



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/02.27.17.55-TDI

**SECAS EM REGIÕES DA AMÉRICA DO SUL:
DIAGNÓSTICO DE INTENSIDADE E ANÁLISE DE
PADRÕES CLIMÁTICOS EM OBSERVAÇÕES,
SIMULAÇÕES DO CLIMA PRESENTE E PROJEÇÕES
FUTURAS DE UM MODELO CLIMÁTICO GLOBAL**

Mariah Sousa Gomes

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelas Dras. Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti, e Gabriela Viviana Müller, aprovada em 10 de fevereiro de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/48KJ3US>>

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/02.27.17.55-TDI

**SECAS EM REGIÕES DA AMÉRICA DO SUL:
DIAGNÓSTICO DE INTENSIDADE E ANÁLISE DE
PADRÕES CLIMÁTICOS EM OBSERVAÇÕES,
SIMULAÇÕES DO CLIMA PRESENTE E PROJEÇÕES
FUTURAS DE UM MODELO CLIMÁTICO GLOBAL**

Mariah Sousa Gomes

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelas Dras. Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti, e Gabriela Viviana Müller, aprovada em 10 de fevereiro de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/48KJ3US>>

INPE
São José dos Campos
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Gomes, Mariah Sousa.

G585s Secas em regiões da América do Sul: diagnóstico de intensidade e análise de padrões climáticos em observações, simulações do clima presente e projeções futuras de um modelo climático global / Mariah Sousa Gomes. – São José dos Campos : INPE, 2023.

xxviii + 201 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/02.27.17.55-TDI)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

Orientadoras : Dras. Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti, e Gabriela Viviana Müller.

1. Eventos extremos. 2. Seca. 3. Sistema climático. 4. Índice de precipitação padronizado. 5. HadGEM 3. I.Título.

CDU 551.577.38(8)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE TESE DE MARIAH SOUSA GOMES
BANCA Nº 008/2023, REGISTRO 135909/2018

No dia 10 de fevereiro de 2023, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutora em Meteorologia. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca e revisão final pelo(s) orientador(es).

Novo Título: "Secas em regiões da América do Sul: diagnóstico de intensidade e análise de padrões climáticos em observações, simulações do clima presente e projeções futuras de um modelo climático global"

Observações da banca:

Re-escrever a hipótese e objetivos.

Esclarecer na metodologia o uso da análise de componentes principais (ACP) e cluster, explicar como foi feita a escolha visual das regiões.

Re-escrever a conclusão com os principais resultados, enfatizando a contribuição científica do trabalho em comparação com os resultados encontrados na literatura.

Conectar o texto com as figuras (por exemplo, na descrição de subsidência nas páginas 116, 120).

Membros da Banca:

Dr. Caio Augusto dos Santos Coelho - Presidente - INPE

Dra. Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti - Orientadora - INPE

Dra. Gabriela Viviana Müller - Orientadora - CEVARCAM/CONICET

Dra. Simone Marilene Sievert da Costa Coelho - Membro Interno - INPE

Dra. Michelle Simões Reboita - Membro Externo - UNIFEI

Dra. Simone Erotildes Teleginski Ferraz - Membro Externo - UFSM

Declaração de aprovação da Dra. Gabriela Viviana Müller anexa ao processo.



Documento assinado eletronicamente por **Michelle Simoes Reboita (E), Usuário Externo**, em 15/02/2023, às 18:24 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Simone erotildes teleginski ferraz (E), Usuário Externo**, em 15/02/2023, às 20:55 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Simone Marilene Sievert da Costa Coelho, Pesquisadora**, em 16/02/2023, às 14:54 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Caio Augusto dos Santos Coelho, Pesquisador**, em 27/02/2023, às 14:56 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Iracema Fonseca de albuquerque cavalcanti (E), Usuário Externo**, em 28/02/2023, às 14:13 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **10821931** e o código CRC **6BE13080**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pela presença constante na minha vida, me dando forças para sempre seguir em frente.

A meus pais Aníbal e Méri, pelo amor e apoio incondicional durante todos os anos de estudo, sem vocês eu jamais teria conseguido.

A minha irmã Maiara, pelo carinho e amizade.

Ao meu noivo Renan, pelo amor e apoio.

A minhas orientadoras Dra. Iracema Cavalcanti e Dra. Gabriela Müller pela oportunidade de aprendizado, convívio e pelos conhecimentos transmitidos ao longo do doutorado.

A equipe de Gestão de Energia da Alupar, a Letícia Ferreira, Talyta Souza, Pedro Cabral, Tahigo Alves e Tainá Mota, pelo apoio, amizade e incentivo que me fizeram mais forte nos últimos meses de doutorado.

A minhas colegas e amigas desde o mestrado no INPE, Carolina Araújo, Mylene Cabrera e Renata Eidt, obrigada pela amizade.

Aos membros da banca Dr. Caio Coelho, Dra. Simone Sievert, Dra Simone Ferraz e Dra. Michelle Reboita pelas contribuições.

A CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

RESUMO

Episódios de seca, embora recorrentes no sistema climático, ainda causam graves transtornos do ponto de vista sócio-econômico, afetando o cotidiano da sociedade de forma geral. Muitos desafios são encontrados no meio científico-acadêmico quanto à caracterização e identificação destes fenômenos, sendo por vezes subjetiva devido à variabilidade em suas evoluções temporal e espacial. Desta forma, o objetivo geral deste trabalho é identificar os padrões espaciais de eventos de secas sobre regiões homogêneas da América do Sul, ocorridos entre 1982 e 2019, e realizar uma análise das condições atmosféricas em escala regional e global dos mecanismos e processos físicos associados. O Índice de Precipitação Padronizado (SPI) foi calculado para cada ponto de grade do continente, e após, foi aplicada a Análise de Componentes Principais - Modo S, para obter grupos iniciais com variabilidade de precipitação similar. Posteriormente, foi aplicado o método de Análise de Agrupamento Não-Hierárquico às séries de SPI para os grupos previamente identificados, para determinar as áreas homogêneas. Para cada uma das áreas identificadas foram obtidas séries de SPI, para determinar os períodos de seca e respectiva severidade. Visando discutir os possíveis mecanismos causadores dos eventos, foram analisados os padrões de circulação atmosférica e de outras variáveis atmosféricas e forçante oceânica durante as secas. Eventos secos nas áreas homogêneas identificados em simulações produzidas pelo modelo HadGEM 3, do CMIP6, para o período histórico, foram comparados com os resultados observacionais, com objetivo de analisar a representação das características das secas pelo modelo. Também foram analisadas as projeções climáticas fornecidas pelo mesmo modelo, tendo em vista um dos cenários futuros do CMIP6, identificando desta forma possíveis mudanças na ocorrência de eventos de secas na América do Sul. Foram obtidas 3 áreas homogêneas durante o verão, e 4 nas demais estações do ano. Essas áreas compreendem parte do Brasil Central e Sudeste, Sul do Brasil, Nordeste do Brasil, Amazônia, Uruguai, Nordeste da Argentina, Paraguai e Bolívia. A maior parte dos eventos identificados foi de intensidade moderada, sendo menos frequentes os severos e extremos. Nas áreas tropicais houve maior registro de secas, onde identificou-se também uma tendência nos últimos anos, de aumento da sua frequência, especialmente durante o inverno, durante a estação seca de monção. Verificou-se que os eventos registrados sobre as áreas no norte da América do Sul estiveram associados principalmente ao aquecimento anômalo do Pacífico Tropical Leste, gerando subsidência atípica nessas áreas, sendo potencializadas por aspectos favoráveis de grande escala, como temperaturas superiores à média. Os compostos referentes às secas nas áreas mais a S e SE mostraram a influência de trens de ondas que se propagam do Pacífico Sul até o continente, alterando o regime de circulação

e as chuvas. O enfraquecimento do transporte de umidade da Amazônia para as regiões também esteve associado a estes casos. Os centros anômalos de geopotencial e linhas de corrente em altos níveis (principalmente sobre o continente) e anomalias de precipitação foram bem simulados pelo modelo, mas o padrão anômalo de convecção e TSM não foi bem representado. A principal mudança no futuro é de secas mais intensas, verificadas pelas anomalias de precipitação maiores do que no período histórico. Outras diferenças projetadas para o futuro pelo modelo, dizem respeito às anomalias de temperatura, tanto do continente quanto do oceano, além das diferenças em precipitação. Não foram identificadas diferenças significativas no número de eventos projetados, mas é importante ressaltar que a climatologia considerada é a do clima futuro.

Palavras-chave: Eventos extremos. Seca. Sistema Climático. Índice de Precipitação Padronizado. HadGEM 3. CMIP6.

**DROUGHTS IN SOUTH AMERICAN REGIONS: INTENSITY DIAGNOSIS
AND ANALYSIS OF CLIMATE PATTERNS IN OBSERVATIONS, PRESENT
CLIMATE SIMULATIONS, AND FUTURE PROJECTIONS OF A GLOBAL
CLIMATE MODEL**

ABSTRACT

Drought episodes, although recurrent in the climate system, still cause serious socioeconomic disturbances, affecting the daily lives of society in general. Many challenges are found in the scientific-academic environment regarding the characterization and identification of these phenomena, sometimes being subjective due to the variability in their temporal and spatial evolutions. Thus, the general objective of this work is to identify the spatial patterns of dry events over South America, which occurred between 1982 and 2019, and to perform a regional and global analysis of atmospheric conditions. The Standardized Precipitation Index (SPI) was calculated for each grid point on the continent, and then Principal Component Analysis - Mode S was applied to obtain the initial groups with similar precipitation variability. Subsequently, the Non-Hierarchical Cluster Analysis method was applied to the SPI series, to determine the homogeneous areas for precipitation variability. For each identified areas, SPI series were calculated to determine the periods of drought and their severity. The patterns of atmospheric circulation, SST and dynamic forcing during droughts were analyzed, aiming to discuss the possible related mechanisms. Finally, the simulations for the historical period produced by the CMIP6 HadGEM 3 model were compared with the observed results, in order to verify the droughts representation by the model. The climate projections provided by the same model were analyzed, considering one of the future scenarios of CMIP6, thus identifying possible changes in the occurrence of dry events in South America. Three homogeneous areas were obtained during the summer and four in the other seasons of the year. These areas comprise part of the Center and Southeast of Brazil, South of Brazil, Northeast of Brazil, Amazonia, Uruguay, Northeast of Argentina, Paraguay and Bolivia. Most of the events identified were of moderate intensity, and severe and extreme events being less frequent. In tropical areas there was a greater record of droughts, where a trend was also identified in recent years, towards an increase in their frequency, especially during the winter, the monsoon dry season. It was verified that the events registered over the areas in the north of the SA were mainly associated with the anomalous heating of the Tropical East Pacific, generating atypical subsidence in these areas, being potentiated by higher than average

temperatures. The composites referring to droughts in areas further to the S and SE showed the influence of wave trains propagating from the South Pacific to the continent, changing the circulation and rainfall regime. The moisture transport weakening from the Amazon to the regions was also associated with these cases. The anomalous geopotential centers and streamlines at high level (mainly over the continent) and precipitation anomalies were well simulated by the model, but the anomalous pattern of convection and SST was not well represented. The main differences projected for the future by the model concern to the temperature anomalies, both in the continent and ocean, besides the precipitation differences. No significant differences were identified in the number of projected events, but it is important emphasize that the climatology considered is that of the future climate.

Keywords: Extreme events. Drought. Climate System. Standardized Precipitation Index. HadGEM 3. CMIP6.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Esquematização dos conceitos de seca	6
Figura 4.1 Mapa da área de estudo	25
Figura 4.2 Energia final total demandada (para todos os cenários)	30
Figura 5.1 Primeira componente principal para os meses de Dezembro (a), Janeiro (b) e Fevereiro (c)	43
Figura 5.2 Primeira componente principal para os meses de Março (a), Abril (b) e Maio (c)	44
Figura 5.3 Primeira componente principal para os meses de Junho (a), Julho (b) e Agosto (c)	45
Figura 5.4 Primeira componente principal para os meses de Setembro (a), Outubro (b) e Novembro (c)	46
Figura 5.5 Caracterização espacial dos grupos a partir do agrupamento de áreas homogêneas (AANH) para os meses de Dezembro (a), Janeiro (b) e Fevereiro (c)	47
Figura 5.6 Caracterização espacial dos grupos obtidos a partir do agrupamento de áreas homogêneas (AANH) para os meses de Março (a), Abril (b) e Maio (c)	48
Figura 5.7 Caracterização espacial dos grupos obtidos a partir do agrupamento de áreas homogêneas (AANH) para os meses de Junho (a), Julho (b) e Agosto (c)	49
Figura 5.8 Caracterização espacial dos grupos obtidos a partir do agrupamento de áreas homogêneas (AANH) para os meses de Setembro (a), Outubro (b) e Novembro (c)	50
Figura 5.9 Áreas homogêneas definidas a partir do método de AANH, e classificadas por áreas comuns nos meses de cada estação: DJF (a), MAM (b), JJA (c) e SON (d)	51
Figura 6.1 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de dezembro (1982-2019)	53
Figura 6.2 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de janeiro (1982-2019)	54
Figura 6.3 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de fevereiro (1982-2019)	55

Figura 6.4 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de março (1982-2019)	58
Figura 6.5 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de abril (1982-2019)	59
Figura 6.6 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de maio (1982-2019)	60
Figura 6.7 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de junho (1982-2019)	63
Figura 6.8 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de julho (1982-2019)	64
Figura 6.9 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de agosto (1982-2019)	65
Figura 6.10 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de setembro (1982-2019)	68
Figura 6.11 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de outubro (1982-2019)	69
Figura 6.12 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de novembro (1982-2019)	70
Figura 7.1 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas A1V (a), A2V (b) e A3V (c). Os contornos delimitam as regiões que apresentam anomalias com significância estatística no nível 0,1 (teste T – Student)	80
Figura 7.2 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 2 (c)	81
Figura 7.3 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c). .82	
Figura 7.4 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	84
Figura 7.5 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	85

Figura 7.6 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	87
Figura 7.7 Compostos de anomalia de circulação média meridional (65°O - 45°O) durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	88
Figura 7.8 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d). Os contornos delimitam as regiões que apresentaram anomalias com significância estatística no nível 0,1 (teste T – Student)	89
Figura 7.9 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	90
Figura 7.10 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	91
Figura 7.11 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	92
Figura 7.12 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	93
Figura 7.13 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	94
Figura 7.14 Compostos de anomalia da circulação média meridional (65°O - 45°) durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	95
Figura 7.15 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d). Os contornos delimitam as regiões que apresentaram anomalias com significância estatística no nível 0,1 (teste T – Student)	97
Figura 7.16 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	98
Figura 7.17 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	99

Figura 7.18 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	100
Figura 7.19 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	101
Figura 7.20 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	103
Figura 7.21 Compostos de anomalia de circulação média meridional (65°O - 45°O) durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	104
Figura 7.22 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d). Os contornos delimitam as regiões que apresentaram anomalias com significância estatística no nível 0,1 (teste T – Student)	105
Figura 7.23 Compostos de anomalia de divergência de fluxo de umidade integrado durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	106
Figura 7.24 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	107
Figura 7.25 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	108
Figura 7.26 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	109
Figura 7.27 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	110
Figura 7.28 Compostos de anomalia de circulação média meridional (65°O - 45°O) durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	111

Figura 9.1 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	120
Figura 9.2 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	121
Figura 9.3 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	122
Figura 9.4 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simuladas pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	123
Figura 9.5 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	124
Figura 9.6 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	125
Figura 9.7 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	127
Figura 9.8 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	128
Figura 9.9 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	129
Figura 9.10 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simuladas pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	130

Figura 9.11 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca na área homogênea 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	131
Figura 9.12 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca na área homogênea 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	132
Figura 9.13 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	133
Figura 9.14 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	134
Figura 9.15 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	135
Figura 9.16 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	136
Figura 9.17 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	137
Figura 9.18 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	138
Figura 9.19 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	139
Figura 9.20 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	140
Figura 9.21 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	141

Figura 9.22 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	142
Figura 9.23 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	143
Figura 9.24 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)	144
Figura 11.1 Anomalias de precipitação (mm/mês) e desvio padrão para (a) SET 2019, (b) DEZ 2019, (c) JAN 2020, (d) FEV 2020, (e) MAR 2020 e (f) SET 2020	161
Figura 11.2 Anomalias de temperatura em 2 metros (°C) e desvio padrão para (a) SET 2019, (b) DEZ 2019, (c) JAN 2020, (d) FEV 2020, (e) MAR 2020 e (f) SET 2020	162
Figura 11.3 Anomalias de fluxo de umidade integrado verticalmente (kg/ m s) e sua divergência (a) SET 2019, (b) DEZ 2019, (c) JAN 2020, (d) FEV 2020, (e) MAR 2020 e (f) SET 2020	163
Figura 11.4 Anomalias de altura geopotencial (gpm) e linhas de corrente para (a) SET 2019, (b) DEZ 2019, (c) JAN 2020, (d) FEV 2020, (e) MAR 2020 e (f) SET 2020	165
Figura 11.5 Anomalias de TSM (°C) (a) SET 2019, (b) DEZ 2019, (c), JAN 2020, (d) FEV 2020, (e) MAR 2020 e (f) SET 2020	166
Figura 11.6 Diagrama Hovmoller de OLR (W/m ²) com média em latitudes de 10°S - 10°N	167
Figura 11.7 Estrutura vertical de anomalia de temperatura (°C) e anomalia de vento zonal (m/s) média em longitudes de 120°O - 360°O para (a) SET 2019, (b) OUT 2019, (c) NOV 2019, (d) DEZ 2019, (e) JAN 2020, (f) FEV 2020 e (g) MAR 2020	169
Figura 11.8 Diagrama Hovmoller de anomalias TSM (°C) em média nas longitudes de 70°O - 35°O para cada latitude entre 18° N - 34 ° N de janeiro de 2019 a setembro de 2020	171
Figura 11.9 Séries temporais SET de DMI, PDO, EN_3.4, AMO e anomalias de precipitação em (a) área Centro-Oeste (65°O - 50°O, 12°S - 25°S), (b) área Sul (65°W - 50°W, 25°S - 35°S)	172

Figura 11.10 Séries temporais MAR de DMI, PDO, EN_3.4, AMO e anomalias de precipitação em (a) área Centro-Oeste (65°O - 50°O, 12°S - 25°S), (b) área Sul (65°O - 50°O, 25°S-35°S) 172

Figura 11.11 Correlações entre índices e anomalias de precipitação em SET (a) AMO, (b) El Niño 3.4, (c) DMI, (d) PDO. Os contornos indicam as áreas com nível de significância inferior a 0,1 (calculada utilizando a correlação) 174

Figura 11.12 Correlações entre índices de precipitação em MAR (a) AMO, (b) El Niño 3.4, (c) DMI, (d) PDO. Os contornos indicam as áreas com nível de significância inferior a 0,1 (calculada utilizando a correlação) 175

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Descrição dos cenários SSP1-1.9 e SSP5-8.5, para análise de projeções climáticas, baseadas nas descrições de O'Neil et al. (2016), Riahi et al. (2017) e Gidden et al. (2019)	29
Tabela 4.2 Classificação de períodos secos e chuvosos por meio do SPI, conforme McKee et al. (1993). São destacados em cinza os valores que representam eventos de seca, os quais foram estudados neste trabalho	33
Tabela 6.1 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF)	52
Tabela 6.2 Eventos identificados por área e por ano nos meses de DJF. Aqueles destacados em vermelho, referem-se a meses de ocorrência de El Niño, e em azul, a meses de ocorrência de La Niña	56
Tabela 6.3 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Março/Abril/Maio (MAM)	57
Tabela 6.4 Eventos identificados por área e por ano nos meses de MAM. Aqueles destacados em vermelho, referem-se a meses em que houve ocorrência de El Niño, e em azul, a meses em que houve ocorrência de La Niña	61
Tabela 6.5 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA)	62
Tabela 6.6 Eventos identificados por área e por ano nos meses de JJA. Aqueles destacados em vermelho, referem-se a meses em que houve ocorrência de El Niño, e em azul, a meses em que houve ocorrência de La Niña	66
Tabela 6.7 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON)	67
Tabela 6.8 Eventos identificados por área e por ano em SON. Aqueles destacados em vermelho, referem-se a meses de ocorrência de El Niño, e em azul, os meses de ocorrência de La Niña	71
Tabela 6.9 Eventos de seca classificados de acordo com a intensidade (em vermelho extremos, laranja severos e amarelo moderados) identificados por ano, mês e área homogênea	74
Tabela 8.1 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF) na simulação do modelo ...	112

Tabela 8.2 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Março/Abril/Maio (MAM) na simulação do modelo	113
Tabela 8.3 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA) na simulação do modelo,.....	113
Tabela 8.4 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON) na simulação do modelo	114
Tabela 8.5 Eventos de seca identificados nos meses de DJF com os dados do GPCP e do modelo HadGEM3	115
Tabela 8.6 Eventos de seca identificados nos meses de MAM com os dados do GPCP e do modelo HadGEM3	116
Tabela 8.7 Eventos de seca identificados nos meses de JJA com os dados do GPCP e o do modelo HadGEM3	117
Tabela 8.8 Eventos de seca identificados nos meses de SON com os dados do GPCP e do modelo HadGEM3	117
Tabela 10.1 Eventos de seca identificados nos meses de DJF com os dados do modelo HadGEM3 para os 31 anos do período histórico (1982-2012) e projeção futura (2070-2100)	149
Tabela 10.2 Eventos de seca identificados nos meses de MAM com os dados do modelo HadGEM3 para os 31 anos do período histórico (1982-2012) e projeção futura (2070-2100)	150
Tabela 10.3 Eventos de seca identificados nos meses de JJA com os dados do modelo HadGEM3 para os 31 anos do período histórico (1982-2012) e projeção futura (2070-2100)	150
Tabela 10.4 Eventos de seca identificados nos meses de SON com os dados do modelo HadGEM3 para os 31 anos do período histórico (1982-2012) e projeção futura (2070-2100)	151

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AANH	Análise de Agrupamento Não-Hierárquico
AMO	Atlantic Multi-decadal Oscillation
ATN	Atlântico Tropical Norte
ACP	Análise de Componentes Principais
AS	América do Sul
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
ASPS	Alta Subtropical do Pacífico Sul
A1V	Área 1 Verão
A1O	Área 1 Outono
A1I	Área 1 Inverno
A1P	Área 1 Primavera
A2V	Área 2 Verão
A2O	Área 2 Outono
A2I	Área 2 Inverno
A2P	Área 2 Primavera
A3V	Área 3 Verão
A3O	Área 3 Outono
A3I	Área 3 Inverno
A3P	Área 3 Primavera
A4O	Área 4 Outono
A4I	Área 4 Inverno
A4P	Área 3 Primavera
CDR	Climate Data Record

CERFACS	Centre of basic and applied research
CMIP	Climate Model Intercomparison Project
CO	Centro-Oeste
CP	Componentes Principais
DEZ	Dezembro
DJF	Dezembro/Janeiro/Fevereiro
DMI	Dipole Mode Index
RCP	Componentes Principais Rotacionadas
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EDI	Effective Drought Index
ENOS	El Niño - Oscilação Sul
EOF	Empirical Orthogonal Function
ESRL	Earth System Research Laboratory's
ERSST	Extended Reconstructed Sea Surface Temperature
FEV	Fevereiro
FF	Frente Fria
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
HadGEM	Hadley Centre Global Environment Model
HadISST	Hadley Center Ice-SST
IAM	Integrated Assessment Models
ICOADS	International Comprehensive Ocean-Atmosphere Dataset
IFS	Integrated Forecast System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JAN	Janeiro
JFM	Janeiro/Fevereiro/Março

JJA	Junho/Julho/Agosto
JUL	Julho
MAM	Março/Abril/Maio
MAR	Março
N	Norte
NCDD	Number of Consecutive Dry Days
NE	Nordeste
NMAT	Nighttime Marine Air
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMJ	Oscilação Madden-Julian
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PCA	Precipitation Anomaly Cumulative
PDSI	Palmer Drought Severity Index
PNMM	Pressão a Nível Médio do Mar
PSA	Pacific-South American
PSD	Physical Sciences Division
RAI	Rainfall Anomaly Index
RF	Radiative Forcing
ROL	Radiação de Onda Longa
S	Sul
SAM	South Anular Mode
SE	Sudeste
SET	Setembro
SMSA	Sistema de Monção da América do Sul
SON	Setembro/Outubro/Novembro

