brasília: MMA/SRH, 2006, 4 v.

RAO, V. B., CARMO, A. M. C., FRANCHITO, S. H. 2003: Interannual variations of storm tracks in the Southern Hemisphere and their connections with the Antarctic Oscillation. *International Journal of Climatology*, 23, 1537–1545.

REBOITA, M. S., AMBRIZZI, T., ROCHA, R. P. 2009: Relations between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere Atmospheric Systems. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24 (1), 48 - 62.

RENWICK, J. A. 2001: Southern Hemisphere Circulation and Relations with Sea Ice and Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 15, 3058-3068.

ROGERS, J. C., VAN LOON, H. 1982: Spatial Variability of Sea Level Pressure and 500-mb Height Anomalies over the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, v. 110, p. 1375–1392.

SANTOS, I. A., FRANCO, N. J. N. 2010: Uso do Índice Mensal da Oscilação Antártica para Avaliação de algumas interações com a Circulação Troposférica na América do Sul e Oceanos Próximos. *In: Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 16, 2010. A Amazônia e o Clima Global. Belém: Sociedade Brasileira de Meteorologia, p. 1-5.



SCHNEIDER, D. P., STEIG, E. J., COMISO, J. C. 2004: Recent Climate Variability in Antarctica from Satellite-Derived Temperature Data. *Journal of Climate*, 17, 1569–1583.

SCHWERDTFEGER, W. 1984: *Weather and Climate of the Antarctic*. Developments in Atmospheric Science, Vol. 15, Elsevier, 261 pp.

SEN GUPTA, A. S., ENGLAND, M. H. 2006: Coupled Ocean-Atmosphere-Ice Response to Variations in the Southern Annular Mode. *Journal of Climate*, 19, 4457–4486.

SCIENTIFIC COMMITTEE ON ANTARCTIC RESEARCH (SCAR). *Some Antarctic Statistics*. Available in: <<http://www.scar.org>>. Acesso em 15/02/2011.

SHIOTANI, M. 1990: Low-frequency Variations of the Zonal Mean State of the Southern Hemisphere Troposphere. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 68, 461–471.

SILVESTRI, G. E., VERA, C. S. 2003: Antarctic Oscillation Signal on Precipitation Anomalies over Southeastern South America. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 21, 2115-2118.

SILVESTRI, G. E., VERA, C. S. 2009: Nonstationary Impacts of the Southern Annular Mode on Southern Hemisphere Climate. *Journal of Climate*, 22, 6142–6148.

STONE, D. A., WEAVER, A. J., STOUFFER, R. J. 2001: Projection of Climate Change onto Modes of Atmospheric Variability. *Journal of Climate*, 14, 3551–3565.

SUN, J., WANG, H., YUAN, W. 2009: Linkage of the Boreal Spring Antarctic Oscillation to the West African Summer Monsoon. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 88, No. 1, 15-28.

THOMPSON, D. W. J., WALLACE, J. M. 2000: Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month variability. *Journal of Climate*, 13, p. 1000-1016.

THOMPSON, D. W. J., WALLACE, J. M.; HEGERL, G. C. 2000: Annular Modes in the Extratropical Circulation: Part II: Trends. *Journal of Climate*, 13, p. 1018-1036.

THOMPSON, D. W. J., SOLOMON, S. 2002: Interpretation of Recent Southern Hemisphere Climate Change. *Science*, 296, 895–899.

THOMPSON, D. W. J. 2007: Annular Modes Website - *A Brief Introduction to the Annular Modes and Annular Mode Research*. Disponível em: <<http://ao.atmos.colostate.edu>>. Acesso em 10/02/2011.

TUCCI, C. E. M. (org). 2007: *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4a ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH. 943p.

TURNER, J. 2003: The Meteorology and Climatology of the Antarctic Plateau. *Memorie Della Supplementi*, Società Astronomica Italiana, v.2, p. 26-31.

TURNER, J. 2004: The El Niño-Southern Oscillation and Antarctica-Review. *International Journal of Climatology*, 24, 1-31.

TURNER, J., COLWELL, S. R., MARSHALL, G. J. *et al.* 2005: Antarctic Climate Change during the last 50 years. *International Journal of Climatology*, Wiley Interscience, 25, p. 279-294.

VASCONCELLOS, F. C., CAVALCANTI, I. F. A. 2010a: Extreme Precipitation over Southeastern Brazil in the Austral Summer and Relations with the Southern Hemisphere Annular Mode. *Atmospheric Science Letters*, Vol. 11, No. 01, 21-26.

VASCONCELLOS, F. C., CAVALCANTI, I. F. A. 2010b: Relação entre a Oscilação Antártica e a América do Sul, Oceanos Atlântico e Pacífico adjacentes em Novembro. *In: Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 16, 2010. A Amazônia e o Clima Global. Belém: Sociedade Brasileira de Meteorologia, p. 1-5.

WALKER, G. T., 1928: World Weather. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, Vol. 54, No. 226, 79–87.

WALLACE, J., HOBBS, P. 2006: *Atmospheric Science – An Introduction Survey*. Elsevier, 504 p.

WILKS, D. S. 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. International Geophysics Series, Academic Press, Second Edition, Vol. 1, Elsevier, New York, 649 p.

WISLER, C. O., BRATER, E. F., 1964: *Hidrology*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., New York, 484 p.