SPI	Standardized Precipitation Index
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
U	Componente Zonal do Vento
V	Componente Meridional do Vento
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
WGCM	Working Group on Coupled Modelling
WRC	World Climate Research Programm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	5
2.1	Hipótese e objetivo geral	5
2.2	Objetivos específicos	5
3	REVISÃO DE LITERATURA	6
3.1	Caracterização de eventos secos: uma revisão de conceitos e índices	6
3.2	Eventos secos na América do Sul: aspectos espaciais e cenários futuros	11
3.3	Padrões de circulação de grande escala: o papel das teleconexões	18
4	DADOS E METODOLOGIA	25
4.1	Área de estudo	25
4.2	Dados	25
4.2.1	Dados de análise	26
4.2.1.1	Projeto de Climatologia de Precipitação Global versão 2.3 – produto mensal (GPCP – NOAA / OAR / ESRL PSD)	26
4.2.1.2	Temperatura da superfície do mar reconstruída versão 5 (ERSST V5 - ICOADS)	27
4.2.1.3	Fluxo médio de radiação de onda longa versão 2.7 - CDR / NOAA	27
4.2.1.4	Reanálise ERA-5 versão 2.0 - médias mensais (ECMWF)	27
4.2.2	Simulações históricas e projeções futuras utilizando o modelo HadGEM3 do CMIP6	28
4.3	Metodologia	30
4.3.1	Etapa I	30
4.3.1.1	Cálculo do índice de precipitação padronizado nos pontos de grade do domínio de estudo	30
4.3.2	Etapa II	34
4.3.2.1	Determinação das áreas homogêneas	34
4.3.3	Etapa III	39
4.3.3.1	Identificação dos casos de seca em cada região homogênea	39
4.3.3.2	Caracterização dos processos oceânicos e atmosféricos associados aos eventos de seca	39
4.3.4	Etapa IV	41
4.3.4.1	Eventos de seca: comparação entre a reanálise ERA5 e HadGEM3 (simulações históricas e projeções futuras)	41
5	DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS HOMOGÊNEAS	42
5.1	Análise de componentes principais – modo S	42
5.2	Determinação das áreas homogêneas – análise de agrupamento não-hierárquica	46

6 IDENTIFICAÇÃO DOS EVENTOS SECOS – OBSERVAÇÃO (GPCP).....	52
6.1 Frequência e intensidade de eventos secos	52
6.2 Recorrência e duração dos eventos de seca	71
7 CARACTERÍSTICAS ATMOSFÉRICAS E OCEÂNICAS OBSERVADAS ASSOCIADAS AOS EVENTOS DE SECA.....	79
7.1 Verão.....	79
7.2 Outono.....	88
7.3 Inverno	96
7.4 Primavera.....	104
8 IDENTIFICAÇÃO DOS EVENTOS SECOS EM UMA SIMULAÇÃO CLIMÁTICA COM O MODELO HADGEM3.....	112
9 CARACTERÍSTICAS ATMOSFÉRICAS E OCEÂNICAS ASSOCIADAS AOS EVENTOS DE SECA UTILIZANDO HADGEM3 – SIMULAÇÕES HISTÓRICAS	119
9.1 Verão.....	119
9.2 Outono.....	126
9.3 Inverno	132
9.4 Primavera.....	138
10 PROJEÇÕES FUTURAS DO MODELO HADGEM3 CMIP6 PARA O PERÍODO 2070 A 2100	145
10.1 Diferenças entre as climatologias dos períodos futuro e histórico.....	145
10.2 Identificação dos eventos secos no período futuro (projeções do HadGem3-cmip6)	148
10.2.1 Verão.....	152
10.2.2 Outono.....	153
10.2.3 Inverno	155
10.2.4 Primavera	157
11 SECA 2019/2020	159
11.1 Contextualização do caso	159
11.2 Precipitação, temperatura e fluxo de umidade sobre a América do Sul ..	159
11.3 Aspectos de larga escala	163
12 CONCLUSÃO	176
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	180
ANEXO A - 2019/2020 DROUGHT IMPACTS ON SOUTH AMERICA AND ATMOSPHERIC AND OCEANIC INFLUENCES.....	199

**ANEXO B – DROUGHTS HOMOGENEOUS AREAS OF SOUTH AMERICA
AND ASSOCIATED PROCESSES DURING MONTHS OF AUSTRAL
SUMMER AND SPRING 201**

1 INTRODUÇÃO

A recorrência de extremos climáticos em escala global tornou-se uma questão de extrema relevância no meio científico. Isto porque, eventos desta natureza costumam produzir graves implicações socioambientais, como é o caso dos eventos de seca. A disponibilidade de recursos hídricos é indispensável à sobrevivência humana, e também às atividades de produção agrícola, pecuária, e geração de energia por meio de usinas hidrelétricas. Desta forma, alterações em regimes de chuvas pode comprometer parcial ou totalmente setores econômicos distintos e a vida da população.

Embora os eventos de seca sejam considerados fatores típicos e recorrentes do clima (WILHITE, 2000), que afetam frequentemente diferentes áreas em todo planeta, são fenômenos de extrema complexidade, devido a suas múltiplas dimensões (WILHITE; GLANTZ, 1985). São caracterizados por déficit hídrico associado à persistência de precipitação inferior à média climatológica, e podem ter 4 distintas definições, classificadas com base em sua duração e impactos: seca meteorológica, para a qual será dada ênfase neste trabalho, agrícola, hidrológica e socioeconômica (WILHITE; GLANTZ, 1985; BYUN; WILHITE, 1999; MCKEE et al., 1993).

É pertinente considerar, portanto, que a definição de seca meteorológica deve ser específica para cada região, tendo em vista que as condições que levam à diminuição de precipitação variam de forma considerável de região para região (PIRES, 2003). A seca meteorológica é caracterizada pela falta de água como consequência do desequilíbrio entre precipitação e evaporação, que depende de outros fatores como a velocidade do vento, temperatura, umidade do ar e insolação (FERNANDES et al., 2009). Sendo assim, o diagnóstico das secas bem como a análise dos padrões físicos a eles associados não é trivial; a identificação e entendimento do comportamento anômalo atmosférico se faz fundamental para uma melhor compreensão dos casos.

Índices de seca foram desenvolvidos no decorrer dos anos com o objetivo de avaliar os impactos destes eventos e classificá-los de acordo com suas características, como intensidade, duração, severidade e extensão espacial

(MISHRA; SINGH, 2010). Trata-se de uma ferramenta extremamente útil no diagnóstico do início e fim dos eventos e severidade. Existem diferentes tipos de índices para representação de condições de seca, e que levam em consideração diferentes variáveis meteorológicas e escalas diversas de tempo. A determinação e aplicação do índice mais adequado dependerá do objetivo final do trabalho e das vantagens e desvantagens apresentadas pelo mesmo, bem como sua eficiência na representação da situação meteorológica para dada escala temporal. O cálculo destes índices se dá baseado em uma série histórica de dados meteorológicos, essencial para a consistência da análise.

A considerável frequência e intensidade de extremos de seca ao longo dos últimos anos (DAI et al., 2004), especialmente em áreas prioritárias para o desenvolvimento econômico e estratégicas para o equilíbrio climático, é preocupante. De acordo com Cunha et al. (2019), os eventos de seca registrados na última década foram os mais severos dos últimos 60 anos na maioria das regiões do Brasil. Para uma melhor contextualização, exemplos de eventos de seca como os ocorridos na Amazônia em 1997-1998, 2005, 2010 e 2016 podem ser mencionados. A região exerce papel fundamental na distribuição de umidade para o restante do continente. A vasta floresta tropical úmida existente nessa região funciona como fonte de vapor d'água por meio do processo de reciclagem que ocorre pela evapotranspiração.

Nas últimas décadas, as regiões Sudeste (SE) e Centro-Oeste (CO) do Brasil também enfrentaram consecutivos períodos de seca. Os mesmos foram registrados tanto durante a estação de monção chuvosa da América do Sul, no verão (período de pico de precipitação nessas áreas), como na estação seca, durante o inverno austral. Além da influência no abastecimento da população, o déficit hídrico tem impactado o setor de energia, pois o comprometimento da vazão de grandes bacias hidrográficas da região, influencia diretamente o funcionamento de usinas hidrelétricas, as quais geram aproximadamente 70% da energia total do país.

O caso mais recente, a grande seca de 2019-2020 que afetou uma extensa área da AS, incluindo estas regiões, foi considerado como o mais devastador

em décadas, com consequências socioambientais catastróficas e gravíssimas implicações do ponto de vista econômico. De acordo com o INPE (2020), ocorreram quase 22.000 incêndios no Pantanal, e até o início de setembro de 2020, mais de 10% da sua área havia sido afetada. Durante agosto de 2020, foram registradas 8.000 fontes ativas de fogo sobre o delta do Paraná na região de Argentina. O número total de hectares sob fogo durante o período de 2020, levando em consideração apenas a área costeira do país (Santa Fe, Entre Ríos e Corrientes), foi de 400.000 hectares (SNMF, 2020).

A região sudeste da América do Sul, que inclui o sul do Brasil, Uruguai e nordeste da Argentina, considerada pilar econômico pelo importante papel que desempenha especialmente na produção agrícola, também foi fortemente impactada por esta seca. Essa área têm sido cenário frequente de eventos extremos, o que têm impactado de maneira direta e drástica a economia. O trigo foi a cultura mais afetada durante a seca de 2019/2020 principalmente no centro da Argentina, quando mais de 1 milhão de hectares foram afetados (BCR, 2020).

Mediante cenários futuros de aquecimento global, projeções do CMIP5 baseadas em resultados de modelos climáticos, indicam um aumento na frequência e severidade destes eventos no Nordeste do Brasil, elevação das temperaturas, levando à aridificação da região (MARENGO et al., 2016). Diversos estudos indicam a tendência de aumento na ocorrência de eventos de seca também na Amazônia (DAMBERG; AGHAKOUCHAK, 2014; MALHI et al., 2008), o que representaria um enorme risco ao equilíbrio climático global. Estes resultados preocupam a sociedade científica, pois a concretização das condições mencionadas representa um risco ao abastecimento de muitas regiões consideradas vulneráveis.

Com grande extensão continental, a América do Sul (AS) apresenta fatores diversos determinantes ao clima, como relevos distintos, latitudes tropicais e extratropicais e cobertura vegetal diversa. Por este motivo, não é possível caracterizá-la por apenas um conjunto de aspectos físicos que determinem seu clima. Além disso, sabe-se que os diferentes setores que a compõem

apresentam respostas distintas a padrões de teleconexões; o regime de chuvas de cada região depende do clima local, e sua variabilidade está associada tanto a fatores locais quanto remotos, em escalas de tempo e espaço variadas (DIAZ et al., 1998; UVO et al., 1998; LIEBMANN e MARENGO, 2001; CAVALCANTI, 2012).

Embora já tenham sido realizados estudos abordando a temática de eventos extremos de seca na América do Sul, ainda se observa que os mesmos têm como foco regiões reduzidas, com objetivos que se restringem às necessidades da economia e população de áreas específicas. Outra questão ainda insuficientemente estudada e compreendida é a relacionada a forçantes e mecanismos físicos causadores de eventos extremos de seca, bem como a falta de um diagnóstico eficiente para alertas e planejamento dos setores agrícola e energético, no sentido de garantir que os respectivos impactos sejam minimizados e que as necessidades básicas da população sejam supridas. Como mencionado anteriormente, o continente sul americano apresenta peculiaridades em suas características físicas, e uma importante é sua extensão norte-sul; é possível inferir, portanto, que a América do Sul apresenta climas distintos assim como regimes de chuva variáveis, os quais são afetados não apenas por condições locais, mas também por efeitos remotos. As teleconexões podem ser associadas a perturbações na atmosfera em um dado local e que afetam o clima de regiões remotas do globo (HOSKINS; KAROLY, 1981). Estes efeitos, relacionados a teleconexões também não são bem entendidos ainda. Um dos objetivos deste trabalho é analisar a variabilidade de secas em regiões da América do Sul e estudar os mecanismos de escala regional e de grande escala associados, além de discutir sobre possíveis variações futuras desses eventos baseado em projeções climáticas de um modelo do CMIP6.

2 OBJETIVOS

2.1 Hipótese e objetivo geral

A hipótese é que diferentes regiões da América do Sul são afetadas por eventos de seca associadas a mecanismos de grande escala e de escala regional. Assim, o objetivo geral deste trabalho foi realizar um diagnóstico da intensidade e análise de padrões climáticos de grande escala e de escala regional em casos de secas em diferentes regiões do continente. Este estudo também teve por objetivo fornecer uma discussão sobre a representação das características oceano-atmosféricas em casos de seca identificados em uma simulação climática de um modelo do CMIP6. Adicionalmente, no escopo deste estudo, foram analisadas as projeções do mesmo modelo, dado o cenário mais pessimista de mudanças climáticas, para identificar possíveis mudanças nos padrões de chuva associados a eventos de seca.

2.2 Objetivos específicos

Visando cumprir com o objetivo geral deste trabalho, são determinados a seguir os objetivos específicos do mesmo:

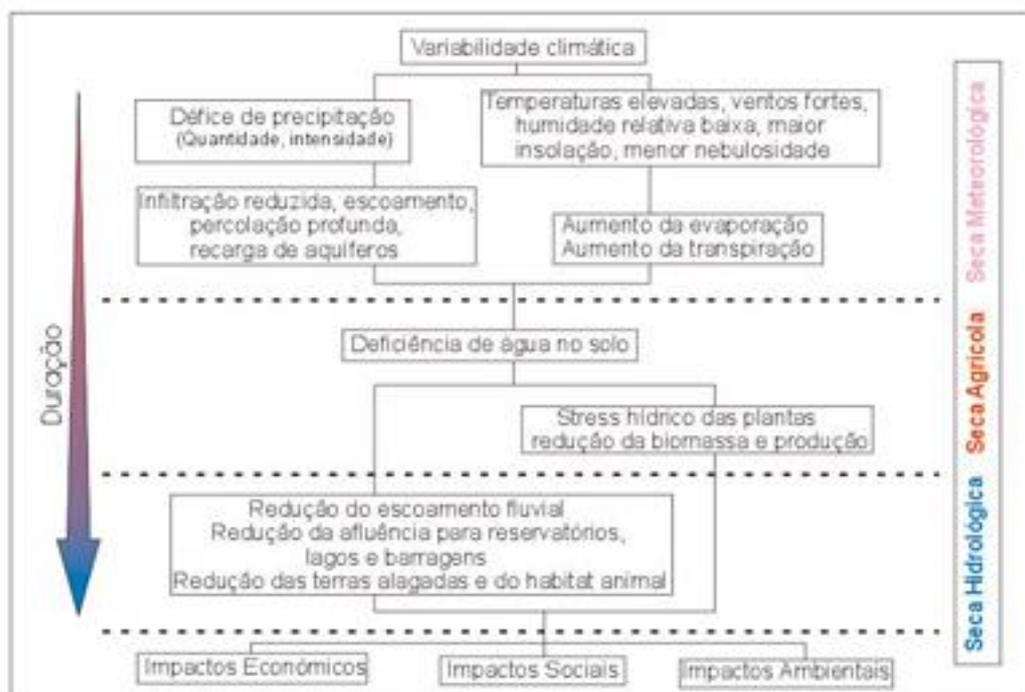
- Determinar áreas prioritárias para o estudo dentro da América do Sul;
- Determinar a frequência e intensidade dos eventos identificados em cada estação do ano;
- Identificar os padrões de circulação atmosférica e forçantes oceânicas durante os eventos de seca em cada região analisada, a fim de explorar e discutir os possíveis mecanismos que atuam em cada área;
- Identificar as secas nas mesmas regiões selecionadas nas observações, utilizando as simulações do HadGEM3 (CMIP6) para o período histórico e comparar com as observações;
- Analisar a ocorrência de eventos de seca identificados nas projeções climáticas em um cenário futuro do HAdGEM3, para as mesmas regiões das análises anteriores.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Caracterização de eventos secos: uma revisão de conceitos e índices

Secas são eventos climáticos recorrentes, e diferentemente da aridez, considerada uma característica permanente que se restringe a algumas regiões específicas onde há baixa pluviosidade, trata-se de um fenômeno temporário (WILHITE, 2000). Distintas definições para o termo “seca” podem ser encontradas na literatura; Wilhite e Glantz (1985) e Mckee et al. (1993) classificaram os eventos em quatro diferentes categorias: meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica. Como mostrado na Figura 3.1, existe uma relação direta entre o tipo de seca e o período compreendido pela mesma; ou seja, a duração de cada episódio é um fator relevante para classificação do mesmo.

Figura 3.1 Esquematização dos conceitos de seca.



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2005).

Como destacado no trabalho de Cunha (2008), todos os tipos de seca têm por origem a escassez de água por tempos extremos de redução de precipitação mais ou menos longos. Neste trabalho, será dada ênfase para o estudo de secas meteorológicas, fenômeno este definido como a base para o desenvolvimento dos demais tipos de seca, como pode ser observado na Figura 3.1; desta forma, a persistência destas condições permite a intensificação do déficit hídrico, que por consequência passa a afetar diversos setores, como o agrícola, hidrológico e por fim socioeconômico.

A seca meteorológica pode ser definida por um déficit de precipitação em relação aos valores médios (GIBBS, 1975), sendo, portanto, esta variável utilizada comumente para análise deste tipo de evento (SANTOS, 1983; CHANG, 1990; ELTAHIR, 1992). Pires (2003) salienta em seu trabalho que o conceito que define este tipo de fenômeno é específico para cada região, pois as condições atmosféricas que resultam em deficiências de chuva dependem de cada regime climático. De acordo com a descrição do autor Wilhite (2000) e conforme mostrado no esquema da Figura 3.1, secas meteorológicas podem ser definidas basicamente em função do grau de secura, em relação à média, e à duração do período seco. Estes eventos são caracterizados pela falta de água induzida pelo desequilíbrio entre precipitação e evapotranspiração, sendo esta última dependente de outros elementos como velocidade do vento, temperatura, umidade do ar e insolação (FERNANDES et al., 2009). Secas meteorológicas são causadas por anomalias persistentes (de, por exemplo, alta pressão) nos padrões de circulação atmosférica de grande escala, que são geralmente provocados por anomalias de TSM ou outras condições remotas (SCHUBERT et al., 2004).

Eventos de seca são fenômenos de extrema complexidade, quando analisados dos mais diversos pontos de vista. A caracterização das secas é feita com base essencialmente em três aspectos: sua magnitude, duração e caracterização espacial (CUNHA, 2008). A previsão de secas, bem como a identificação do início e término dos eventos, é uma tarefa extremamente difícil ainda nos dias atuais, o que por vezes inviabiliza o diagnóstico correto e também a tomada de medidas necessárias ao gerenciamento responsável dos recursos hídricos. Isto

torna-se um problema, pois dependendo das proporções atingidas pelo evento, poderá causar desde limitação ou mesmo escassez de recursos hídricos, impactando em setores produtivos e econômicos da região afetada, e podendo gerar consequências catastróficas para o meio ambiente. Além disso, sua evolução, variabilidade espacial e temporal são condições muito variáveis para cada circunstância.

Com o propósito de auxiliar a identificação e análise destes eventos, alguns índices de seca vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos, e aplicados a estudos voltados para esta temática, mostrando-se uma eficiente ferramenta no monitoramento destes fenômenos. Considerada uma variável primária, um índice de seca deve ser capaz de quantificar o evento para diferentes escalas de tempo, sendo necessária a utilização de uma série temporal longa, servindo, portanto, para definir parâmetros como intensidade, duração, severidade e extensão espacial (MISHRA; SINGH, 2010). Tendo em vista que estes indicadores de seca meteorológica baseiam-se em dados de precipitação para determinação de episódios secos (WANDERS et al., 2010), a existência de uma ampla diversidade das distribuições temporal e espacial das chuvas torna-se um desafio, e para lidar com tal questão, costuma-se utilizar valores mensais ou médias móveis (STEINEMANN et al., 2005). A seguir será feita uma breve revisão de alguns dos principais índices de seca meteorológica, desenvolvidos com objetivo de monitorar os fenômenos.

Mishra e Singh (2010) fazem em seu estudo uma breve discussão sobre os principais índices de seca utilizados na quantificação e monitoramento do fenômeno, citando respectivos aspectos positivos e negativos. Os autores mencionam ainda que praticamente todos os índices de seca utilizam a precipitação de forma isolada ou em combinação com outros elementos meteorológicos dependendo dos requisitos propostos, também sugeridos pela Organização Meteorológica Mundial (OMM, 1975).

Um exemplo de combinações como esta é o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), formulado por Palmer em 1965, com objetivo inicial de estimar a disponibilidade e demanda de umidade dentro de um modelo de solo de duas

camadas, utilizando dados de precipitação e temperatura. Posteriormente, surgiram versões modificadas deste indicador; embora ainda seja considerado um indicador de seca meteorológica, leva em conta precipitação, evapotranspiração e umidade do solo (WANDERS et al., 2010). Embora seja um índice bastante utilizado, o mesmo apresenta algumas limitações que foram documentadas por alguns estudos, como em Alley (1984); a utilização de regras muito arbitrárias para quantificar a intensidade, início e fim das secas. Outro ponto fraco desta metodologia é o fato de que a padronização de seus valores para diferentes localidades e meses é baseada em comparações muito limitadas, sendo fracamente justificada do ponto de vista físico e estatístico. Além disso, a utilização de modelos convencionais de séries temporais pode ser inadequada, uma vez que a distribuição bimodal, atribuída aos dados, limita a capacidade de capturar propriedades estocásticas do índice. No trabalho de Mishra e Singh (2010) também são mencionadas algumas limitações do PDSI, como sua escala temporal ser mais adequada ao monitoramento de impactos na agricultura do que para secas hidrológicas. O fato de considerar que toda precipitação registrada é chuva, faz com que valores questionáveis sejam encontrados durante o inverno.

A teoria dos decis de precipitação, proposta por Gibbs e Maher (1967) também é amplamente utilizada como indicador de seca meteorológica, por sua simplicidade de cálculo e por requerer menos dados que outros índices (HAYES et al., 1999). De acordo com a metodologia, uma região será atingida por uma seca quando a precipitação estiver abaixo do percentil de 90% por três meses consecutivos (KINNINMONTH et al., 2000). De acordo com Keyantash e Dracup (2002) o final do evento é determinado quando a precipitação dos últimos três meses for superior ao percentil de 80%, ou no mês anterior estiver acima do percentil de 40%; estes mesmos autores alertam, por outro lado, para as desvantagens do método, como não ser adequado para climas com forte sazonalidade ou muito secos. Além disso, Wanders et al. (2010), mencionam que outro ponto negativo do indicador é a necessidade de longas séries temporais de dados meteorológicos.

Existem também indicadores de seca baseados em uma escala de tempo diária, dentre os quais é possível citar o Índice de Seca Efetivo (EDI) (BYUN; WILHITE, 1999) e o Número de Dias Secos Consecutivos (NCDD) (DENI; JEMAIN, 2009). Ainda que sejam ferramentas muito úteis em estudos de mudanças climáticas, alterações dos padrões de chuva e eventos extremos de seca, os mesmos apresentam algumas desvantagens. As principais estão relacionadas à necessidade de uma série longa de dados para se obter uma distribuição normal confiável (KIM et al., 2009).

O Índice de Anomalia de Chuva - RAI (*Rainfall Anomaly Index*), desenvolvido por Van Rooy (1965), também pode ser calculado para uma escala de tempo relativamente curta (semanal), porém, seu cálculo pode ser feito também em escala mensal, ou anual, dependendo da distribuição das chuvas da região (WANDERS et al., 2010). A Anomalia Cumulativa de Precipitação (CPA, *Cumulative Precipitation Anomaly*) sugerida inicialmente por Foley, em 1957, também não possui escala de tempo fixa, podendo variar de mensal a anual (WANDERS et al., 2010). De acordo com Keyantash e Dracup (2002), a função cumulativa foi recomendada posteriormente, por possibilitar a avaliação de meses seguidos com chuvas inferiores à média. Os mesmos autores mencionam que uma desvantagem deste método é o fato de que o início do evento não é claramente indicado, pois será determinado quando as anomalias de precipitação passam a ser negativas.

O Índice de Precipitação Padronizado (SPI, *Standardized Precipitation Index*), desenvolvido por McKee (1993), vem sendo amplamente utilizado nos últimos anos no monitoramento de quantificação de eventos secos em múltiplas escalas de tempo, utilizando-se como base de dados, série mensais. De maneira resumida, o método consiste em ajustar um registro de precipitação a uma distribuição de probabilidade, posteriormente transformada em uma distribuição normal, de modo que o SPI médio para dadas condições seja igual a zero (EDWARDS; MCKEE, 1997). Na seção (Dados e Metodologia) o método é detalhadamente explicado. Uma das desvantagens deste método, assim como os mencionados anteriormente, é a necessidade de uma série longa de dados (pelo menos 30 anos) como base para aplicação. Por outro lado, o fato

de ser um índice normalizado, permite que climas secos ou úmidos possam ser representados, ou seja, eventos extremos chuvosos ou não podem ser estudados aplicando-se a metodologia. Outra grande vantagem deste método é o fato de que padroniza a análise através da normalização, permitindo a comparação de regiões totalmente distintas (FERNANDES et al., 2009).

Em dezembro de 2009, ocorreu em Lincoln, Nebraska, o Workshop Inter-Regional sobre Índices e Sistemas de Alerta Precoce para Secas, o qual reuniu 54 participantes de 22 diferentes países, incluindo especialistas em seca para cada uma das seis regiões da OMM. O objetivo do evento foi discutir o desenvolvimento de padrões para índices de seca e diretrizes para sistemas de alerta de seca. Chegou-se ao consenso de que a OMM deveria recomendar para uso geral de países que querem monitorar secas meteorológicas, a utilização do SPI; a conclusão obtida pelos participantes foi de que o índice não deve substituir índices locais utilizados com o mesmo fim, mas deve ser o índice padrão disponível em nível mundial (HAYES et al., 2011).

3.2 Eventos secos na América do Sul: aspectos espaciais e cenários futuros

A recorrência de eventos extremos ao redor do mundo tem despertado o interesse de muitos pesquisadores sobre o entendimento destes eventos e sua possível relação com as mudanças climáticas. Fenômenos associados à escassez de recursos hídricos têm assumido uma posição de destaque neste contexto, pois além de prejudicar setores econômicos diversos, são capazes de trazer grandes transtornos à população da área afetada. Secas comumente prejudicam atividades de produção primárias, como agricultura, pecuária e pesca, bem como outras áreas que também influenciam a economia local e regional, como a geração de energia; casos de maior severidade podem prejudicar ainda o deslocamento por hidrovias e também a disponibilidade de água suficiente às necessidades básicas da população.

Com exceção da região sul, o território brasileiro esteve exposto às mais severas e intensas secas dos últimos 60 anos entre 2011 e 2019 (CUNHA et al., 2019). Neste período foi registrada a mais severa e prolongada seca no

Nordeste (MARENGO et al., 2016; BRITO et al., 2018). O evento, que teve início em meados de 2011, coincidentemente ocorreu durante o desenvolvimento e intensificação de um episódio de La Niña, quando são esperadas chuvas acima da média na região. Marengo et al. (2013) observaram, no entanto, um resfriamento no Atlântico Subtropical durante o verão austral, que se deslocou para o Atlântico Tropical (entre 5°S e 15°S) no outono. Isso resultou na intensificação da ASAS (em cerca de 2 hPa) durante o pico da estação chuvosa da região, impactando na formação das chuvas no leste do Nordeste.

A Amazônia também vem enfrentando especialmente nas últimas décadas, consecutivos períodos prolongados de seca. Coelho et al. (2012) realizaram um diagnóstico climático dos eventos ocorridos na região em 1998, 2005 e 2010, no qual uma das questões enfatizadas foi o efeito das condições de seca no regime de precipitação da área, caracterizado por um sistema de monções. Durante o primeiro episódio, foram observadas anomalias negativas de chuva na maior parte da Amazônia, as quais estenderam-se desde o início da estação chuvosa até a fase de transição para a estação seca, reforçando as condições secas estabelecidas previamente. Por outro lado, no segundo episódio, embora tenha sido registrada a redução da precipitação entre dezembro de 2004 e janeiro de 2005, período que compreende a estação de monção chuvosa, a intensificação do evento deu-se durante a estação seca. Conforme os autores, o evento, que aparentemente teve início no período de transição entre estações seca e chuvosa, apresentou efeitos mais localizados sobre a porção ocidental da Amazônia, norte e noroeste. Já o terceiro evento, apresentou características que se assemelham a ambos episódios de seca registrados anteriormente; o caso teve início durante o verão, período úmido na região, quando anomalias negativas de precipitação foram observadas nas porções sul e norte. As condições de seca permaneceram no período de transição entre estações e foram reforçadas durante o inverno, o que demonstra a intensidade do evento.

Mais recentemente, em 2015-2016, um novo importante episódio de seca acometeu a Amazônia e Nordeste do Brasil. A gravidade bem como a extensão

do evento é evidenciada através do cálculo do SPI e anomalias padronizadas de precipitação calculadas em Erfanian et al. (2017), que sugerem que seus impactos ec hidrológicos, em termos de extensão e severidade superou os eventos de 2005 e 2010. Além disso, outras peculiaridades deste evento foram discutidas em Jiménez-Muños et al. (2016). Conforme o estudo mencionado, o período foi caracterizado por recorde de temperaturas elevadas, potencializando a gravidade da seca por meio do aumento da evapotranspiração potencial. Também foi observado um padrão de dipolo, com chuvas acima da média no oeste da região, e déficit no Leste, que pode ser atribuído à localização do aquecimento máximo do Pacífico Equatorial Central. Tais condições foram responsáveis pela intensificação da grande seca que já afetava o Nordeste Brasileiro há alguns anos. Por outro lado, Erfanian et al. (2017) destacaram que tanto no NEB quanto na região amazônica afetada, é improvável uma relação entre anomalias oceânicas que expliquem este evento, isto porque não foram capazes de explicar a severidade do evento, o que sugere a contribuição de outros fatores, como mudança da cobertura da terra e aquecimento induzido pelo aumento de emissões de CO₂.

Cavalcanti e Kousky (2004) analisaram os aspectos atmosféricos associados ao evento seco de grande escala que atingiu o Brasil no verão de 2001, e que causou déficits de chuvas no nordeste (NE), centro-oeste (CO) e sudeste (SE). Os autores observaram durante o período o deslocamento de vários vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN), do Atlântico para o continente, suprimindo a convecção na região central do país. Além disso foi observada uma menor frequência de penetração de sistemas frontais, capazes de atingir o SE. Cavalcanti (2014) analisou a variabilidade interanual de precipitação na região para o período entre 1985 e 2014. Utilizando-se do SPI como ferramenta de identificação de extremos, foi observado que o número de casos secos moderados é maior do que o número de casos chuvosos moderados. Em seu trabalho foram feitos compostos dos cinco casos mais secos, onde observou-se que as anomalias de precipitação mais representativas ocorrem no mês de janeiro.

Entre 2014 e 2015, o estado de São Paulo experimentou uma relevante crise hídrica associada a uma das piores secas já registradas nas últimas décadas. Coelho et al. (2016), ao analisarem o evento, observaram que o verão de 2014 destacou-se pela maior anomalia negativa de precipitação (-249,7 mm em relação à normal climatológica de 1981-2010). Além disso, foi observado que a região havia apresentado importantes déficits nos últimos anos, e isto pode ter reforçado as condições de seca. Os mesmos autores identificaram um centro de alta pressão anômalo sobre o Atlântico Sul, que provavelmente atuava bloqueando a migração de sistemas frontais para a região e mantendo as temperaturas elevadas, condições favoráveis à ocorrência de seca. No mesmo estudo, observou-se que a circulação anticiclônica associada ao sistema estendia-se do oceano para região SE, inibindo a convecção sobre a região. Nobre et al. (2016) analisaram o mesmo evento e também identificaram um bloqueio na alta e média troposfera durante o período seco, o qual durou 45 dias, o que não havia sido visto em cinco décadas. Como impactos do evento, os autores mencionam a grave crise hídrica enfrentada na região, agravada pela falta de chuvas e elevadas temperaturas, sendo considerado o verão mais quente e seco desde 1961 sobre o sistema de reservatórios da Cantareira (MARENGO et al., 2015). Os casos de seca dos janeiros de 2014 e 2015 também foram estudados em Cavalcanti et al. (2017) e as condições de pressões mais altas que a média sobre o Sudeste e alterações no fluxo de umidade foram semelhantes a compostos de casos de seca ocorridos durante o período de 1981 a 2010.

Inúmeros eventos de seca extrema têm ocorrido nos últimos anos na região central do continente, como no Paraguai, sendo os mais severos simultâneos a episódios de La Niña (BENITEZ; DOMECCQ, 2014). No Pantanal, as secas também foram recorrentes nas últimas décadas – 1999, 2005, 2008, 2010 e 2012 (ARAÚJO et al., 2019). Entre 2019 e 2020 a região enfrentou uma das piores secas de sua história, que resultou em impactos catastróficos do ponto de vista ambiental. A ocorrência de incêndios, potencializados pelas condições meteorológicas, consumiram extensas áreas do bioma, o que torna explícita a gravidade desta seca, tendo em vista que se trata da maior área alagada do

mundo. A interação terra-atmosfera, com temperaturas máximas em média 6°C acima do normal e grandes taxas de evaporação, contribuíram para a ocorrência simultânea de veranicos, agravando o risco de incêndios (LIBONATI et al., 2022).

Assim como nas demais regiões do continente, o sudeste da América do Sul, que inclui a região da bacia do Prata enfrentou eventos de seca excepcionais nos últimos anos, especialmente durante o verão austral, como foram os casos de 1988-1989, 2008-2009 e 2011-2012 (VAN GARDEREN; MINDLIN, 2022). O último evento mencionado apresentou curta duração, mas teve impactos devastadores na agricultura, mais especificamente no cultivo de milho e soja (SGROI et al., 2021). O período caracterizou-se por um intenso episódio de La Niña, e intensificação da Zona de Convergência do Atlântico Sul, fatores estes que combinados favoreceram as condições secas no SESA (VAN GARDEREN; MINDLIN, 2022). Mais recentemente, em 2017-2018, uma grande seca acometeu a região dos Pampas, na Argentina, também associada a um evento de La Niña que se estende até os dias atuais, e afetou principalmente, mais uma vez, as culturas de milho e soja (BERT et al., 2021).

O SPI tem sido amplamente utilizado com objetivo de monitorar e identificar padrões temporais e espaciais de variabilidade de chuvas. Portela et al. (2015) realizaram o cálculo do índice nas escalas de 3 e 6 meses, para o período de 1961-2011, a fim de caracterizar eventos de seca no sul do Paraguai e Brasil e nordeste da Argentina. As áreas analisadas possuem economia baseada em atividades essencialmente ligadas à produção agrícola e criação de gado, atividades totalmente dependentes de condições meteorológicas e climáticas favoráveis. A regionalização das áreas foi realizada com auxílio da técnica de Análise de Componentes Principais, e permitiu a identificação de 7 áreas com comportamento homogêneo. O estudo ainda demonstrou que no período analisado, o nordeste da Argentina apresentou uma tendência de aumento da frequência das secas, enquanto o contrário foi observado no sul do Brasil.

O SPI foi calculado em diferentes escalas por Penalba e Rivera (2016), e aplicada a técnica de análise de componentes principais rotacionada para o

período que compreendeu 1961 – 2008, com ênfase no sul da América do Sul. A metodologia permitiu identificar 7 áreas homogêneas sobre a região analisada, consistentes geograficamente e em termos climáticos, permitindo analisar as forçantes associadas a eventos de seca em cada uma destas regiões.

Uma análise do período compreendido entre janeiro de 1979 e dezembro de 2018, de anomalias de precipitação e umidade do solo bem como índices padronizados, permitiu caracterizar as secas na Argentina por Sgroi et al. (2021). Os resultados mostraram que a porcentagem de ocorrência de eventos de seca no NE da Argentina varia entre 12% e 18%, e a maioria dos casos apresenta duração inferior a 3 meses.

Rivera e Penalba (2014), analisaram tendências e os padrões espaciais das secas que afetam o sul da América do Sul, para o período de 1961-2008. A área enfatizada pelo estudo cobre boa parte do Chile, o Paraguai, Argentina, Uruguai e a região sul do Brasil. Baseado em dados de estações meteorológicas distribuídas por estas áreas, foram definidas as condições de seca através do SPI, calculado para diferentes escalas de tempo. Os resultados obtidos mostraram tendências não lineares nas séries temporais, e indícios de que a porcentagem de áreas sob condições de seca está diminuindo. O estudo demonstrou ainda, que fatores locais têm um peso muito importante sobre os eventos, uma vez que suas respectivas extensões espaciais são limitadas, e o padrão físico da área de estudo bastante heterogêneo.

Uma questão amplamente abordada nos dias atuais e de grande preocupação por parte do meio científico, é o impacto das mudanças climáticas sobre o regime de chuvas de todo o planeta, isto porque alterações do comportamento pluviométrico impactam diretamente a vida da população. Como mencionado anteriormente, as consequências podem ser sentidas em vários setores da economia, mas principalmente afetando a rotina da sociedade.

Os últimos resultados divulgados pelo IPCC indicam que haverá no decorrer dos próximos anos um aumento das temperaturas em todo o planeta,

especialmente em áreas continentais e também a ocorrência de eventos extremos de chuva (enchentes e secas). Isto revela o risco de vulnerabilidade do planeta à ocorrência de catástrofes naturais, impulsionadas pela ação antropogênica através do aumento da concentração de gases de efeito estufa.

Junquas et al. (2012), utilizaram projeções de vários modelos do CMIP3 e observaram uma tendência de decréscimo da precipitação durante o verão austral no sudeste da América do Sul, para a primeira metade do século XXI. Barros et al. (2015) mencionam em seu trabalho que estas projeções climáticas mantêm tendências observadas, como a redução das chuvas e aumento da temperatura sobre a Cordilheira dos Andes, causando grande preocupação.

Cavalcanti e Silveira (2016) analisaram os resultados de modelos regionais do CLARIS-LPB, com objetivo de identificar mudanças e incertezas em projeções futuras para a Bacia do Prata (2071-2098), e comparadas ao período base (1961-1988). Uma convergência foi observada entre os modelos, indicando mais precipitação em toda a bacia e maior frequência de verões úmidos. Porém, as projeções indicaram condições mais secas no alto da bacia e maior frequência de invernos e primaveras austrais extremamente secos.

Nas últimas décadas, condições extremas de calor e seca intensificaram-se no Sudeste Brasileiro, e espera-se um aumento da ocorrência destes eventos em um cenário de mudanças climáticas (GEIRINHAS et al., 2021). Espera-se um aumento das temperaturas de, entre 2,5°C e 3°C, na região (MARENGO et al., 2017). Levando em consideração um cenário de mudanças climáticas, modelos do CMIP 5 projetam aumentos na frequência e extensão geográfica de secas meteorológicas no leste da Amazônia, além de que, áreas afetadas por secas brandas e severas devem dobrar e triplicar, respectivamente, até 2100 (DUFFY et al., 2015). De acordo com Malhi et al. (2008), alterações no regime de chuvas durante a estação seca provavelmente são as determinantes mais críticas do destino climático da região, e de acordo com as projeções de alguns modelos globais a Amazônia deve tornar-se mais seca no decorrer do século XXI.

Embora eventos desta natureza ocorram de forma recorrente e generalizada no Nordeste do Brasil (CUNHA et al., 2019), as projeções dos modelos climáticos do CMIP5 indicam um aumento na frequência e severidade das secas na região, onde também deve ocorrer uma elevação das temperaturas, levando à aridificação da região (MARENGO et al., 2016). Spinoni et al. (2014) também mostraram em seu estudo que houve um aumento na extensão das áreas áridas em todo o Nordeste entre 1951 e 2010, destacando o risco de desertificação da região.

Na seção posterior, serão discutidas as possíveis causas de ocorrência desses eventos, especialmente no que diz respeito a anomalias na circulação de grande escala.

3.3 Padrões de circulação de grande escala: o papel das teleconexões

A ocorrência de eventos extremos de chuva ou secas, em muitas regiões do globo, podem ser associadas a modos de variabilidade climática naturais, capazes de alterar os padrões de circulação normalmente observados, e conseqüentemente o regime de chuvas. Projeções climáticas têm demonstrado cenários distintos para o caso de aumento da temperatura média global, e de maneira geral, têm sugerido mudanças no padrão de variabilidade e conseqüentemente maior frequência e intensificação de eventos extremos, o que seria um dos muitos impactos previstos das mudanças climáticas (COELHO; GODDARD, 2009).

Em especial nos trópicos, os principais fatores de variabilidade climática são as temperaturas da superfície do mar (BRANKOVIC et al., 1994), pois muitas das teleconexões são estabelecidas a partir de condições anômalas de TSM (DE SOUZA; REBOITA, 2021). Diversos estudos reportam a relação estabelecida por meio de teleconexões entre o Pacífico e precipitação na América do Sul (KALNAY et al., 1986). Um destes modo de variabilidade, o El Niño, desempenha um papel importante na ocorrência de eventos secos em áreas tropicais, tendo em vista que uma considerável fração destas regiões ao longo do globo tem enfrentado episódios de déficit de chuvas durante tais eventos (LYON, 2004).

Basicamente, a ocorrência de um evento de El Niño - Oscilação Sul (ENOS) se deve à elevação das temperaturas superficiais do oceano Pacífico Central e Leste, influenciando os padrões de circulação atmosférica no globo. Estas mudanças observadas sobre o oceano refletem em mudanças no campo de pressão na região do Taiti, no Pacífico Central, e Darwin, na Austrália (RASMUSSEN; WALLACE, 1983). O fenômeno pode ser considerado, portanto, como acoplado oceano-atmosfera, e é considerado o principal modo de variabilidade em escala global (TRENBERTH; CARON 2000; GRIMM, 2009).

A gangorra de pressão que é associada ao ENOS é a mesma que gera a célula de Walker, padrão de circulação zonal, observada na zona equatorial do oceano Pacífico Tropical (WALKER; BLISS, 1932). É constituída por células de circulação ao redor do planeta, estabelecendo regiões de movimento ascendente predominante no oeste do Pacífico Tropical (160° E – 180° E), Amazônia (aproximadamente 60°) e oeste da África, e outras de subsidência próximo à costa oeste do continente sul-americano (aproximadamente 90°), oceano Atlântico (0°) e leste da África, em anos considerados neutros (REBOITA; SANTOS, 2015). Em anos caracterizados com eventos de El Niño, observa-se um enfraquecimento dos ventos Alísios inviabilizando o deslocamento das águas mais aquecidas do Pacífico para oeste, e que portanto permanecem confinadas na região central e próximo à costa oeste da América do Sul. Tal configuração permite um maior aquecimento atmosférico entre o setor central do Pacífico e o litoral do Peru, o que favorece maior evaporação e convecção sobre a área, estabelecendo desta forma uma nova circulação por meio do deslocamento da célula de Walker. Conforme Grimm (2009), são estas anomalias de circulação e transporte de umidade que explicam as anomalias negativas de precipitação no norte do Brasil durante eventos ENOS, diretamente relacionadas à circulação divergente de Walker. Muitos estudos mostraram que, em diversas ocasiões as anomalias positivas de TSM sobre o Pacífico Equatorial exerceram influência sobre o regime de chuvas da Amazônia e Nordeste do Brasil, implicando em períodos de secas prolongadas (MARENGO; NOBRE, 2009).

Além disso, o sul da América do Sul também é uma das regiões impactada por extremos de seca e chuva associados a ENOS (ROPELEWSKI; HALPERT, 1986). Na maior parte da área que abrange a Bacia do Prata, eventos de seca geralmente estão associados a episódios de La Niña, impactando de maneira negativa principalmente no sul do Brasil, nordeste da Argentina, Paraguai e Uruguai (NAUMANN et al., 2021). Embora inúmeras áreas localizadas no sul continente apresentem uma clara relação entre estes fenômenos, a resposta às anomalias de TSM no Pacífico varia de acordo com a região que se encontra mais fria (PENALBA; RIVERA, 2016). As mudanças na circulação atmosférica geradas pelo ENOS influenciam no transporte de umidade dos trópicos para subtropicais e extratropicais, modulando o jato de baixos níveis de maneira a favorecer ou suprimir eventos extremos de precipitação (MO; BERBERY, 2011). Silva et al. (2009) sugerem em seu trabalho uma inversão dos Alísios de nordeste sobre a região tropical da América do Sul onde surge anomalia negativa de PNMM durante episódios de La Niña, tornando mais fracos ou menos frequentes casos de Jato de Baixos Níveis.

A Oscilação Madden-Julian (OMJ), modo de variabilidade também identificado sobre o Pacífico e Continente Marítimo, tem influência importante no regime de chuvas de algumas regiões da América do Sul. Consiste em um mecanismo de escala planetária, com distúrbios de convecção tropical profunda e troposférica que propagam-se para leste ao longo do equador, completando um ciclo ao redor do globo em um período aproximado de 30 a 60 dias (MADDEN; JULIAN, 1994). De acordo com Cavalcanti (2016), extremos de chuva e seca identificados no período entre 1985 e 2014 no sudeste do Brasil foram fortemente influenciados por este padrão. Seus resultados demonstram que, anomalias de convecção sobre a região da Indonésia-Pacífico Oeste são capazes de gerar padrões de dipolo sobre o continente, devido à propagação de trens de onda de Rossby que alteram a circulação atmosférica e consequentemente geram anomalias de precipitação. Os efeitos da OMJ também são observados no norte e nordeste do Brasil; em escala global, é o principal mecanismo modulador das variações de chuva na escala intrasazonal na Amazônia oriental e nordeste do Brasil (DE SOUZA; AMBRIZZI, 2006).

O padrão PSA exerce importante função na circulação atmosférica e variabilidade de chuvas na América do Sul (GHILL; MO, 1991, MO; PAEGLE, 2001). O modo de variabilidade caracteriza-se por trens de ondas de número 3 que influenciam a região extratropical do Hemisfério Sul, estendendo-se desde o Pacífico Central até a Argentina (MO; HIGGINS, 1997), sendo mais ativo durante o inverno e a primavera, e podendo persistir por vários meses (IRVING; SIMMONDS, 2016). A teoria conhecida é de que o padrão esteja associado à dispersão de ondas de Rossby de fontes de calor tropicais anômalas (LI et al., 2015), mas entende-se também que é um resultado de flutuações atmosféricas internas causadas por instabilidade do estado básico (GRIMM; TEDESCHI, 2009). Sinclair et al. (1997) evidenciaram em seu estudo o importante papel desempenhado pelo modo de variabilidade em eventos de bloqueio, enquanto a fase positiva está associada a condições anormalmente úmidas no sul da América do Sul e secas mais ao norte (MO; PAEGLE, 2001). O grande evento de seca que acometeu a região Sudeste do Brasil, em especial o estado de São Paulo no verão de 2014 causou uma séria crise hídrica e energética. Coelho et al. (2016), identificaram durante a ocorrência do fenômeno a presença de uma fonte de calor anômala sobre o Norte/Nordeste da Austrália, associada à geração de um trem de ondas que conecta circulações tropical e extratropical, e influenciou as condições atmosféricas na região da seca. Desta forma, uma área de pressão anormalmente elevada estabelece-se sobre a área, inibindo os processos convectivos e por consequência, a precipitação. Seth et al. (2015), também analisaram a seca do verão de 2014, incluindo a ocorrida na mesma estação no ano seguinte, e observaram também que uma fonte de calor sobre o Pacífico Ocidental gerou um trem de ondas no Pacífico Sul, conectando as condições do oceano às observadas na área de estudo. Anomalias positivas de geopotencial foram observadas sobre o Atlântico Sul, as quais estenderam-se pelo continente, abrangendo o sudeste do país, impedindo a migração de sistemas de baixa pressão na região vindas de latitudes médias, resultados estes que sugerem uma simetria hemisférica à proposta para a recente seca ocorrida na Califórnia. Outros períodos secos foram reportados no Norte (N) do país também

associados a outros padrões de teleconexões, como no caso das secas de 2005 e 2010 que afetaram a Amazônia. Os episódios estiveram associados a anomalias positivas de TSM sobre o Atlântico Tropical Norte (ATN), identificadas durante o mesmo período. Coelho et al. (2012) analisaram os casos mencionados, e observaram a predominância de movimentos verticais sobre o setor do oceano que encontrava-se mais aquecido que o normal, padrão zonal que demonstra a zona de atuação da ZCIT no período, e movimentos subsidentes ao longo de 10°S no centro do Brasil, o que explica a redução das chuvas. Tal comportamento observado reflete as alterações ocorridas na célula de circulação meridional, a Célula de Hadley, cujo padrão, normalmente, consiste em uma área de ascensão sobre a região tropical. O aquecimento anômalo do Atlântico Norte promoveu um deslocamento do ramo ascendente desta célula para norte do equador e movimentos descendentes sobre a área que compreende a Amazônia. Da mesma forma, ainda que o aquecimento anômalo das águas tropicais do Pacífico e Atlântico Norte sejam consideradas as principais forçantes para ocorrência de secas extremas na América do Sul, sua variabilidade não explicou, por exemplo, a gravidade dos déficits de chuva observados em parte da Amazônia e Nordeste do Brasil em 2016 (ERFANIAN et al., 2017). Conforme Chaves (2005, 2006), a influência do Atlântico Norte na convecção na América do Sul é significativa apenas na costa norte do continente em DJF. O evento de seca que se estendeu de 2012-2016 no Nordeste, por outro lado, teve seu início associado ao esfriamento atípico observado no Atlântico Subtropical que posteriormente deslocou-se até latitudes mais baixas, intensificando a ASAS sobre o leste do NE e reduzindo as chuvas.

O Atlântico Sul também é um importante forçante modulador das chuvas no SE da América do Sul. As chuvas de verão sobre esta região – que inclui o nordeste da Argentina, Uruguai e sul do Brasil – são claramente dependentes das TSM no Oceano Atlântico próximo; anomalias frias de suas águas superficiais não contribuem apenas para a redução da precipitação no continente, mas também estão associadas a um deslocamento para norte da ZCAS (BARROS et al., 2000). Experimentos numéricos sobre a influência da

Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) demonstram o aparecimento de anomalias negativas de TSM ou desintensificação de anomalias positivas de TSM no Atlântico Sul (CHAVES; NOBRE, 2004; CHAVES; AMBRIZZI, 2005), configuração que é consistente com o obtido no estudo observacional de Chaves (2011). Conforme Herdies et al. (2002), existe uma relação entre o enfraquecimento do jato de baixos níveis próximo à cordilheira dos Andes e eventos de ZCAS, desfavorecendo, desta forma, as chuvas sobre regiões subtropicais, onde a umidade proveniente da Amazônia alimenta a convecção e instabilidade. Existem, no entanto, estudos que divergem sobre a influência das anomalias de temperatura no Atlântico Sul sobre as chuvas na América do Sul; enquanto Diaz et al. (1998) e Barros et al. (2000) identificaram uma correlação entre anomalias quentes no oceano e as chuvas na América do Sul, Figueroa et al. (1995) sugerem que não há influência dessas anomalias na ZCAS. Os estudos até aqui, contudo, convergem, sobre o fato de que há uma relação melhor estabelecida entre anomalias de TSM nos trópicos, do que em regiões extratropicais (TASCHETTO; WAINER, 2008).

A intensidade dos ventos alísios de sudeste tem relação direta com a ASAS, com localização típica entre 15°-45°S e 45°W-15°E, no ramo descendente da célula de Hadley (MACHEL et al., 1998). O sistema é mais intenso durante o inverno austral, estendendo-se mais na direção oeste e influenciando o oeste da região SE do Brasil, o que contribui para a redução das chuvas nesta época, enquanto o oposto pode ser observado durante o verão (HASTENRATH; KUTZBACH, 1985; REBOITA et al., 2010, 2019).

A posição da ASAS pode ser influenciada pelo Modo Anular Sul (Southern Annular Mode – SAM; SUN et al., 2017), o principal modo de variabilidade climática em latitudes médias e altas no Hemisfério Sul (KIDSON, 1988; THOMPSON; WALLACE, 2000). O padrão caracteriza-se por anomalias de sinais opostos de altura de geopotencial em 700 hPa, entre latitudes de 45°S e proximidades da Antártica (THOMPSON; WALLACE, 1998). Na fase positiva (negativa), são observadas anomalias negativas de geopotencial ou de pressão (positivas) em altas (médias) latitudes (GILLET et al., 2006). Carpenedo e Ambrizzi (2020) observaram que na fase positiva do SAM a ASAS posiciona-se

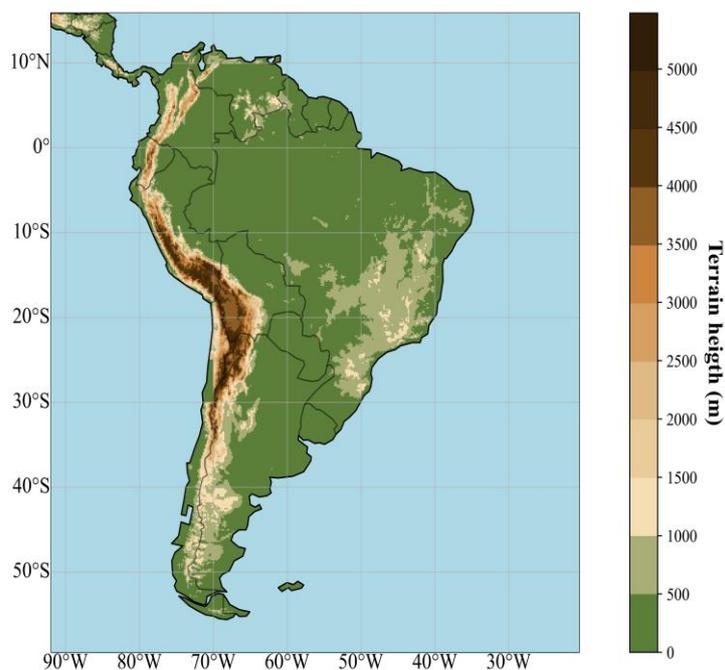
anomalamente para sul, assim como a Zona de Convergência Intertropical, contribuindo com o aumento da precipitação na região norte. Sob efeitos da mesma fase, Gillett et al. (2006) observaram um significativo aquecimento sobre a Argentina e condições de seca no sul da América do Sul. O estudo de Vasconcellos (2012), mostrou que, especificamente para o mês de novembro a fase positiva deste modo está associada a um dipolo de anomalias de precipitação sobre a América do Sul, com anomalias negativas na Bacia do Prata e positivas ao norte, havendo uma inversão durante a fase negativa. Uma redução da duração da estação chuvosa é observada durante a fase negativa do SAM nos trópicos, devido ao enfraquecimento da ZCAS e convecção tropical. (GILLET et al., 2006). De acordo com Reboita et al. (2015), o SAM também pode afetar a frequência de ciclones.

4 DADOS E METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

Neste trabalho foi realizada uma análise dos padrões espaciais de eventos de secas sobre a América do Sul. O continente apresenta um vasto território continental de grande extensão latitudinal, ocupando áreas que compreendem regiões equatoriais, trópicos e extratropicais, favorecendo a existência de uma diversidade de climas distintos. Na Figura 4.1 é mostrado o mapa da área de estudo.

Figura 4.1 Mapa da área de estudo.



4.2 Dados

A insuficiência de dados observacionais bem como a irregularidade espacial, os problemas com a manutenção de estações meteorológicas e a consequente baixa qualidade dos dados observacionais, ainda é uma questão problemática que limita estudos sobre o tempo e o clima na América do Sul. Por este motivo, foram utilizados dados de reanálises atmosféricas e dados de precipitação

resultantes de estimativas de satélites combinados com dados de pluviômetros, com o propósito de contar com uma base de dados mais consistente para a realização do estudo.

Foram utilizadas variáveis atmosféricas em diferentes níveis verticais e também dados de temperatura da superfície do mar, com objetivo de determinar as condições atmosféricas e oceânicas durante eventos de seca. Os dados utilizados compreendem o período que se estende de 1981 a 2019, com resolução temporal mensal, para desta forma realizar um estudo das anomalias mensais e sazonais dos períodos especificados após a análise e homogeneização das áreas quanto aos aspectos físicos das secas. Foram utilizados também dados de fluxo médio mensal de radiação de onda longa (ROL) para analisar anomalias na convecção profunda. Um dos modelos do projeto Climate Models Intercomparison Project- fase 6 (CMIP6) também foi utilizado para a realização de uma análise sobre mudanças nos padrões associados a eventos de seca futuros na América do Sul baseado em suas projeções climáticas. A descrição dos dados e do modelo acima mencionados, é feita nos próximos itens.

4.2.1 Dados de análise

4.2.1.1 Projeto de Climatologia de Precipitação Global versão 2.3 – produto mensal (GPCP – NOAA / OAR / ESRL PSD)

Com o objetivo de identificar os períodos secos por meio de anomalias mensais de precipitação, foi utilizada a nova versão do conjunto de dados mensais do Projeto de Climatologia de Precipitação Global (GPCP) 2.3, fornecida pela NOAA / OAR / ESRL PSD. Estas análises mensais, consistem em uma fusão de distintas estimativas que se baseiam em satélites que cobrem oceano e terra, e pluviômetros em superfície do próprio GPCP. As estimativas baseadas em satélites são combinações entre estimativas de microondas passivas sobre o oceano e a superfície da terra, e estimativas de infravermelho/microondas. O período compreendido dos dados vai de 1979 até o presente, e apresenta resolução espacial de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ com cobertura espacial global (88,75N – 88,75S, 1,25E – 358,75E) (ADLER et al., 2018).

4.2.1.2 Temperatura da superfície do mar reconstruída versão 5 (ERSST V5 - ICOADS)

Com a finalidade de caracterizar as condições oceânicas associadas a anomalias atmosféricas durante os eventos secos, foram utilizados dados mensais reconstruídos de temperatura da superfície do mar global ERSST V5 (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature), derivados do ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Dataset).

O conjunto consta de dados mensais disponíveis desde janeiro de 1854 até o presente, e apresenta uma resolução espacial de $2^{\circ} \times 2^{\circ}$. Neste estudo foi utilizada a versão mais recente do ERSST, V5. A utilização desta base de dados é considerada adequada para estudos globais de longo prazo, sendo variações de escala pequena e local suavizadas (NOAA, 2019).

4.2.1.3 Fluxo médio de radiação de onda longa versão 2.7 - CDR / NOAA

Para identificar padrões de grande escala referentes a regiões de convecção anômala, foram utilizados os dados de fluxo mensal médio de radiação de onda longa (ROL) no topo da atmosfera, provenientes do Climate Data Record (CDR) – NOAA. Foi utilizada a versão mais recente 2.7. Os dados estão disponíveis a partir de janeiro de 1979 até o presente, com atualização mensal, e apresenta resolução espacial de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ (LEE et al., 2018).

4.2.1.4 Reanálise ERA-5 versão 2.0 - médias mensais (ECMWF)

Neste trabalho foi utilizada a reanálise atmosférica ERA-5, a fim de identificar o comportamento atmosférico anômalo associado aos eventos secos, por meio do cálculo da anomalia de campos meteorológicos.

O projeto ERA-5 é a mais recente reanálise produzida pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), desenvolvida utilizando assimilação de dados 4D-Var no CY41R2. Conforme Rabier et al. (2000), o uso consistente de equações do modelo e do método 4DVAR, pode resultar em um uso mais efetivo das observações. O conjunto de dados apresenta resolução espacial de 31 km ($0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$), disponíveis em frequência sub-diária e mensal, as quais consistem em análises de previsões curtas (18 horas).

Apresenta ainda 137 níveis híbridos de pressão em coordenada sigma, nos quais também estão disponíveis dados atmosféricos que são interpolados para 37 níveis de pressão, 16 temperaturas potenciais e 1 nível de vorticidade (COPERNICUS, 2019).

4.2.2 Simulações históricas e projeções futuras utilizando o modelo HadGEM 3 do CMIP6

O CMIP6 produz simulações históricas, referentes ao período que vai de 1850 a 2014, as quais são forçadas com dados observacionais. Tanto o forçamento natural (por exemplo variabilidade solar e aerossóis vulcânicos) quanto devido à atividade humana (concentração de CO₂ e uso da terra, por exemplo), determinarão como se darão as variações climáticas (EYRING et al., 2016).

O modelo climático HadGEM 3 é um dos que compõem o CMIP6, e representa a terceira geração da configuração do Modelo de Ambiente Global do Hadley Center. O mesmo encontra-se disponível em diferentes resoluções; a vertical pode ser escolhida entre 38 níveis, 63 e 85 níveis, e a horizontal varia entre 2,5° x 3,75°, e 0,556° x 0,833°. As principais mudanças em relação às versões anteriores é o acoplamento dos modelos oceânico NEMO e de gelo marinho CICE, por meio do acoplador OASIS, desenvolvidos pelo CERFACS (Centro de pesquisa básica e aplicada – França). A versão conta também com uma configuração do Sistema Terra com vegetação dinâmica, biologia oceânica e química da atmosfera (METOFFICE, 2019). Neste estudo foi utilizada a resolução vertical de 85 níveis e horizontal de 0,556° x 0,833°.

O Projeto de Intercomparação de Modelos com vários Cenários (ScenarioMIP) é considerada a principal atividade do CMIP6. Ele fornece projeções climáticas baseadas em cenários futuros alternativos de emissões e mudanças no uso da terra, produzidas a partir de sistemas de Modelos Integrados de Avaliação (IAMs) (O'NEIL et al., 2016). As simulações realizadas para cenários futuros são inicializadas a partir do final de 2014, período final da simulação histórica (EYRING, et al., 2016). Estes cenários alternativos são chamados “Vias Sócio-econômicas Compartilhadas” (do inglês, SSPs). Conforme O'Neil et al. (2016), SSPs podem ser consideradas como evoluções alternativas da sociedade, e

baseiam-se em desenvolvimento sócio-econômico, sistemas de energia, uso da terra, emissões de gases de efeito estufa e poluição do ar (GIDDEN et al., 2019). Seu desenvolvimento foi realizado para abranger uma série de futuros possíveis em termos de dificuldades sócio-econômicas, cuja implicação é a mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

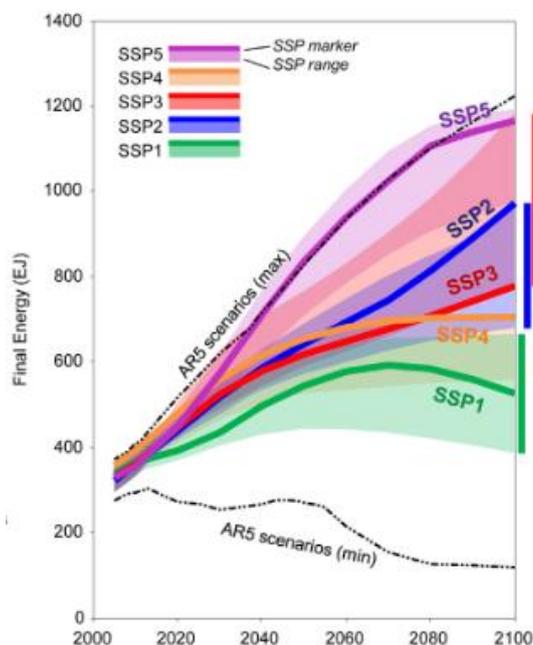
Neste trabalho, foram analisadas as simulações com o cenário mais pessimista, que se refere ao período de 2070-2100. Na Tabela 4.1 a seguir é feita uma breve descrição do cenário mais otimista e mais pessimista.

Tabela 4.1 Descrição dos cenários SSP1-1.9 e SSP5-8.5, para análise de projeções climáticas, baseadas nas descrições de O'Neil et al. (2016), Riahi et al. (2017) e Gidden et al. (2019).

Cenário - CMIP6	Desafios à Mitigação e Adaptação	Descrição
SSP1-1.9	Baixo	O cenário representa o nível mais baixo de forçantes futuras, com a finalidade de atingir o objetivo do Acordo de Paris, que é limitar o aumento da temperatura média global em 1,5°C a mais do que níveis pré-industriais até o final do século XXI. Mudanças graduais do ponto de vista sócio-econômico ocorrem de maneira generalizada, mas de forma sustentável.
SSP5-8.5	Alto	O cenário representa o nível mais alto de caminhos futuros a serem atingidos. É o único cenário do SSP com emissões suficientemente altas para atingir uma forçante radiativa de 8,5 W m ⁻² e aquecimento de até 5°C em relação aos níveis pré-industriais até 2100. Desenvolvimento econômico e social baseado na exploração de combustíveis fósseis.

Como mencionado, cada um destes cenários está associado a diferentes forçantes radiativas futuras, as quais resultam em diferentes níveis de aquecimento global. Para que haja o desenvolvimento desejado, o sistema requer uma quantidade total de energia, conforme é mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 Energia final total demandada (para todos os cenários).



Fonte: Riahi et al. (2017).

O cenário analisado neste estudo foi o mais pessimista – SSP5 – 8.5. De maneira resumida, o cenário baseia-se em um intenso crescimento econômico mundial, caracterizada pelo aumento de renda e redução da desigualdade entre os países. No entanto, tal desenvolvimento é baseado em combustíveis fósseis, com potenciais impactos das mudanças climáticas como resposta (GIDDEN et al., 2019).

4.3 Metodologia

4.3.1 Etapa I

4.3.1.2 Cálculo do índice de precipitação padronizado nos pontos de grade do domínio de estudo

O Índice de Precipitação Padronizado (SPI), desenvolvido por McKee et al. (1993) (do inglês Standardized Precipitation Index) é útil na caracterização e monitoramento de extremos climáticos de chuva. Os dados de entrada para o cálculo do índice devem ser mensais, e o índice pode ser efetuado para distintas escalas de tempo, que vão de 1 a 36 meses, de acordo com a área de

interesse enfatizada pelo estudo. O indicador foi reconhecido pela comunidade operacional como o índice padrão para quantificação de seca meteorológica (KEYANTASH et al., 2018).

O índice é o mapeamento percentual de um valor específico de precipitação obtido por meio de um registro histórico do período de interesse de acumulação, em uma distribuição normal, ajustado à uma distribuição Gama; valores positivos representam precipitação superior à mediana e negativos referem-se a valores inferiores à mediana. Os valores de SPI inferiores a 0 referem-se a períodos secos enquanto valores superiores representam períodos chuvosos.

É necessário inicialmente, ajustar os dados de precipitação a uma função de distribuição de probabilidade a qual seja capaz de representar as séries temporais, em geral a distribuição gama (NURY; HASAN, 2015). Para isto, é recomendada a utilização da distribuição gama, pois a mesma possui bom ajuste para variáveis contínuas com limite inferior igual a zero e sem limite superior, como é o caso da precipitação, e por isto, é amplamente usada em estudos de séries históricas de tal variável (WILKS, 2011). A função gama é dada por:

$$g(x, \alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \quad (4.1)$$

para $X > 0$; sendo $\alpha > 0$ o parâmetro de forma, $\beta > 0$ o parâmetro de escala, $x > 0$ a quantidade de precipitação em milímetros (mm) e $\Gamma(\alpha)$ a função gama completa, cuja definição para $\alpha > 0$ é dada por:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (4.2)$$

E α e β estimados por:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \quad (4.3)$$

e

$$\hat{\beta} = \frac{\hat{x}}{\alpha} \quad (4.4)$$

sendo \hat{x} a precipitação média, e A dado por

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (4.5)$$

dado que n é o número de observações.

As estimativas dos parâmetros mencionados são utilizadas para derivar a probabilidade cumulativa dos valores de precipitação para determinadas escalas temporais.

$$f(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{(\alpha-1)} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (4.6)$$

Na Tabela 4.2 é mostrada a classificação desenvolvida por McKee et al. (1993) de períodos secos e chuvosos, baseados nos valores de SPI encontrados. Neste trabalho, o cálculo do SPI foi calculado para identificação dos períodos de seca sobre a América do Sul, em cada área homogênea de variabilidade de precipitação. Foram considerados para este estudo, aqueles eventos que apresentaram classificação de seca moderada, severa e extrema.

Tabela 4.2 Classificação de períodos secos e chuvosos por meio do SPI, conforme McKee et al. (1993). São destacados em cinza os valores que representam eventos de seca, os quais foram estudados neste trabalho.

SPI	Classificação
< -2	Seca Extrema
-1,99 a -1,5	Seca Severa
-1,49 a -1	Seca Moderada
-0,99 a 0	Seca Leve
0 a 0,99	Chuvoso Leve
1 a 1,49	Chuvoso Moderado
1,50 a 1,99	Chuvoso Severo
> 2	Chuvoso Extremo

A principal vantagem da utilização do SPI como indicador de seca meteorológica, é o uso apenas da precipitação para seu cálculo, além de permitir a caracterização do evento em diferentes escalas de tempo, possibilitando aplicá-lo no monitoramento da disponibilidade hídrica para fins diversos. É utilizado para estudar distintos aspectos relacionados a eventos de seca, como por exemplo previsão (MISHRA; DESAI, 2005a; MISHRA et al., 2007), análise de frequência (MISHRA et al., 2009), análise espaço-temporal (MISHRA; DESAI, 2005b; MISHRA; SINGH, 2009) e estudos de impacto climático (MISHRA; SINGH, 2009).

O período de dados de interesse para realização deste estudo foi de 1981 a 2019. A escala de tempo escolhida para o cálculo do SPI foi de um mês, pois representa bem os eventos de seca classificados como meteorológicos. Ele foi calculado com objetivo de identificar um padrão geral de variabilidade de precipitação em cada ponto de grade da América do Sul.

4.3.2 Etapa II

4.3.2.1 Determinação das áreas homogêneas

4.3.2.1.1 Análise de Componentes Principais (ACP) e definição do conjunto de grupos iniciais

O primeiro passo para o efetivo gerenciamento da avaliação de risco de seca em determinada região, é dividi-la em sub-regiões, de acordo com suas respectivas variabilidades espacial e temporal (WILHITE; SVOBODA, 2000). Sendo assim, em estudos com domínio de vasta extensão, composto por diferentes regimes de chuva e de climas distintos, é fundamental identificar e caracterizar os padrões atmosféricos predominantes durante os eventos. A determinação de comportamentos semelhantes ou diferentes entre áreas com aspectos geográficos únicos, permite o agrupamento de regiões e a caracterização dos fatores que influenciam a variabilidade climática em cada um dos grupos formados.

A Análise de Componentes Principais (ACP), também conhecida por Funções Ortogonais Empíricas (EOF), refere-se a uma técnica estatística amplamente utilizada em estudos sobre padrões de tempo e clima. O método, de análise multivariada, reduz a dimensionalidade dos dados originais, enfatizando padrões e também a relação entre variáveis e observações (KAHYA et al., 2008a). Por este motivo, a técnica foi empregada neste estudo aos dados de SPI, calculados para cada ponto de grade do domínio estudado, a fim de classificar e definir áreas que apresentem variabilidade de precipitação similar. O resultado da primeira componente principal (aquela que apresenta maior variância explicada), demonstrará a existência de um número determinado de regiões com regimes de chuva semelhantes em cada estação. Este número foi utilizado como o número para inicialização da técnica aplicada posteriormente – Análise de Agrupamento Não-Hierárquico. Como esse método de agrupamento necessita ter um valor inicial de grupos, foi realizada a ACP para a obtenção desse número inicial.

Essa redução ocorre através de combinações lineares entre as variáveis originais, escolhidas de maneira a representar a fração máxima possível da

variabilidade nelas contidas, dando origem a novas variáveis; quanto maior for a compactação dos dados originais em novas variáveis, mais eficaz será o método PCA. Os elementos que compõem os novos vetores com combinações lineares são chamados de componentes principais (WILKS, 2011). O mesmo autor sugere que, usualmente, é conveniente calcular essas componentes principais como combinações lineares de anomalias (como neste estudo, em que serão calculadas para anomalias normalizadas).

Dadas k variáveis em um certo período de tempo i , $X_{i,1}$, $X_{i,2}$, ..., $X_{i,k}$, k componentes principais são produzidas para os mesmos intervalos de tempo $Y_{i,1}$, $Y_{i,2}$, ..., $Y_{i,k}$, usando das primeiras, de acordo com:

$$\begin{aligned}
 Y_{i,1} &= a_{11} X_{i,1} + a_{12} X_{i,2} + \dots + a_{1k} X_{i,k} \\
 Y_{i,2} &= a_{21} X_{i,1} + a_{22} X_{i,2} + \dots + a_{2k} X_{i,k} \\
 &\dots \\
 Y_{i,k} &= a_{k1} X_{i,1} + a_{k2} X_{i,2} + \dots + a_{kk} X_{i,k}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Sendo as variáveis $X_{i,k}$ referentes à série SPI, e k igual ao número de pontos de grade do domínio estudado, e i referente ao comprimento da série SPI em cada um destes pontos. Já Y representa variáveis ortogonais não correlacionadas, sendo $Y_{i,1}$ a que explica a maior parte da variância, diminuindo gradativamente nas combinações lineares posteriores. Os coeficientes presentes nestas combinações são chamados de “loadings” e representam os pesos das variáveis originais. Segundo Wilks (2011), as novas variáveis ou componentes principais, que são os elementos do vetor Y , responderão sucessivamente à quantidade da máxima variabilidade conjunta de x , e serão definidas unicamente pelos autovetores da matriz de covariância dos elementos iniciais; em particular, cada componente principal é obtida como uma projeção do vetor de dados x no autovetor correspondente.

Os autovetores representam, em termos geométricos, em qual direção do espaço dimensional das variáveis originais, que os vetores de dados apresentam de forma conjunta maior variabilidade; o primeiro autovetor está associado ao primeiro autovalor e assim sucessivamente.

Há duas principais formas de analisar autovetores associados a variável estudada: no tempo (Modo T) ou no espaço (Modo S). Enquanto o modo T é aplicado á análise de campos espaciais em tempos diferentes, o modo S envolve a análise de séries temporais, para determinar subgrupos de pontos de grade que covariam de maneira similar (RICHMAN, 1986). Richman e Lamb (1985) sugeriram que, por ser a precipitação uma variável considerada contínua no tempo e no espaço, o método é o adequado para regionalização de parâmetros. Como o modo S permite a identificação de áreas homogêneas quanto à variabilidade temporal (COMPAGNUCCI et al., 2001), o mesmo foi empregado neste trabalho com o propósito de identificar os grupos iniciais da análise de agrupamento não-hierárquica. Muitos autores mencionam que a técnica tem sido amplamente utilizada em conjunto com a análise de cluster, com tal finalidade (COLEMAN; ROGERS, 2007; KALKSTEIN, et al., 1987).

O primeiro autovalor l_1 é a quantidade explicada pela primeira componente principal; cada autovalor representa a fração total nos dados originais e é explicada por cada componente (BORDI; SUTERA, 2001), sendo calculado como:

$$l/\sum l_j \quad (4.8)$$

4.4.2.1.2 Análise de agrupamento não-hierárquica - definindo áreas homogêneas em relação ao SPI

A análise de agrupamento é uma ferramenta estatística exploratória de grande utilidade para estudos climáticos. O conjunto de técnicas, também conhecido por análise de cluster, é utilizado com o propósito de avaliar a similaridade de objetos individuais em um conjunto de dados (SANTOS et al., 2010), e desta forma, agrupá-los de maneira que possam ser identificadas áreas homogêneas quanto às suas respectivas características. Na literatura meteorológica são encontradas diversas aplicações desta técnica, como por exemplo o agrupamento de trilhas semelhantes de furacões (ELSNER, 2003), ou ainda aplicada a dados de altura geopotencial na tentativa de identificação de regimes distintos de fluxo atmosférico (MO; GHIL, 1988; CHENG; WALLACE,

1993). Gong e Richman (1995) sumarizaram as aplicações do método em cinco categorias:

- 1) Regionalização climática para um parâmetro meteorológico específico;
- 2) Regionalização climática mais geral através da utilização de vários parâmetros meteorológicos;
- 3) Circulação atmosférica de larga escala e análise de padrões sinóticos;
- 4) Pesquisa da composição elementar da atmosfera;
- 5) Estudos hidrometeorológicos, em especial para bacias hidrográficas.

Os mesmos autores discutiram sobre noções básicas desta metodologia, como o tipo de dados iniciais, os quais devem consistir em uma matriz $k \times n$ de medidas x , onde considera-se que tratam-se de n pontos em um espaço dimensional k . Posteriormente esta matriz é transposta (passando a ser uma matriz $n \times k$), sendo então os dados desta matriz utilizados como dados de entrada, ou seja, serão as observações a serem agrupadas. De acordo com Wilks (2011), os grupos nos quais estarão as observações classificadas não é conhecido a priori, mas determinado pelo grau de similaridade ou dissimilaridade entre estas observações individuais x , as quais serão usadas para definir grupos e atribuir adequadamente membros a eles. Portanto, conforme o mesmo autor, o método baseia-se na ideia de distância para agrupar os pontos; a distância entre pontos que compõem um mesmo grupo deverá ser pequena em relação à distância entre grupos, e este deve ser o primeiro passo quando realizada a análise de cluster. Uma das medidas de distância mais utilizadas em pesquisas da área de geofísica é a distância Euclidiana, que será utilizada neste trabalho, dada pela seguinte equação:

$$d_{ij} = \left[(x_i - x_j)^T (x_i - x_j) \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

Onde d_{ij} é o valor da Distância Euclidiana, e x_{ij} representa os j -ésimos valores dos vetores de coluna da matriz X , para as j -ésimas observações.

Os métodos de cluster podem ser divididos em hierárquicos e não-hierárquicos. Wilks (2011) menciona que uma das vantagens da utilização deste último em relação ao primeiro, é permitir a reatribuição de observações a outros grupos à medida que a análise prossegue; no caso hierárquico, uma vez que um vetor de dados x tenha sido atribuído a um grupo, permanecerá neste grupo e em outros com os quais ele é mesclado. Além disso, Gong e Richman (1995) observaram em seu estudo que este tipo de análise, como o algoritmo k-means, superou a hierárquica quando testada em dados de precipitação. Baseado na literatura mencionada acima, e considerando que a técnica descrita seria empregada a dados de SPI, a metodologia utilizada neste trabalho foi a de análise de agrupamento não-hierárquica e a abordagem matemática k-means. A ideia central deste método é que o número inicial de clusters seja pré-definido; neste caso, a especificação destes grupos, chamados em alguns trabalhos como pontos sementes, foi realizada através da prévia análise de componentes principais. A utilização da técnica se deu para que fossem obtidas regiões com padrões similares referentes a variabilidade de chuvas. O conjunto de passos que descreve esta técnica está em Wilks (2011):

- 1) Tendo definidos os grupos iniciais (pontos semente), calcular os centróides (isto é, meios vetoriais) para cada cluster, pela fórmula:

$$y_{mj} = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} X_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, p; m = 1, 2, \dots, k) \quad (4.10)$$

- 2) Calcular a distância Euclidiana entre o vetor de dados e os centróides, atribuindo cada um ao cluster com centróide mais próximo para obter uma partição inicial;
- 3) Se x já é membro do grupo cuja média é a mais próxima, o passo anterior deve ser repetido para o próximo x ; caso contrário, x deve ser reatribuído ao grupo cuja média é a mais próxima e voltar ao passo (1).

Desta maneira, são agrupadas as regiões de aspectos climatológicos que indicam condições de seca em áreas homogêneas, e identificadas, portanto, aquelas que apresentam características semelhantes.

4.3.3 Etapa III

4.3.3.1 Identificação dos casos de seca em cada região homogênea

Identificadas as regiões homogêneas através do método de agrupamento, foi calculado novamente o SPI, desta vez separadamente para cada uma das áreas definidas, com o objetivo de determinar os respectivos períodos de seca, bem como realizar a classificação da severidade dos eventos. O SPI foi calculado para cada mês, escala para a qual é considerada principalmente para um indicador de seca meteorológica (HAYES et al., 1999).

4.3.3.2 Caracterização dos processos oceânicos e atmosféricos associados aos eventos de seca

Com objetivo de identificar padrões atmosféricos e oceânicos atuantes relacionadas às áreas de seca homogêneas definidas, foram calculadas as anomalias mensais de diferentes campos, tendo como base para o cálculo o período climatológico 1981-2010. Posteriormente, os compostos das anomalias foram calculados para as seguintes variáveis/parâmetros referentes aos campos citados: precipitação, altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa, componente meridional e vertical ômega em todos os níveis sobre a América do Sul, pressão a nível médio do mar (PNMM), fluxo de umidade integrado na vertical (entre os níveis de 1000 hPa e 500 hPa), temperatura em 2 metros de altura, temperatura da superfície do mar (TSM), e radiação de onda longa (ROL).

Para analisar a representatividade dos eventos secos identificados, em relação à média do período histórico, foi calculada a significância estatística da precipitação, utilizando o teste T Student. A técnica é comumente utilizada para estabelecer uma comparação entre médias de grupos distintos, determinando se a diferença entre elas é estatisticamente significativa (MISHRA et al., 2019). Ele consiste na formulação estatística de duas hipóteses: nula (H_0), a qual será rejeitada, e alternativa (H_A), que, em termos gerais, contradiz a hipótese

anterior (WILKS, 2011). Neste caso, a hipótese nula sugere que a média dos casos de seca seja igual à climatologia, e portanto, a hipótese alternativa a ser considerada, é de que a média dos compostos seja diferente da climatologia. Abaixo é mostrada a fórmula utilizada para o cálculo do teste T Student:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (4.11)$$

Onde

\bar{x} é a precipitação média dos eventos de seca identificados

μ é a climatologia da precipitação

s é o desvio padrão para os casos de seca

n é o número de casos secos

O nível de significância considerado (probabilidade de rejeição da hipótese nula quando ela for verdadeira) foi de 0,1 (10%).

A análise das anomalias de tais campos permite identificar possíveis alterações na circulação atmosférica em escala regional e grande escala, bem como de transporte de umidade para o continente e regiões afetadas, e a consequente diminuição da quantidade de vapor d'água disponível na coluna atmosférica. Além disso, é possível definir se houve atuação de algum padrão ondulatório anômalo específico associado a períodos secos em cada área homogênea identificada, capaz de alterar o comportamento atmosférico sobre a América do Sul e a circulação em grande escala, causando diminuição das chuvas. Também é possível observar a influência de anomalias de TSM sobre a circulação geral da atmosfera e possíveis impactos sobre a área estudada. São analisadas a convecção no Pacífico Oeste e Indonésia, e a interação trópicos – extratropicais através de trens de onda.

4.3.4 Etapa IV

4.3.4.1 Eventos de seca: comparação entre a reanálise ERA5 E HadGEM3 (simulações históricas e projeções futuras)

Identificados os padrões espaciais de secas na América do Sul, a partir da reanálise ERA-5, foram repetidos os procedimentos para caracterização espacial de episódios secos na América do Sul, utilizando-se as simulações referentes ao período histórico do HADGEM3, 1981-2014 e projeções para o período 2070-2100. As áreas analisadas na simulação e projeção foram as mesmas obtidas na análise observacional, para que fosse possível fazer o diagnóstico e comparações.

A comparação consiste em analisar os padrões atmosféricos e oceânicos associados aos eventos de seca, afim de identificar a configuração espacial predominante para cada base de dados utilizada.

5 DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS HOMOGÊNEAS

5.1 Análise de componentes principais – modo S

Tendo uma série temporal de dados de SPI para cada ponto de grade, torna-se fundamental identificar áreas que apresentem padrão de variabilidade semelhante, e assim, caracterizar áreas sobre o continente que possuam um regime de chuvas com comportamento espacial semelhante.

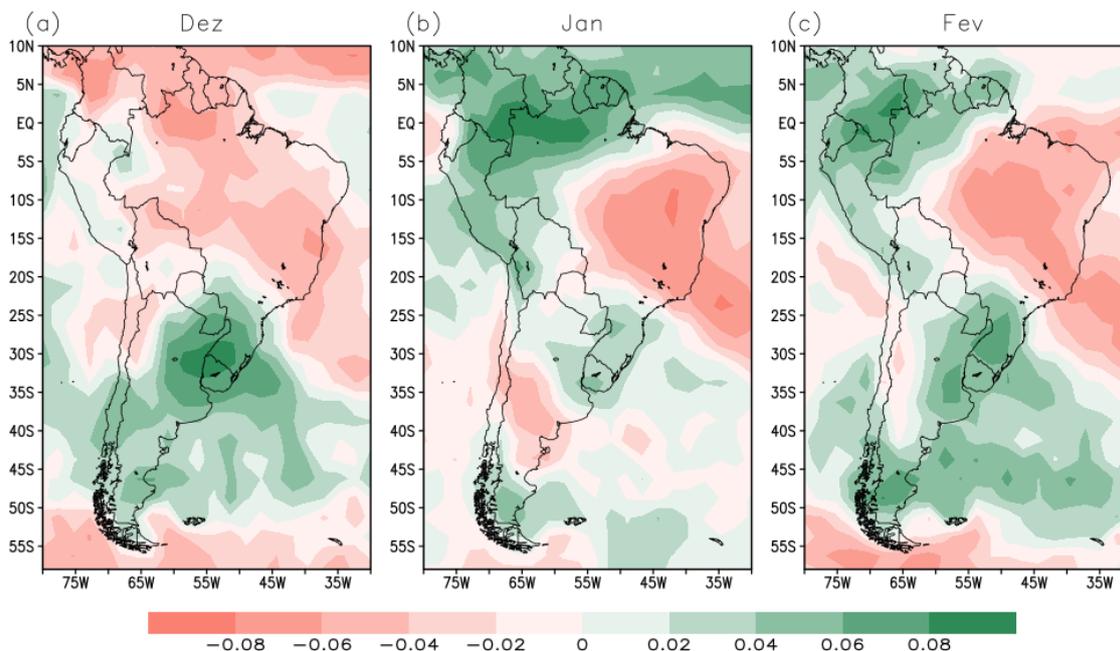
Após a realização do cálculo do SPI 1 em cada ponto de grade da área estudada, separadamente para cada mês, foi obtida a distribuição espacial do indicador por mês, compreendendo o período de 1982 – 2019. A estes conjuntos de dados foi aplicada a técnica estatística multivariada Análise de Componentes Principais, e extraída da mesma, a primeira componente principal, cujo valor representa a maior variância explicada, e portanto, representa o modo dominante da variabilidade conjunta de dados.

Na Figura 5.1 é mostrada a primeira componente principal obtida para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, respectivamente. É perceptível que durante este período, que corresponde ao verão e início da estação chuvosa de monção do continente, há sinais opostos sobre a região de formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que estende-se no sentido NO-SE no continente, e sobre a região sul do Brasil, incluindo Uruguai e nordeste da Argentina, região conhecida como Sudeste da América do Sul (SESA).

Esse padrão de dipolo foi previamente discutido em outros estudos, como Mo e Peagle (2001), Carvalho et al. (2002), Cunningham e Cavalcanti (2006), Gonzales e Vera (2014), Cavalcanti et al. (2017), Vera et al. (2018), e pode ser associado à variabilidade apresentada pela ZCAS, e também ao trem de ondas PSA (Pacific South America), que dispõe de centros de anomalias da circulação alternados sobre o Oceano Pacífico e América do Sul. Nos meses de Dezembro (Figura 5a) e Fevereiro (Figura 5c) observa-se uma região de mesmo sinal desde o sul do Brasil até o sul da Argentina e Chile. Durante o mês de janeiro (Figura 5b), o padrão espacial demonstrado na análise apresenta outras 2 subregiões na Argentina, uma abrangendo a região mais central do país, e outra no extremo sul.

Figura 5.1 Primeira componente principal para os meses de Dezembro (a), Janeiro (b) e Fevereiro (c).

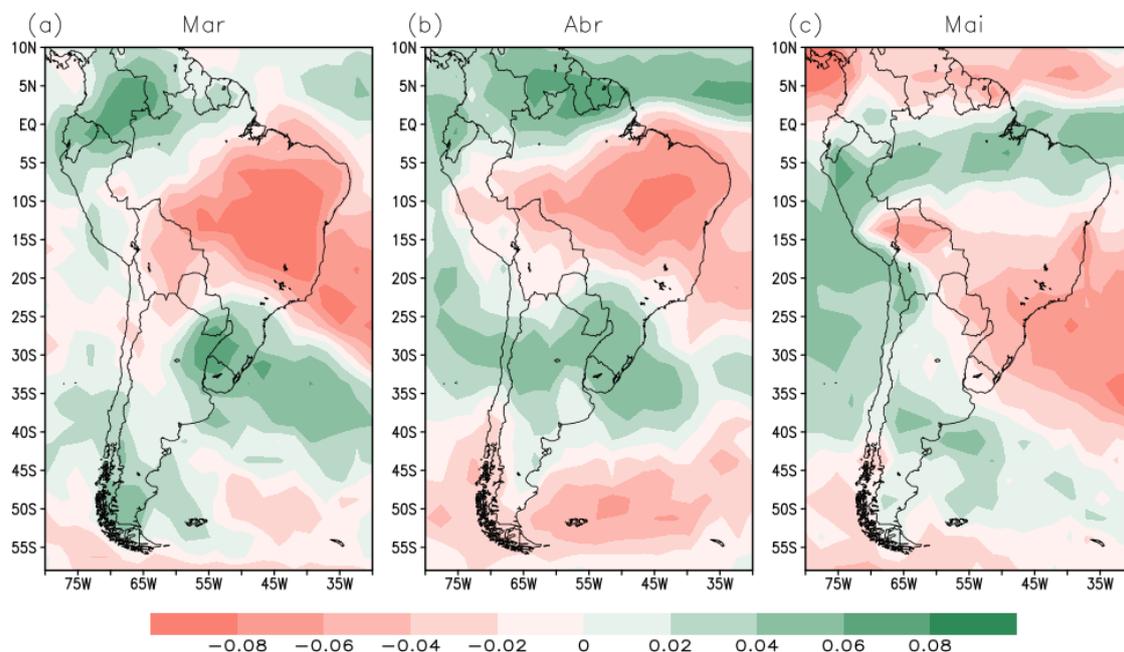
EOF – Componente Principal 1 (SPI)



Na Figura 5.2 são mostrados os padrões determinados pela primeira componente principal dos meses de março, abril e maio, respectivamente, os quais correspondem ao outono. Especialmente nos dois primeiros meses (Figura 5a e 5b), o padrão predominante, que consiste em um dipolo entre SESA e a região SE e central do continente, incluindo NE do Brasil, também é observado, porém, com uma área mais abrangente em latitudes mais altas, compreendendo grande parte da Argentina. Assim como em dezembro e fevereiro, uma área de mesmo sinal aparece sobre o noroeste do continente. No mês de maio (Figura 5c) o padrão espacial identificado mostra-se diferente dos demais meses da mesma estação, o que pode estar associado ao fato de tratar-se de um mês de transição entre os períodos chuvoso e seco.

Figura 5.2 Primeira componente principal para os meses de Março (a), Abril (b) e Maio (c).

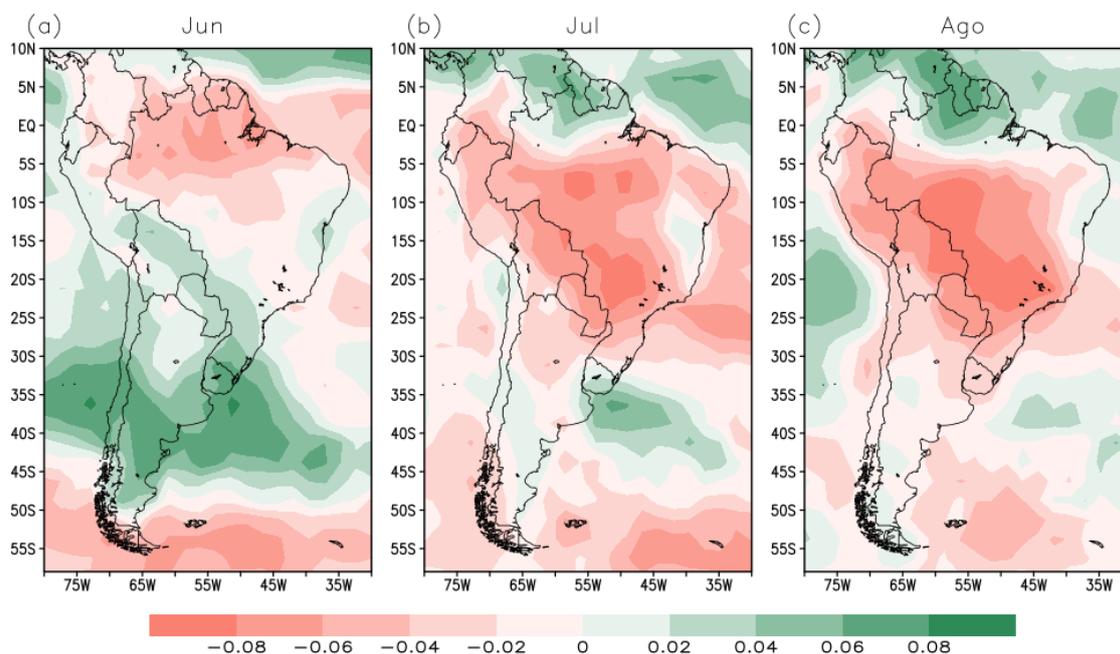
EOF – Componente Principal 1 (SPI)



Quando se analisa as componentes principais obtidas para o trimestre do inverno – junho, julho e agosto, na Figura 5.3 observa-se que as mesmas apresentam uma área em comum: o litoral leste do NE. Durante este período, tem-se a intensificação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, estendendo-se mais a dentro do continente. No NE, o escoamento do vento, favorece a convergência de umidade advectada do oceano Atlântico, provocando chuvas nesta região. Na distribuição obtida para o mês de junho, predominam duas grandes áreas. A área ao sul pode ser relacionada ao aumento da frequência de distúrbios sinóticos, associados à instabilidade baroclínica em latitudes mais altas, resultante do avanço de um maior número de sistemas frontais na região. Por outro lado, a grande área com sinal mais forte no norte do Brasil, pode ser associada ao início da estação seca, e deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para norte com a chegada do inverno. Em julho e agosto grande parte da América do Sul apresenta sinal contrário ao do extremo norte do continente.

Figura 5.3 Primeira componente principal para os meses de Junho (a), Julho (b) e Agosto (c).

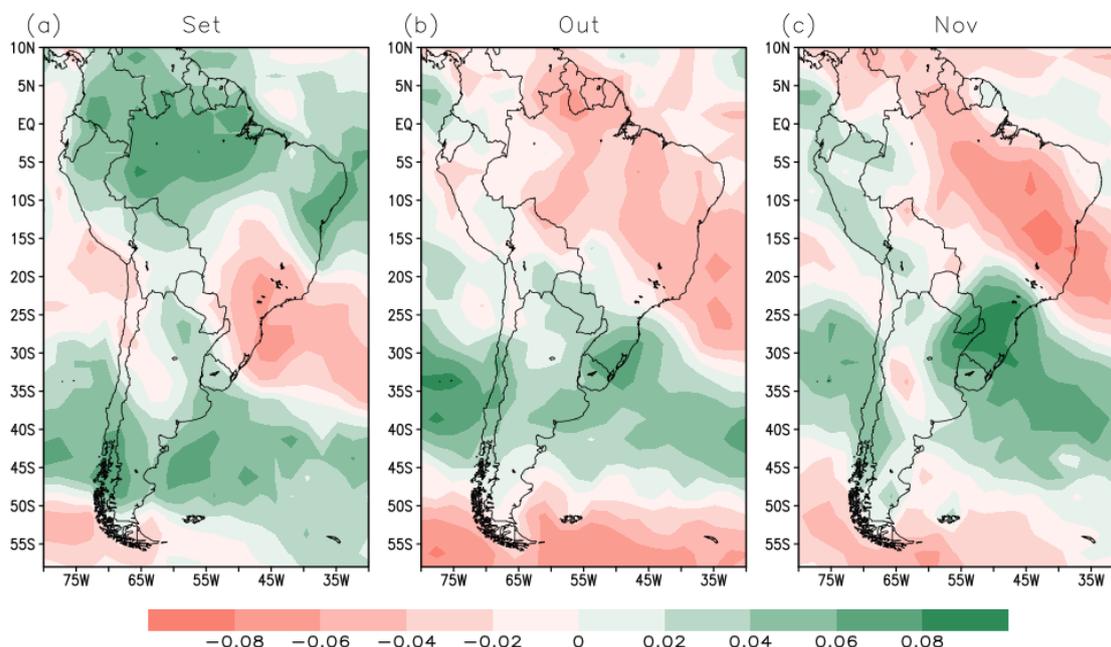
EOF – Componente Principal 1 (SPI)



As componentes principais para o trimestre da primavera (setembro, outubro e novembro) são apresentadas na Figura 5.4. Elas demonstram um padrão espacial que se assemelha àquele encontrado nos meses do verão, com a presença de um dipolo entre SESA e a área de formação da ZCAS, incluindo o NE. Esta configuração está relacionada à chegada da estação chuvosa, e desenvolvimento de sistemas como a ZCAS.

Figura 5.4 Primeira componente principal para os meses de Setembro (a), Outubro (b) e Novembro (c).

EOF – Componente Principal 1 (SPI)



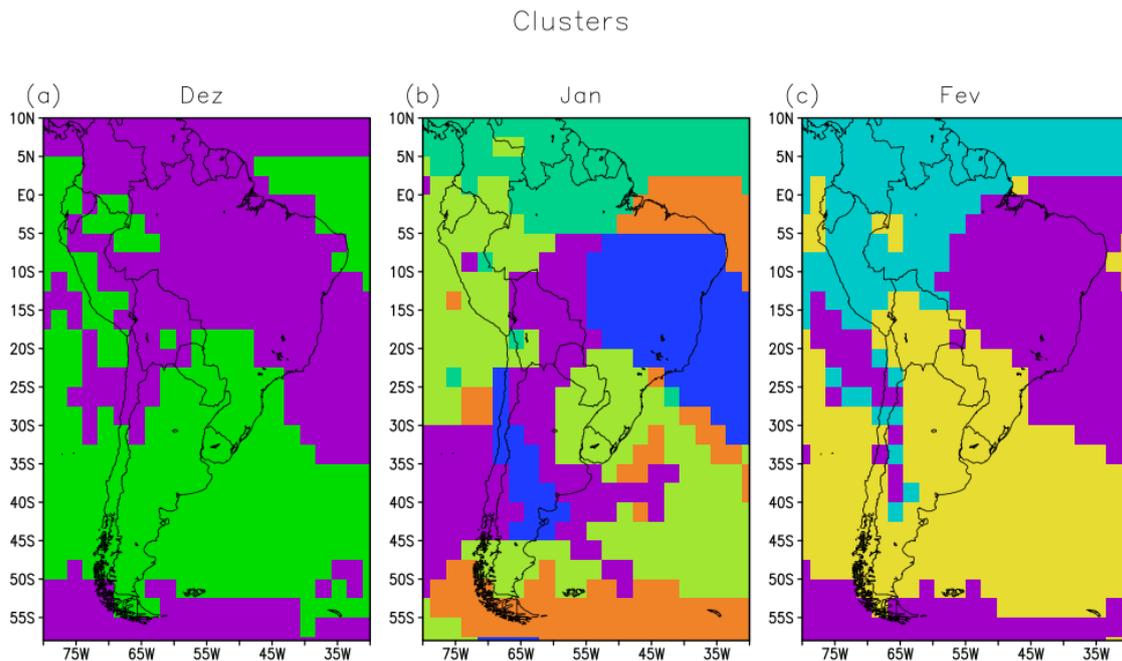
5.2 Determinação das áreas homogêneas – análise de agrupamento não-hierárquica

Tendo o número de grupos iniciais definido pela ACP, a técnica de AANH, que determinou a caracterização espacial, foi dividida em grupos homogêneos quanto à precipitação. Antes de analisar os resultados da AANH foram estabelecidas algumas condições para contabilização do cluster:

- 1) Extensão territorial do grupo de uma determinada área homogênea deve ser representativa;
- 2) Devem ser contabilizados e analisados os grupos que abrangem regiões relevantes, ou seja, aquelas que podem ter mais impactos em caso de episódios de seca, tanto do ponto de vista socioeconômico como ambiental.
- 3) Os grupos devem ser escolhidos de maneira a proporcionar a representação da variabilidade de chuvas em todo o trimestre no qual o mês está inserido (DJF, MAM, JJA e SON), facilitando desta forma, a

análise. As áreas selecionadas são mostradas nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

Figura 5.5 Caracterização espacial dos grupos a partir do agrupamento de áreas homogêneas (AANH) para os meses de Dezembro (a), Janeiro (b) e Fevereiro (c).

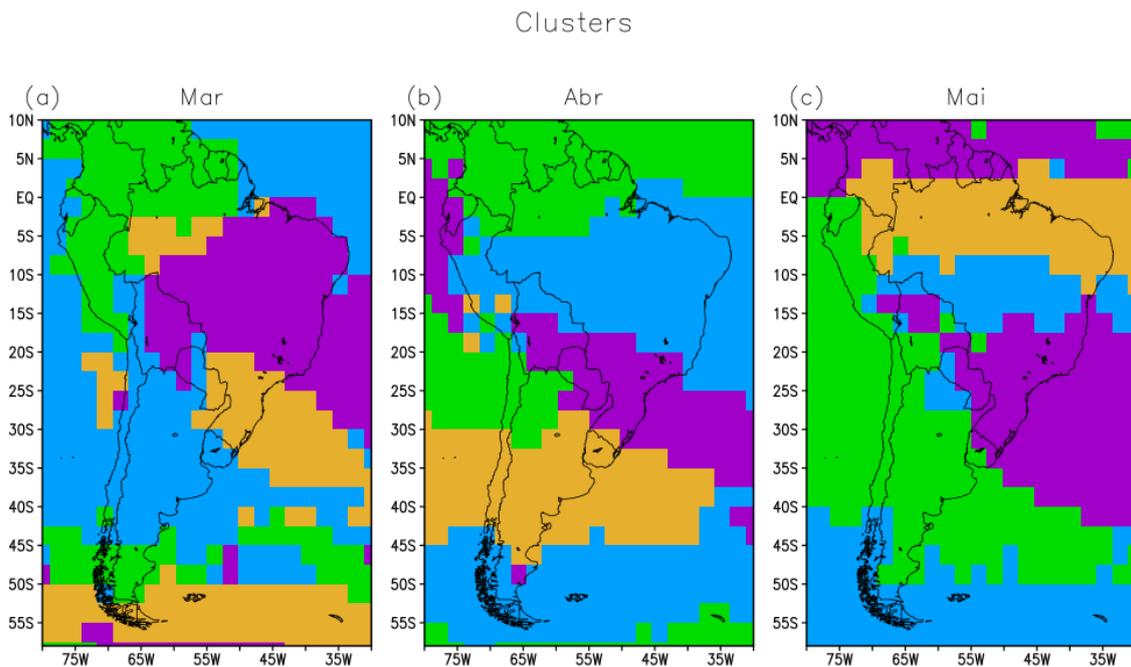


Embora os agrupamentos formados tenham resultado em número de clusters distintos, em DJF (Figura 5.5), alguns aspectos são semelhantes para ambos os períodos (a, b e c), como o grupo que abrange a bacia do Prata. Também observa-se a formação de uma outra área homogênea que estende-se do SE brasileiro, incluindo a maior parte do território do NE, norte do CO e leste da região N. Nos meses de Janeiro (b) e Fevereiro (c) um outro grupo no norte do continente, o qual também foi considerado neste estudo, devido à sua importante posição geográfica, uma vez que abrange parte da Amazônia.

No outono (Figura 5.6), obteve-se um agrupamento que resultou em 4 distintos grupos: o mais ao sul, compreendendo a metade sul do RS, Uruguai e centro-leste da Argentina; um segundo grupo abrangendo o centro-norte da região sul do Brasil, sul do CO e oeste da região SE; uma área homogênea abrangendo a

região central do continente e por fim, uma um cluster entre o leste da região norte do Brasil e norte do NE.

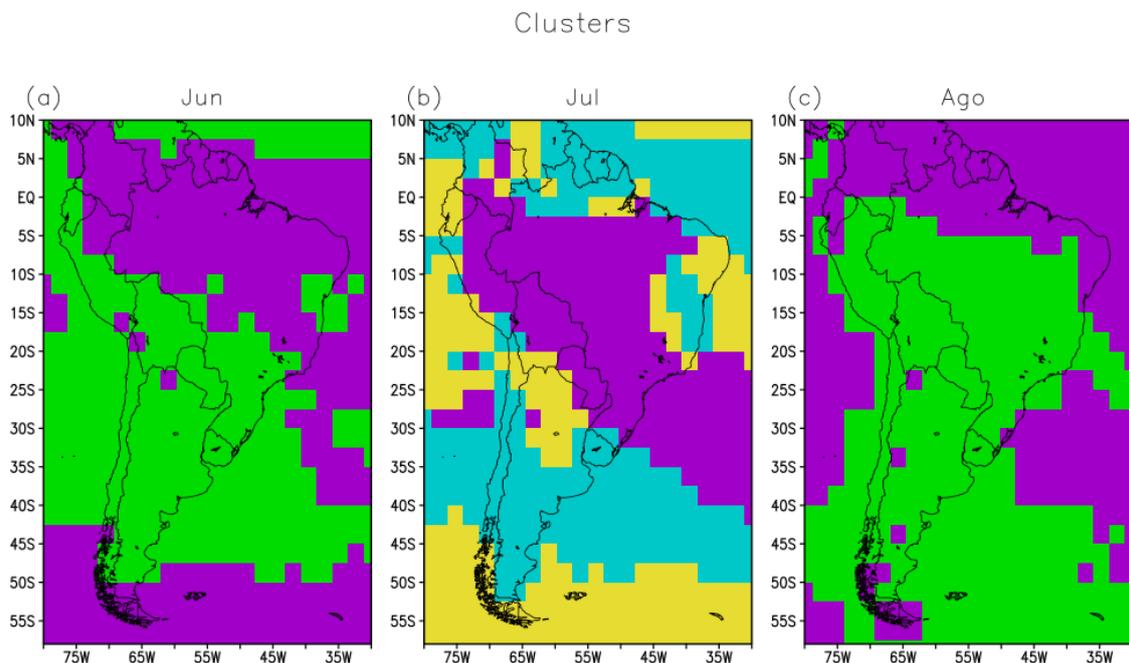
Figura 5.6 Caracterização espacial dos grupos obtidos a partir do agrupamento de áreas homogêneas (AANH) para os meses de Março (a), Abril (b) e Maio (c).



A caracterização espacial definida pelo agrupamento de clusters durante o inverno austral, mostrada na Figura 5.7, foi o que apresentou maiores diferenças de mês para mês. Ainda que os meses de junho e agosto apresentem o mesmo número de grupos (2 áreas homogêneas), as respectivas disposições são consideravelmente distintas. O comportamento heterogêneo da variabilidade de chuvas no continente em julho (Figura 5.7 b), considerado em muitas áreas tropicais como o pico da estação seca de monção, foi determinante para identificação dos grupos; isto porque, junho e agosto (respectivamente a e c), podem apresentar ainda um comportamento de transição entre as estações, tendo portanto, um padrão atmosférico pouco definido. Desta forma, foram identificados 4 grupos diferentes: o primeiro, mais a sul, abrangendo o sul do Brasil, Uruguai e centro-leste da Argentina, uma

segunda área, que abrange parte da região que corresponde à Bacia do Prata, compreendendo a metade norte do sul do Brasil, Paraguai, sul do CO do Brasil e oeste do SE; uma terceira área foi identificada sobre o norte do CO brasileiro e sul da Amazônia e leste da Bolívia, e por fim, um cluster identificado no norte do Brasil.

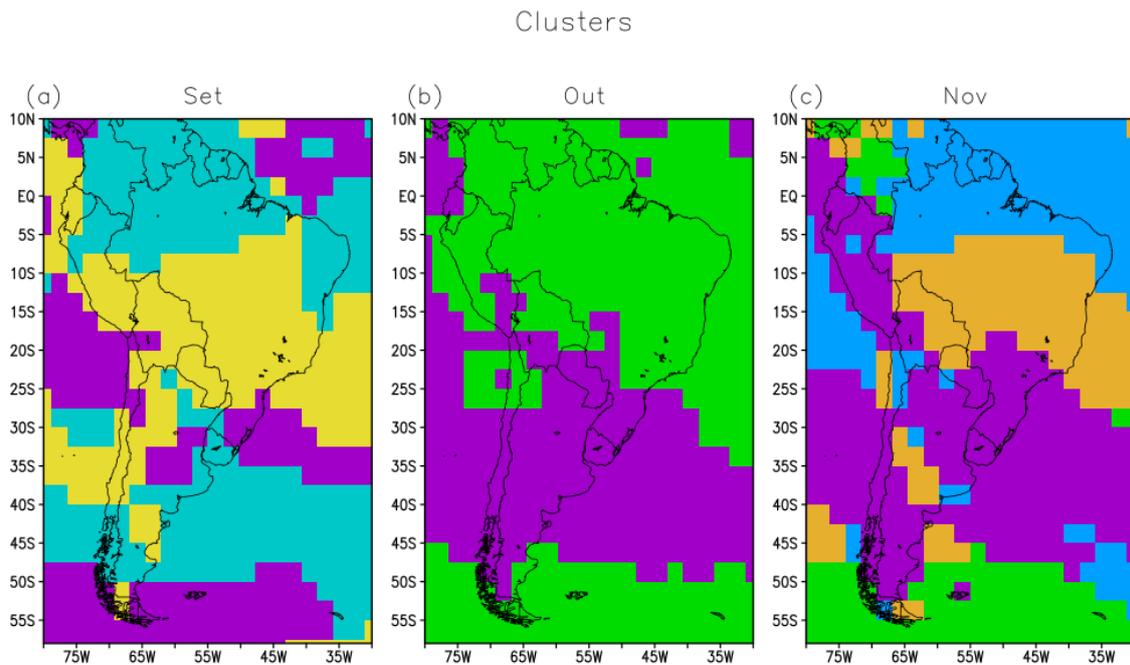
Figura 5.7 Caracterização espacial dos grupos obtidos a partir do agrupamento de áreas homogêneas (AANH) para os meses de Junho (a), Julho (b) e Agosto (c).



Os clusters obtidos por meio da análise de agrupamento para os meses da primavera são mostrados na Figura 5.8, correspondendo aos meses de Setembro (a), Outubro (b) e Novembro (c). Apenas durante o segundo mês do referido período (b), observa-se uma configuração espacial diferente, onde apenas duas áreas homogêneas foram identificadas. Considerando Setembro (b) e Novembro (c), outros grupos foram identificados: um mais ou norte do continente, compreendendo o norte da Amazônia brasileira; um segundo grupo, incluindo a Bolívia e oeste da região CO do Brasil; o terceiro grupo, abrangendo uma parte considerável do SE brasileiro, oeste do CO e leste da

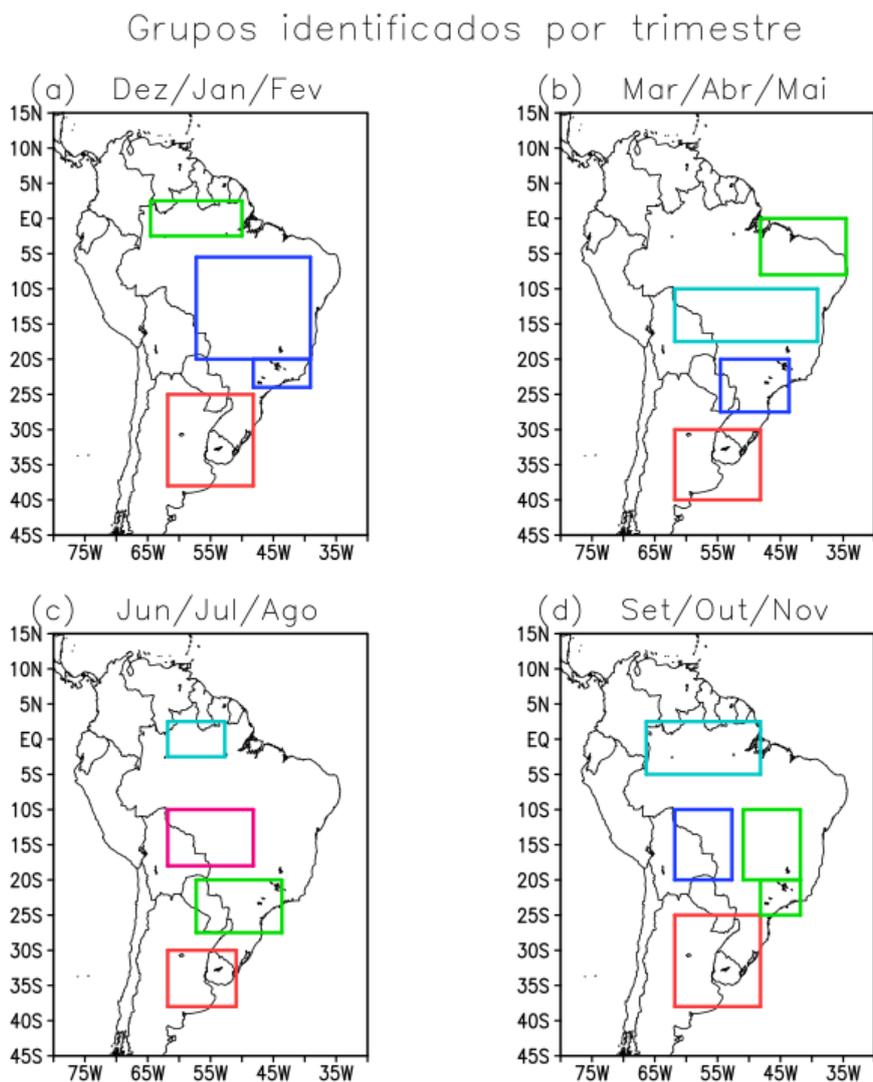
região NE; e por fim, um grupo mais ao sul, que compreende praticamente toda região sul do Brasil, Uruguai, Sul do Paraguai e leste da Argentina.

Figura 5.8 Caracterização espacial dos grupos obtidos a partir do agrupamento de áreas homogêneas (AANH) para os meses de Setembro (a), Outubro (b) e Novembro (c).



Com a finalidade de identificar os casos de seca nas regiões homogêneas, foram consideradas algumas áreas dentro dessas regiões, que fossem comuns nos 3 meses em cada trimestre do ano, apresentadas na Figura 5.9. Conforme mostrado, foram definidas 3 áreas homogêneas em DJF (Figura 5.9a) e 4 nas demais estações (Figura 5.9 b, c e d). Durante as discussões, essas regiões serão identificadas com a letra inicial da estação a que se refere: A1V, A2V e A3V (Áreas 1, 2 e 3 Verão), A1O, A2O, A3O e A4O (Áreas 1, 2, 3 e 4 Outono), A1I, A2I, A3I e A4I (Áreas 1, 2, 3 e 4 Inverno) e A1P, A2P, A3P e A4P (Áreas 1, 2, 3 e 4 Primavera).

Figura 5.9 Áreas homogêneas definidas a partir do método de AANH, e classificadas por áreas comuns nos meses de cada estação: DJF (a), MAM (b), JJA (c) e SON (d).



6 IDENTIFICAÇÃO DOS EVENTOS SECOS – OBSERVAÇÃO (GPCP)

Após identificadas as regiões homogêneas através do método de agrupamento, foi calculado novamente o SPI, especificamente para cada uma destas áreas, com objetivo de determinar os respectivos eventos de seca ocorridos e classificá-los de acordo com a intensidade.

6.1 Frequência e intensidade de eventos secos

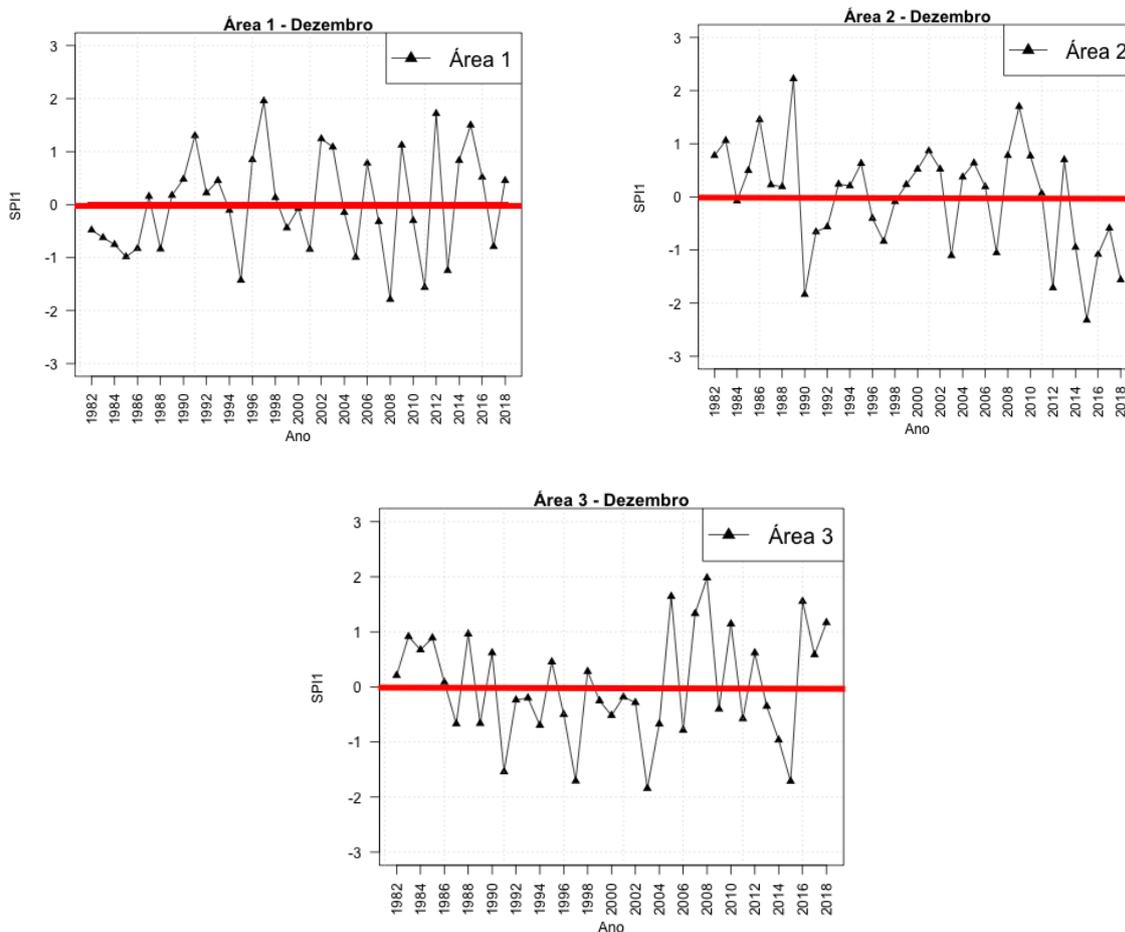
Na Tabela 6.1 são mostrados os eventos e respectiva classificação quanto à intensidade, identificados para cada uma das áreas homogêneas de DJF. Os eventos considerados moderados foram mais frequentes nas áreas 1 e 2, contabilizando respectivamente 9 e 12 episódios ao longo dos 38 anos da análise. O aspecto comum destas duas áreas é o fato de que as secas mais raras foram aquelas de intensidade extrema. Por outro lado, na área 3, os eventos de seca mais recorrentes foram os severos, sendo registrados 6 eventos. O maior total de casos foi identificado na área 2 (21 casos), seguido da área 1 (18 casos) e área 3 (15 casos).

Tabela 6.1 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF).

Número de Eventos Secos Ocorridos no Trimestre DJF				
	Moderados	Severos	Extremos	Total
Área 1	9	7	2	18
Área 2	12	5	4	21
Área 3	4	6	5	15

Nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 são mostradas as séries temporais do SPI calculados para cada uma das áreas homogêneas de, respectivamente, Dezembro, Janeiro e Fevereiro.

Figura 6.1 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de dezembro (1982-2019).



Os resultados indicam uma tendência de intensificação dos eventos de seca ocorridos nos últimos anos nas áreas 1 e 2, em dezembro (Figura 6.1) e janeiro (Figura 6.2), tendo em vista que os mais severos ocorreram nos últimos 10 anos. Uma tendência de aumento dos eventos de seca em A2 pode ser identificada a partir de 2014 em dezembro (Figura 6.1). Por outro lado, a década de 1990 pode ser considerada como crítica para A3 durante DJF, pois principalmente em dezembro (Figura 6.1), foram identificados consecutivos anos de seca. Destaca-se ainda que uma maior frequência de casos extremos pode ser observada em A3 em relação às demais áreas, ainda que, aparentemente tais eventos tenham sido mais recorrentes durante o verão em A1 e A2. As secas em A3 ocorreram em intervalos de tempo maiores também, alternando com períodos extremos de chuva. É evidenciado na Figura 6.3, que

o mês de fevereiro se destaca por apresentar maior número de eventos chuvosos, principalmente nas áreas 2 e 3.

Figura 6.2 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de janeiro (1982-2019).

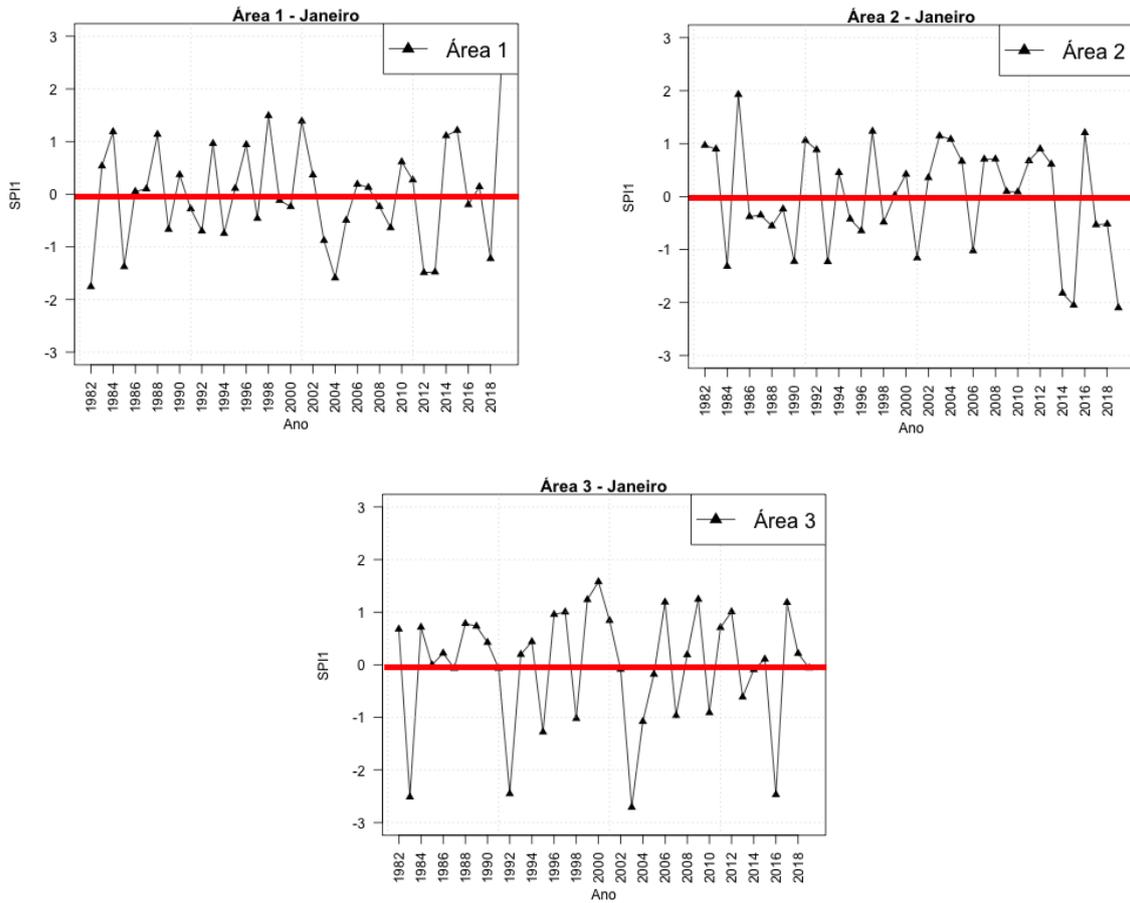
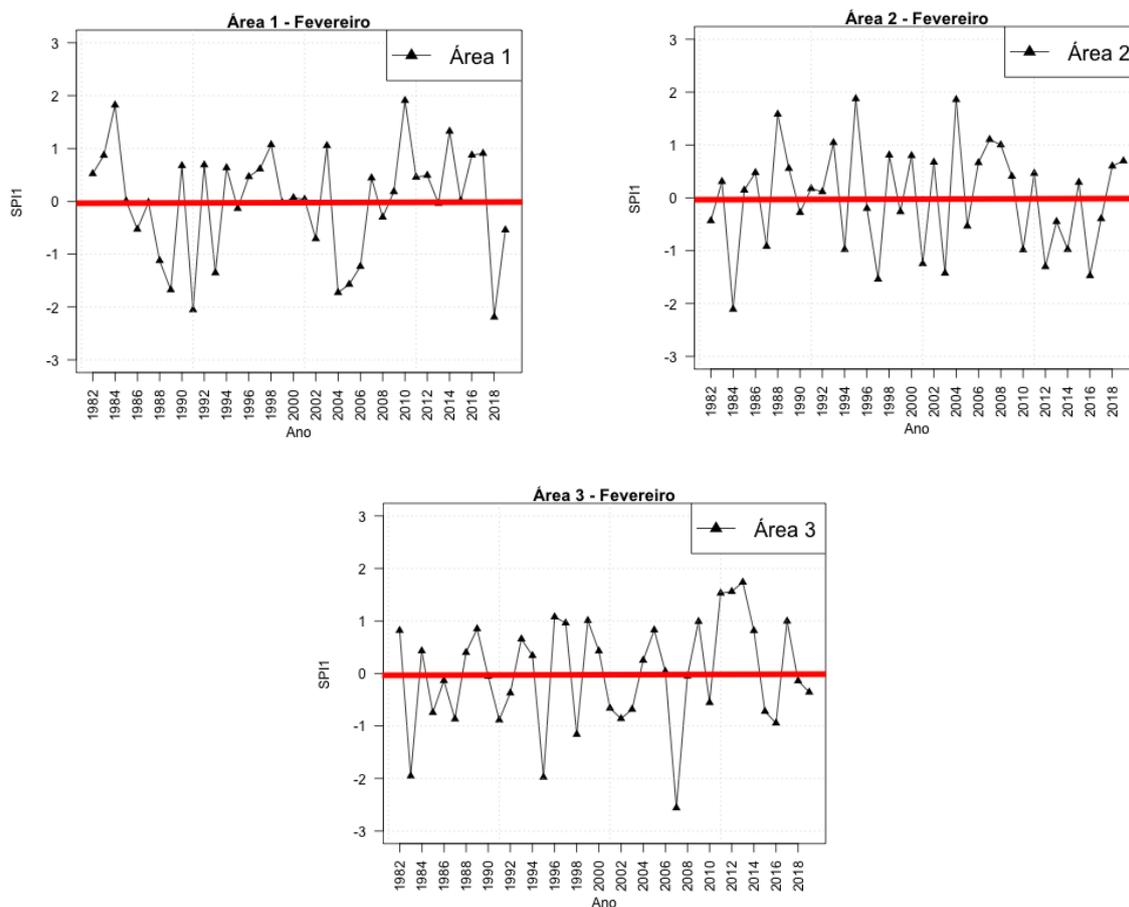


Figura 6.3 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de fevereiro (1982-2019).



Na Tabela 6.2 são mostrados os eventos de seca identificados por área, classificados por intensidade para o período DJF, onde estão destacados em vermelho e azul os anos de El Niño e La Niña, respectivamente. Nesta tabela, assim como nas Tabelas 6.4, 6.6 e 6.8, os dados referentes aos períodos de ENOS utilizados são disponibilizados pelo NCEP/CPC/NOAA, fornecidos em médias trimestrais de anomalias de TSM sobre a região Niño 3.4. A identificação dos períodos neutros, de El Niño e La Niña, deu-se da seguinte forma: é necessário que pelo menos em dois trimestres consecutivos, dentro dos quais encontra-se o mês de interesse, as anomalias indiquem a mesma fase de ENOS.

Tabela 6.2 Eventos identificados por área e por ano nos meses de DJF. Aqueles destacados em vermelho, referem-se a meses de ocorrência de El Niño, e em azul, a meses de ocorrência de La Niña.

Número de Eventos Secos Ocorridos em Dezembro			
	Moderada	Severa	Extrema
Área 1	2 (1995, 2013)	2 (2008, 2011)	-
Área 2	3 (2003, 2007, 2016)	3 (1990, 2012, 2018)	1 (2015)
Área 3	-	4 (1991, 1997, 2003, 2015)	-
Número de Eventos Secos Ocorridos em Janeiro			
	Moderada	Severa	Extrema
Área 1	4 (1985, 2012, 2013, 2018)	2 (1982, 2004)	-
Área 2	5 (1984, 1990, 1993, 2001, 2006)	1 (2014)	2 (2015, 2019)
Área 3	3 (1995, 1998, 2004)	-	4 (1983, 1992, 2003, 2016)
Número de Eventos Secos Ocorridos em Fevereiro			
	Moderada	Severa	Extrema
Área 1	3 (1988, 1993, 2006)	3 (1989, 2004, 2005)	2 (1991, 2018)
Área 2	4 (2001, 2003, 2012, 2016)	1 (1997)	1 (1984)
Área 3	1 (1998)	2 (1983, 1995)	1 (2007)

A predominante ocorrência de eventos de El Niño é evidente principalmente nos casos de seca ocorridos em A3V; por outro lado, observa-se também a predominância de episódios de La Niña registrados simultaneamente a eventos de seca em A1V. Destaca-se ainda que, somente os eventos extremos identificados no mês de fevereiro em A3V não estiveram associados à fase positiva do ENOS; os eventos moderados e severos nesta área também ocorreram em sua maioria durante períodos de El Niño. Em A2V é observada a ocorrência de casos de seca em ambas as fases do ENOS, assim como

durante períodos considerados neutros, porém, nenhum caso moderado esteve associado à fase positiva do ENOS, e nenhum caso severo e extremo ocorreu durante a fase negativa.

Na área 1, os eventos de seca extrema foram menos recorrentes em relação aos de intensidade inferior. Também observou-se um equilíbrio no número de eventos moderados e severos associados à neutralidade no Pacífico e La Niña (4 eventos moderados em períodos de La Niña e 5 em períodos neutros; 3 severos durante La Niña e 4 em neutros).

No trimestre MAM (Tabela 6.3), as secas extremas também apresentaram menor recorrência na maior parte das regiões homogêneas (apenas na área 1, as secas menos frequentes foram as classificadas como severas). Com exceção da área 3, onde houve um maior registro de eventos severos, em todas as demais áreas, os eventos de intensidade moderada ocorreram com uma maior frequência. O número maior de casos ocorreu na área 2 (22), seguido pela área 4 (20), área 3 (18) e área 1 (16). A variabilidade interanual pode ser observada nos gráficos das Figuras 6.4, 6.5 e 6.6, que correspondem às séries temporais de SPI de março, abril e maio, respectivamente.

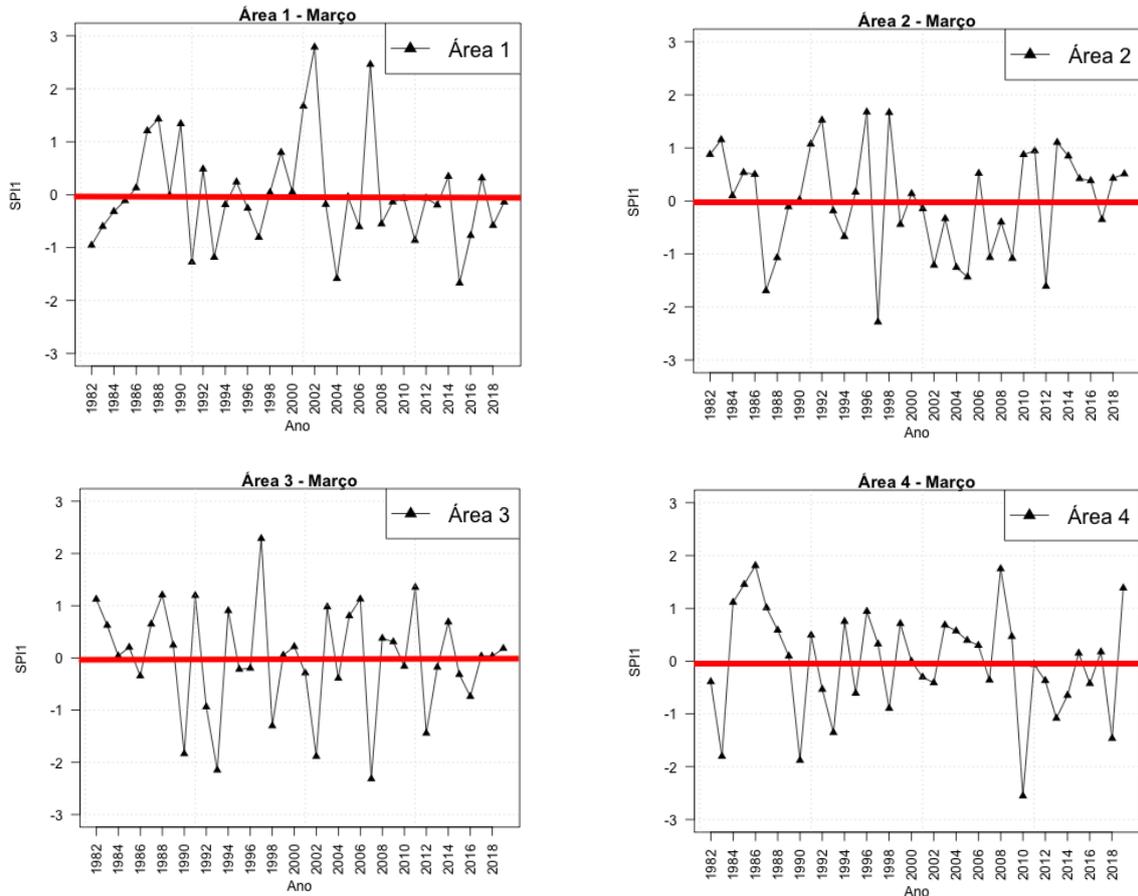
Tabela 6.3 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Março/Abril/Maio (MAM).

Número de Eventos Secos Ocorridos no Trimestre MAM				
	Moderados	Severos	Extremos	Total
Área 1	7	4	5	16
Área 2	12	6	4	22
Área 3	6	7	5	18
Área 4	11	6	3	20

Os eventos de maior intensidade (severos e extremos) ocorreram, em sua maioria, na área 3 durante o outono, conforme evidenciado na Tabela 6.3 e nos gráficos abaixo. É evidente que os eventos de seca tornaram-se mais frequentes em A3O em abril e maio nos últimos anos, especialmente desde

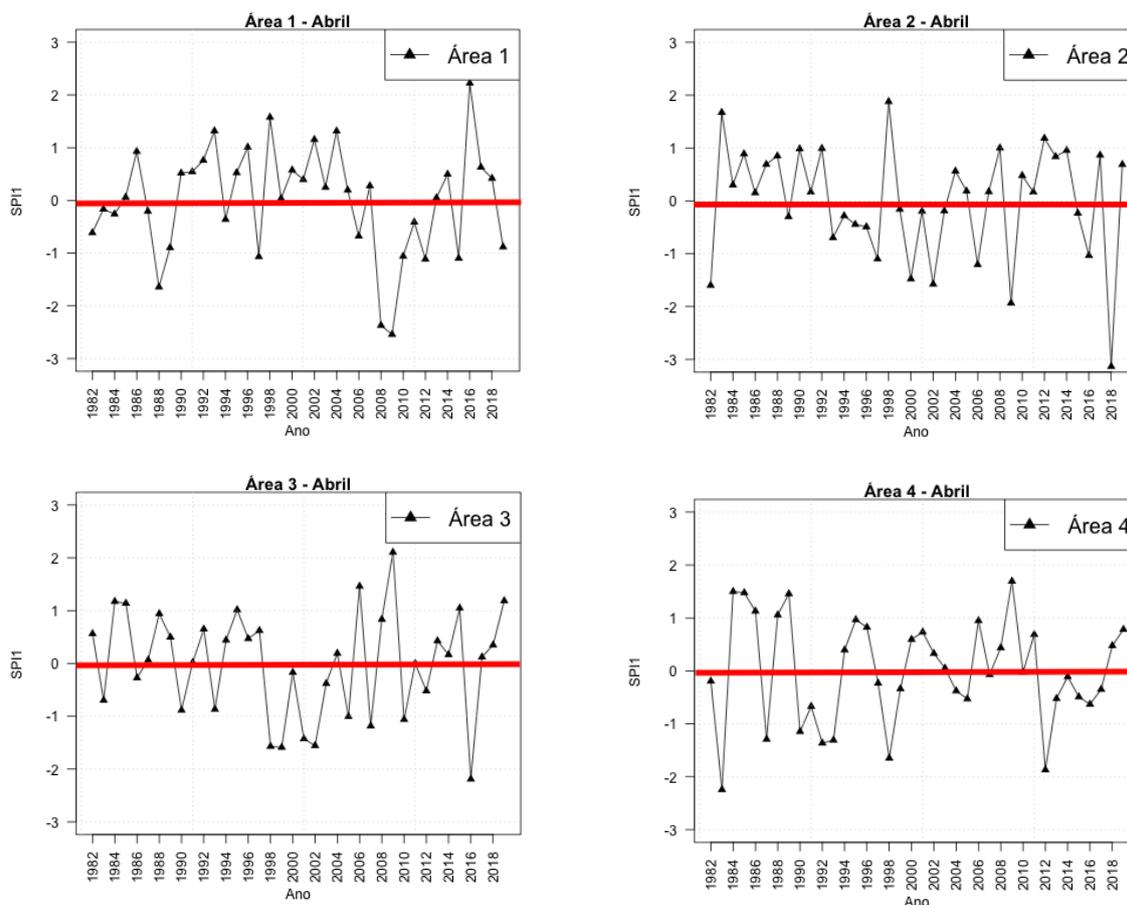
meados da década de 1990. Em A1O também se observou que o fenômeno se tornou recorrente nos meses de março e maio, porém a intensidade é menor do que a de casos passados.

Figura 6.4 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de março (1982-2019).



Um aspecto importante observado em A2O é a intensificação dos eventos de seca em abril e maio, quando comparados àqueles ocorridos em anos anteriores. Destaca-se ainda que a década de 2000 caracterizou-se pela persistência de marços secos na região.

Figura 6.5 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de abril (1982-2019).



Verificou-se novamente a predominância de eventos de seca registrados sobre o norte do continente (A4 para MAM) associados à fase positiva do ENOS durante os meses de MAM, como mostrado na Tabela 6.4. Nas demais áreas, a maior parte dos casos esteve associada à fase neutra do Pacífico, o que possivelmente indica a influência de outros mecanismos de larga escala e até escala regional no regime de chuvas dessas regiões.

Figura 6.6 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de maio (1982-2019).

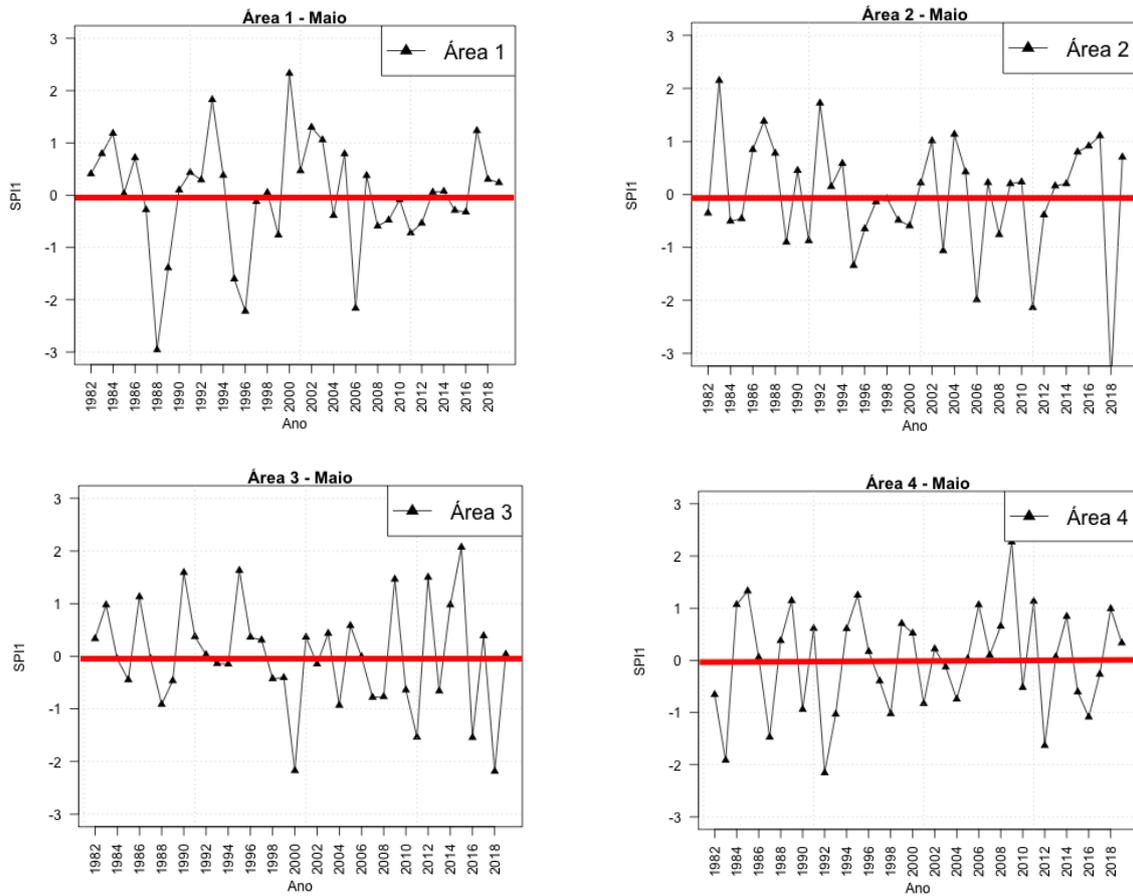


Tabela 6.4 Eventos identificados por área e por ano nos meses de MAM. Aqueles destacados em vermelho, referem-se a meses em que houve ocorrência de El Niño, e em azul, a meses em que houve ocorrência de La Niña.

Número de Eventos Secos Ocorridos em Março			
	Moderada	Severa	Extrema
Área 1	2 (1991, 1993)	2 (2004, 2015)	-
Área 2	6 (1988, 2002, 2004, 2005, 2007, 2009)	2 (1987, 2012)	1 (1997)
Área 3	2 (1998, 2012)	2 (1990, 2002)	2 (1993, 2007)
Área 4	4 (1993, 2013, 2018)	2 (1983, 1990)	1 (2010)
Número de Eventos Secos Ocorridos em Abril			
	Moderada	Severa	Extrema
Área 1	4 (1997, 2010, 2012, 2015)	1 (1988)	2 (2008, 2009)
Área 2	4 (1997, 2000, 2006, 2016)	3 (1982, 2002, 2009)	1 (2018)
Área 3	4 (2001, 2005, 2007, 2010)	3 (1998, 1999, 2002)	1 (2016)
Área 4	4 (1987, 1990, 1992, 1993)	2 (1998, 2012)	1 (1983)
Número de Eventos Ocorridos em Maio			
	Moderada	Severa	Extrema
Área 1	1 (1989)	1 (1995)	3 (1988, 1996, 2006)
Área 2	2 (1995, 2003)	1 (2006)	2 (2011, 2018)
Área 3	-	2 (2011, 2016)	2 (2000, 2018)
Área 4	4 (1987, 1993, 1998, 2016)	2 (1983, 2012)	1 (1992)

Na Tabela 6.5 são mostrados os episódios de seca registrados durante o inverno (JJA), sendo evidenciada a menor frequência dos eventos de intensidade extrema nas áreas 2 e 3. Apenas na área 4, que abrange a área mais ao norte do continente, a ocorrência de secas extremas foi superior a de secas severas, e na área 1 casos iguais de secas severas e extremas.

Em todas as áreas o número de casos moderados foi maior do que nas outras categorias. Na área mais ao sul, que corresponde à área 1, o número total de casos contabilizado foi inferior às demais áreas (16 eventos). O número maior ocorreu na área 3 (20), seguido pela área 2 (19) e área 4 (18). O exposto também pode ser observado nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9, que correspondem às

séries temporais de SPI, respectivamente aos meses de junho, julho e agosto. Uma tendência evidente de aumento na frequência de eventos de seca pode ser observada na área 2 em junho e nas áreas 2, 3 e 4 em julho durante os últimos anos. O período de inverno é considerado a estação seca nas regiões 2 e 3, que se encontram em latitudes subtropicais, o que pode indicar reduções nos volumes de chuvas que já costumam ser baixos nos referidos meses. Por outro lado, na área 1, assim como identificado nas estações anteriores não se observa uma tendência de aumento dos períodos de seca.

Tabela 6.5 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA).

Número de Eventos Secos Ocorridos no Trimestre JJA				
	Moderada	Severa	Extrema	Total
Área 1	8	4	4	16
Área 2	12	4	3	19
Área 3	15	4	1	20
Área 4	9	4	5	18

Figura 6.7 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de junho (1982-2019).

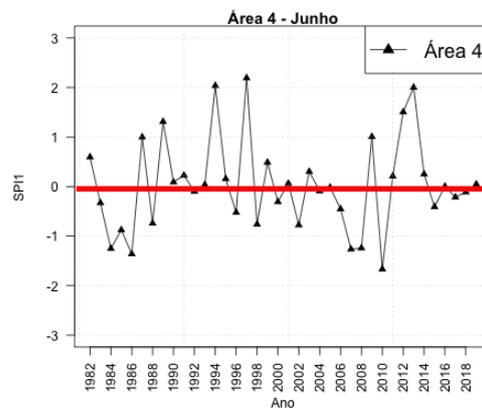
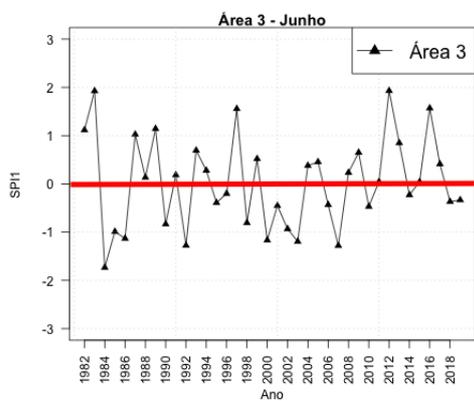
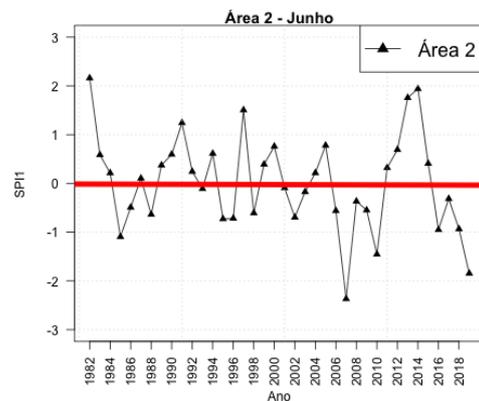
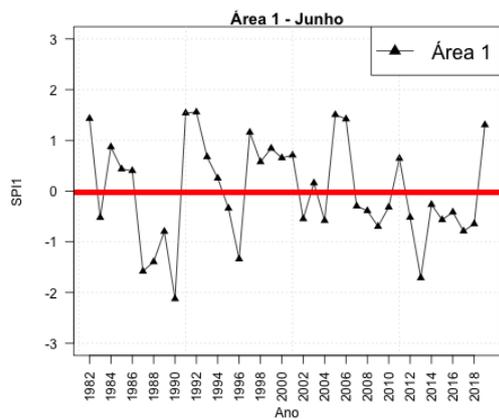
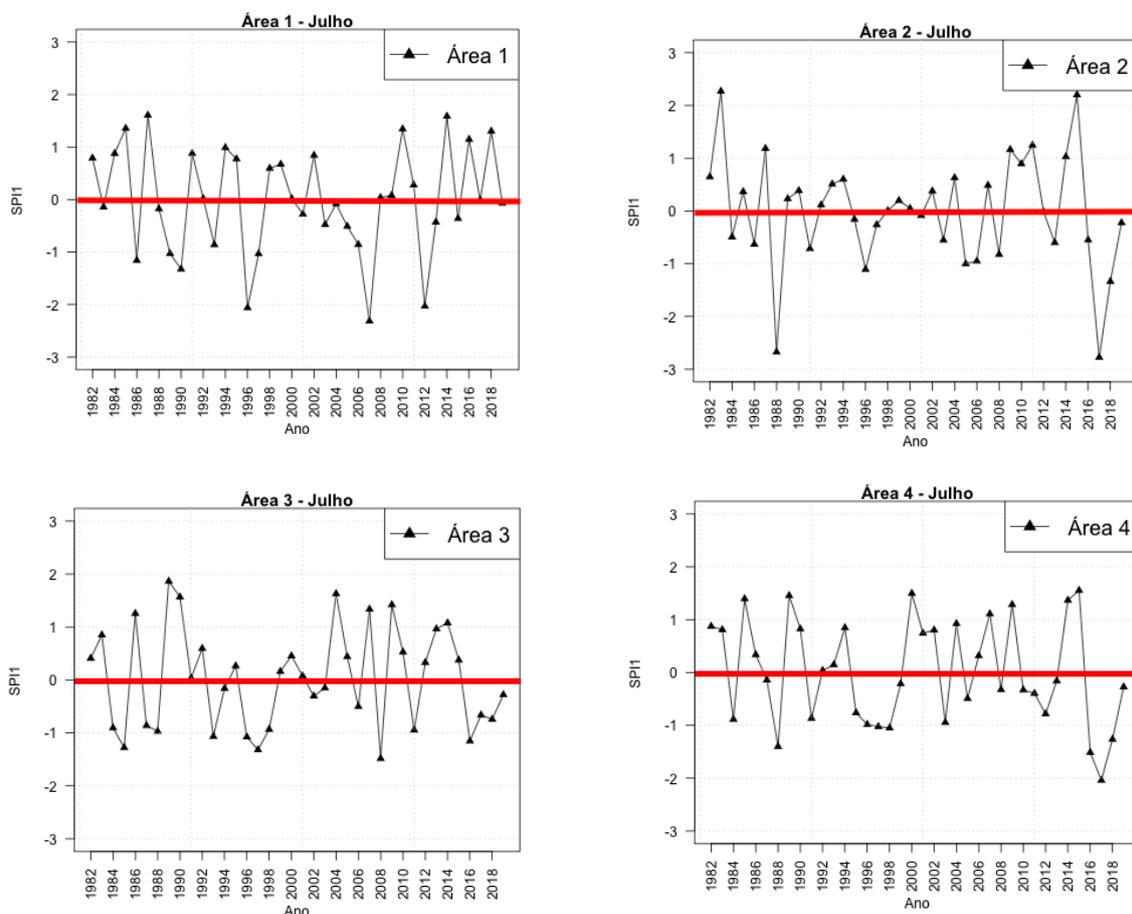


Figura 6.8 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de julho (1982-2019).



Assim como observado em DJF e MAM, a maior parte dos eventos de seca identificados em JJA (Tabela 6.6) na área situada mais a norte do continente (A4) ocorreu durante episódios de El Niño. Como já discutido anteriormente, esse padrão de teleconexão exerce papel importante na região, gerando subsidência anômala e redução da precipitação. No entanto, também foram identificadas secas durante períodos neutros. Nas áreas 1, 2 e 3 os eventos ocorreram de forma majoritária em anos de La Niña e anos neutros.

Figura 6.9 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de agosto (1982-2019).

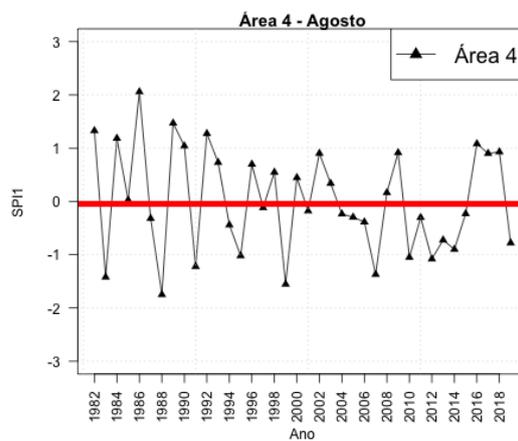
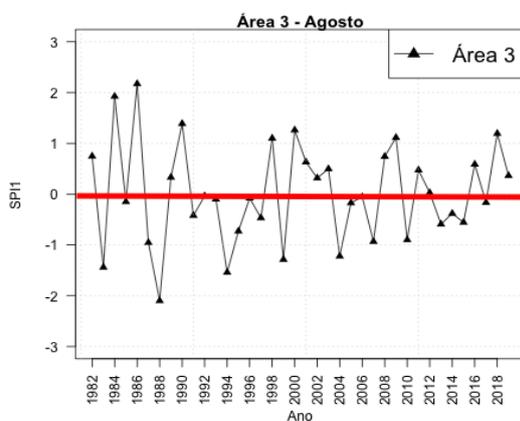
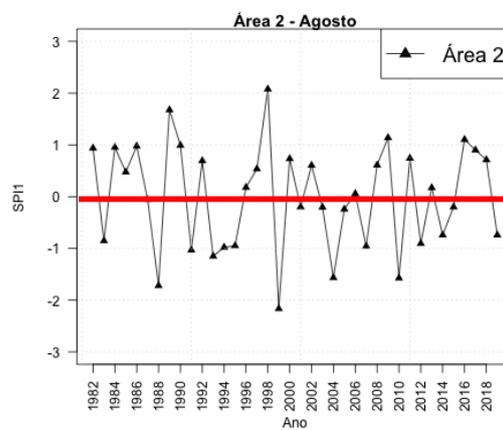
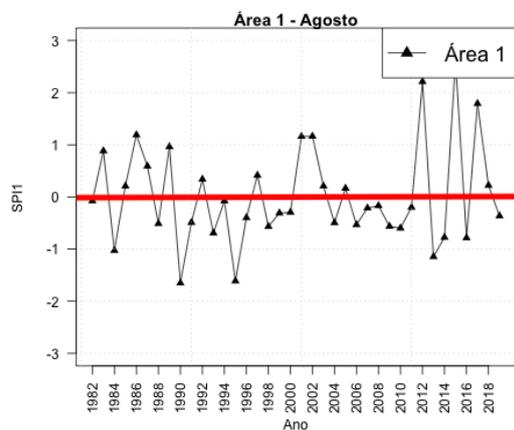


Tabela 6.6 Eventos identificados por área e por ano nos meses de JJA. Aqueles destacados em vermelho, referem-se a meses em que houve ocorrência de El Niño, e em azul, a meses em que houve ocorrência de La Niña.

Número de Eventos Secos Ocorridos em Junho			
	Moderada	Severa	Extrema
Área 1	2 (1988, 1996)	2 (1987, 2013)	1 (1990)
Área 2	5 (1985, 1986, 2002, 2010, 2019)	-	1 (2007)
Área 3	5 (1984, 1986, 2000, 2007, 2008)	1 (2010)	-
Área 4	4 (1982, 1983, 2005, 2012)	1 (2010)	2 (1992, 1997)
Número de Eventos Secos Ocorridos em Julho			
	Moderada	Severa	Extrema
Área 1	4 (1986, 1989, 1990, 1997)	-	3 (1996, 2007, 2012)
Área 2	2 (1984, 2008)	1 (2018)	2 (1988, 2017)
Área 3	4 (1988, 1997, 1998, 2018)	1 (2016)	1 (2017)
Área 4	-	2 (1997, 2014)	2 (1983, 2002)
Número de Eventos Ocorridos em Agosto			
	Moderada	Severa	Extrema
Área 1	2 (1984, 2013)	2 (1990, 1995)	-
Área 2	5 (1983, 1994, 2007, 2010, 2012)	3 (1988, 1999, 2004)	-
Área 3	6 (1983, 1991, 1995, 2007, 2010, 2012)	2 (1988, 1999)	-
Área 4	5 (1995, 1997, 2002, 2009, 2015)	1 (2017)	1 (1986)

Os casos de seca ocorridos durante a primavera (SON) são mostrados na Tabela 6.7, e podem ser identificados também nos gráficos de séries temporais de SPI1 nas Figuras 6.10, 6.11 e 6.12, referentes a, respectivamente, setembro, outubro e novembro. Diferentemente do observado nas estações anteriores, para a maior parte das áreas homogêneas analisadas, durante este período, não foram as secas extremas as menos frequentes, mas sim as severas (com exceção da área 1, quando apenas um evento de seca extrema foi registrado). Por outro lado, eventos considerados moderados continuam mostrando-se como os mais recorrentes em todas as áreas analisadas. O

número total maior de secas ocorreu na área 3 (18), seguido igualmente nas áreas 1 e 2 (17) e área 4 (13).

Tabela 6.7 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON).

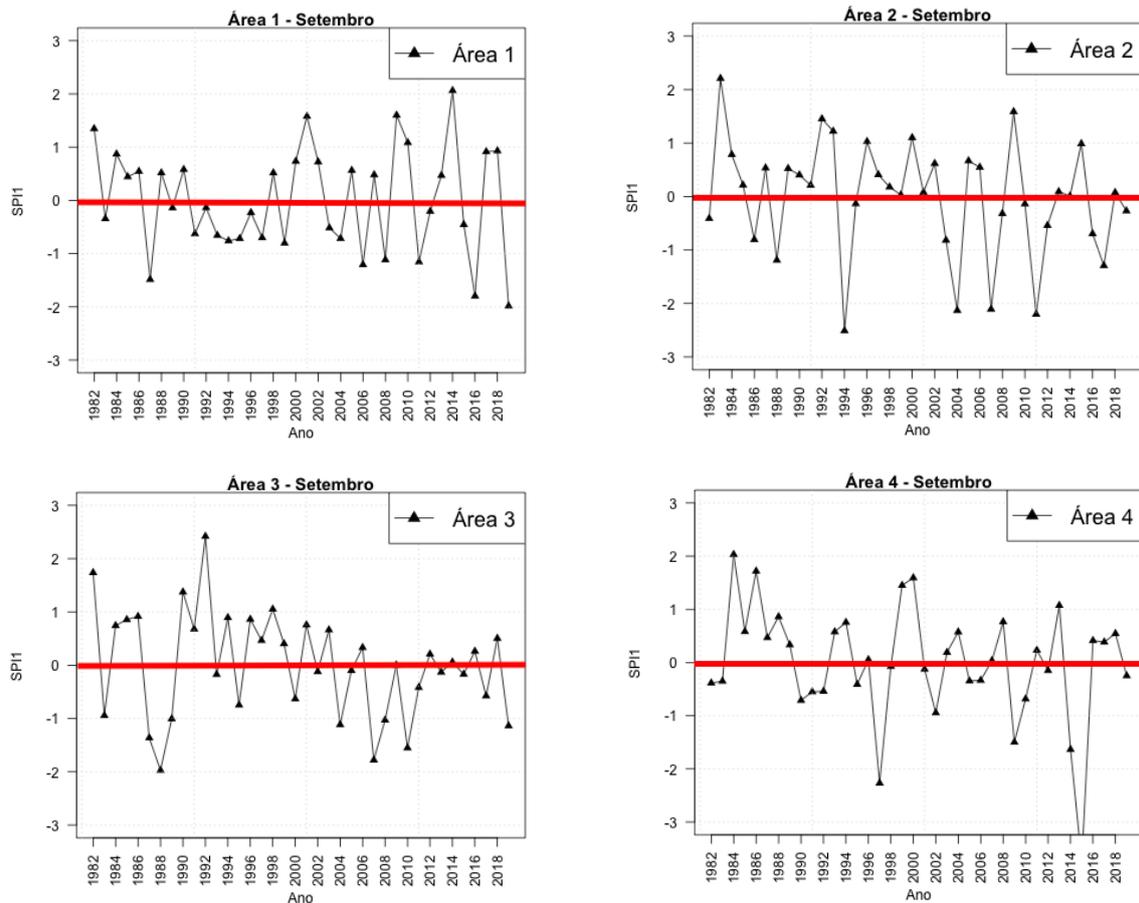
Número de Eventos Secos Ocorridos no Trimestre SON				
	Moderados	Severos	Extremos	Total
Área 1	9	7	1	17
Área 2	9	3	5	17
Área 3	9	4	5	18
Área 4	6	3	4	13

Uma considerável variação na ocorrência de extremos pode ser observada durante a primavera (SON) em todas as áreas homogêneas identificadas na estação. Somente a área 2 apresenta uma tendência evidenciada em sua série temporal de SPI, na Figura 6.10 de aumento do número de casos de eventos chuvosos especialmente na última década durante o mês de novembro. Entre 2012 e 2017, no entanto, eventos de seca consecutivos foram registrados no mês de outubro na mesma área, o que corrobora com a ideia de um atraso do início da estação chuvosa no Sudeste do Brasil, prejudicando reservatórios e abastecimento de água e o setor energético. Destaca-se ainda que os eventos de maior intensidade nesta região ocorreram durante o referido mês; em outubro, por outro lado, destacou-se a área 3, quando houve uma maior frequência de ocorrência de eventos secos extremos.

Na tabela 6.8 são mostrados os eventos de seca identificados por área e por ano para cada uma das regiões homogêneas da primavera (SON). Destaca-se a frequência considerável de secas de intensidade moderada identificadas durante os três meses da primavera em todas as áreas homogêneas, a maior parte delas associadas a episódios de ENOS. Isso reflete o comportamento desse modo de variabilidade, o qual tende a intensificar-se durante esse período e conseqüentemente impactar mais efetivamente sobre a circulação

atmosférica de grande escala, o que resulta em alterações nos padrões de chuvas.

Figura 6.10 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de setembro (1982-2019).



Ainda que o total de eventos de seca contabilizados durante a primavera tenha sido inferior ao verificado nas demais estações, os casos considerados extremos conforme a classificação de Mckee (1993), foram mais frequentes que os demais em áreas específicas durante períodos da primavera (Tabela 6.8) – A2 e A4 em setembro, e A3 e A4 em outubro. Em SON, embora tenha havido registro de eventos de seca durante períodos neutros, a maior parte dos casos identificados esteve associada a episódios de ENOS, sendo predominante a fase negativa para os casos de A1, e positiva para os casos de A4. O exposto é consistente com as anomalias observadas na circulação de

Walker, estabelecendo-se uma região de movimento ascendente sobre as águas mais quentes do Pacífico equatorial e costa oeste da América do Sul, e subsidente na região Amazônica, inibindo a convecção e chuvas. Os resultados obtidos para SON se assemelham àqueles verificados em outras estações, pois nas áreas A2 e A3 não é possível identificar um padrão de recorrência de seca associado a fases específicas do ENOS.

Os resultados obtidos em todas as estações do ano, enfatizam que, em grande parte do território estudado, eventos classificados como moderados são aqueles que apresentam uma maior recorrência. De forma geral, os eventos de seca extrema são aqueles que ocorrem menos frequentemente, exceto durante a primavera austral, quando os episódios menos frequentes são os severos.

Figura 6.11 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de outubro (1982-2019).

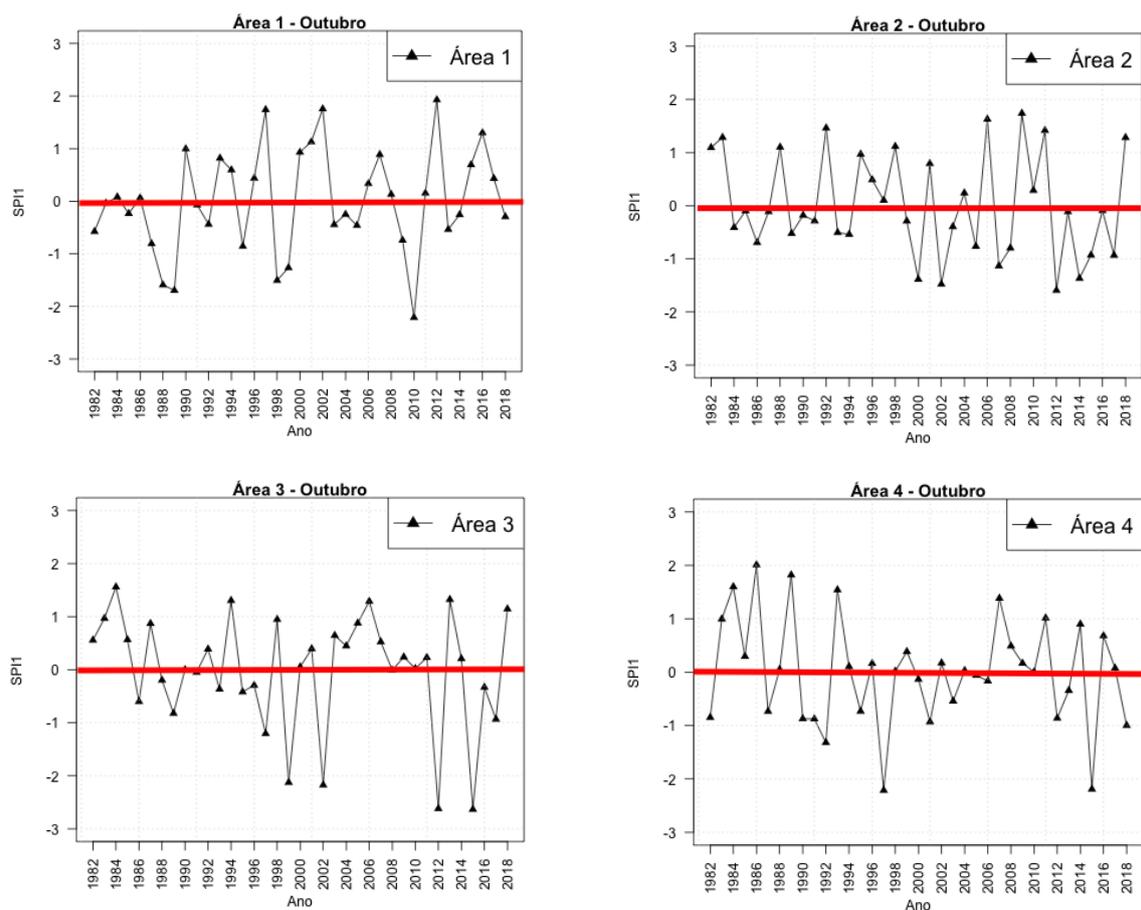


Figura 6.12 Séries temporais do SPI1 calculadas para o mês de novembro (1982-2019).

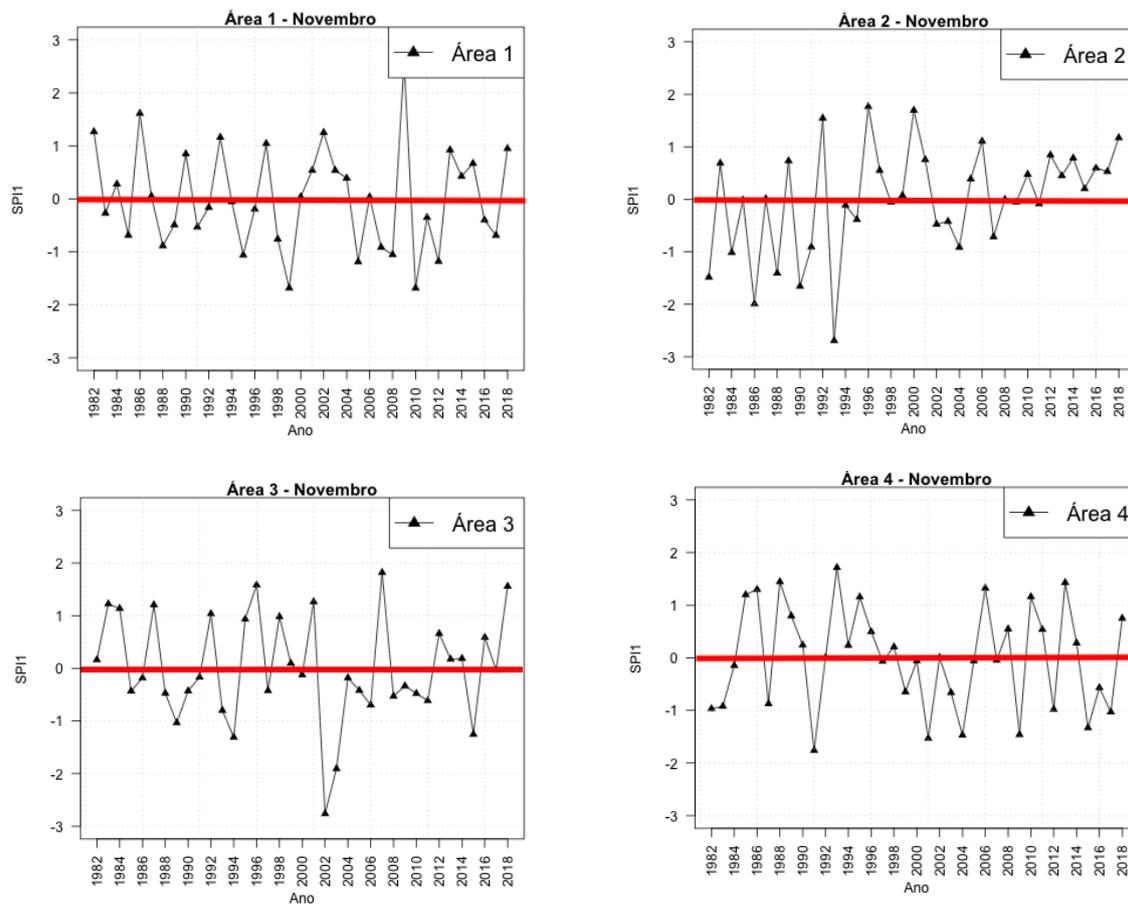


Tabela 6.8 Eventos identificados por área e por ano em SON. Aqueles destacados em vermelho, referem-se a meses de ocorrência de El Niño, e em azul, os meses de ocorrência de La Niña.

Número de Eventos Secos Ocorridos em Setembro			
	Moderada	Severa	Extrema
Área 1	4 (1987, 2006, 2008, 2011)	2 (2016, 2019)	-
Área 2	2 (1988, 2017)	-	4 (1994, 2004, 2007, 2011)
Área 3	5 (1987, 1989, 2004, 2008, 2019)	3 (1988, 2007, 2010)	-
Área 4	1 (2009)	1 (2014)	2 (1997, 2015)

Número de Eventos Secos Ocorridos em Outubro			
	Moderada	Severa	Extrema
Área 1	1 (1999)	3 (1988, 1989, 1998)	1 (2010)
Área 2	4 (2000, 2002, 2007, 2014)	1 (2012)	-
Área 3	1 (1997)	-	4 (1999, 2002, 2012, 2015)
Área 4	1 (1992)	-	2 (1997, 2015)

Número de Eventos Ocorridos em Novembro			
	Moderada	Severa	Extrema
Área 1	4 (1995, 2005, 2008, 2012)	2 (1999, 2010)	-
Área 2	3 (1982, 1984, 1988)	2 (1986, 1990)	1 (1993)
Área 3	3 (1989, 1994, 2015)	1 (2003)	1 (2002)
Área 4	4 (2004, 2009, 2015, 2017)	2 (1991, 2001)	-

6.2 Recorrência e duração dos eventos de seca

Na Tabela 6.9 são apresentados os eventos de seca segundo a intensidade em cada uma das áreas A1, A2, A3 e A4, para cada mês do período 1982-2019. A análise mostra que existem alguns períodos específicos de duração prolongada dos eventos, bem como a extensão espacial, como nos casos identificados em 1988, 1989 e 1990, durante um prolongado período de La Niña. Embora sejam esperadas respostas distintas na área subtropical do continente, de acordo com a fase do modo de variabilidade mencionado, a A1 enfrentou déficit hídrico principalmente no primeiro semestre de 1988, em meses isolados durante 1989 e no inverno de 1990. Anomalias negativas de precipitação também

predominaram nas áreas A3 e A4 nos anos de 1988 e 1990, respectivamente. Anteriormente, estas duas áreas haviam enfrentado um período prolongado de seca entre 1982 e 1983, quando um dos episódios de El Niño mais severos da história foi registrado.

Em 1993, consecutivos meses de seca de intensidade moderada foram registrados em distintas áreas do continente, período caracterizado por condições de neutralidade no Pacífico Tropical Leste. Destaca-se o primeiro semestre do ano, caracterizado por volumes de chuva inferiores à normal climatológica no sul (A1 em FEV e MAR), no SE (A2 em JAN) e também no NE da América do Sul (A4 em MAR, ABR e MAI). Eventos mais severos também foram identificados em A3 (MAR) e A2 (NOV).

Uma extensa área sob condições de seca também foi observada no período que compreendeu os anos de 1997 e 1998, quando um importante episódio de El Niño foi registrado. Dentro deste intervalo de tempo, destacam-se o período que vai do inverno de 1997 até o final do primeiro semestre de 1998, evoluindo espacialmente da Amazônia (A4) para a região central do continente (A3), e posteriormente, tornando a apresentar um déficit hídrico na A4. Passado este evento, observa-se que essas áreas permanecem nos anos seguintes (1999 a 2003) enfrentando períodos de seca, especialmente a A3, com casos mais pontuais ocorrendo no inverno, que compreende a estação seca desta região, e mais extensas e severas entre a primavera e verão. Alguns eventos esporádicos de seca em A2 também ocorreram concomitantemente nos anos de seca em A3 e A4 de forma geral. Para ambas áreas também é perceptível que secas extremas, em sua maioria, apresentem uma duração menor do que as secas moderadas e severas; os eventos mais intensos e duradouros ocorreram nas áreas 2, 3 e 4, enquanto os casos menos severos são mais duradouros em A1.

O comportamento das chuvas entre os anos de 2004 e 2007, mostrado na tabela 6.9 caracterizou um período de seca generalizada sobre o continente da América do Sul. Esse padrão teve início com uma estiagem ao final da estação chuvosa (março) de 2004, e ganhou força com a drástica redução dos volumes

de chuva no período de transição (primavera), que caracterizou o início de um evento de seca extrema. O ano de 2004, portanto, apresentou um período chuvoso mais curto que o normal e um prolongamento da estação seca, além de anomalias negativas de precipitação durante a estação chuvosa de 2005 e 2006. As chuvas continuaram muito abaixo da média da estação seca (inverno) até a primavera de 2007 – assim como observado em 2017 e 2018, quando eventos extremos de seca foram registrados no mesmo período na região. O período que compreendeu os quatro anos (2004-2007) foram críticos para a região SE da AS devido aos baixíssimos volumes de chuvas registrados, e o ano de 2007, especificamente, destacou-se entre os demais pelos numerosos casos de eventos de seca registrados (principalmente os mais intensos) em A1, A2 e A3.

Do ponto de vista espacial, o ano de 2012 destacou-se por apresentar condições de seca – embora em intensidade variável – generalizadas. Ambas as quatro áreas homogêneas identificadas em cada uma das estações apresentaram algum mês específico ou períodos consecutivos de seca durante o ano. Principalmente as áreas 2 e 4 apresentaram um padrão melhor estabelecido; enquanto a primeira aparentemente teve uma estação chuvosa mais curta e fim tardio da estação seca, o período chuvoso em A4 (ABR e MAI) teve registro de chuvas inferiores à normal climatológica.

Da mesma forma, os anos de 2015 e 2016 também apresentaram condições de seca abrangentes em termos de extensão territorial, sendo observados eventos em todas as áreas homogêneas analisadas em cada estação. A2 e A4 destacaram-se nesse período por apresentarem um período chuvoso de baixa qualidade, quando os mais intensos eventos foram registrados. A3, por outro lado, mostrou um período maior de déficit hídrico, o qual teve início durante meados da primavera, retornando em meses do verão e inverno. Em A1, especialmente nas últimas décadas, as secas caracterizaram-se por sucessivos meses de anomalias negativas de precipitação, as quais de forma geral, mantiveram-se constantes.

Tabela 6.9 Eventos de seca classificados de acordo com a intensidade (em vermelho extremos, laranja severos e amarelo moderados) identificados por ano, mês e área homogênea.

EXTREMO	SEVERO	MODERADO
---------	--------	----------

	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV
1982												
		A1			A2							
							A4					A2
1983		A3						A4				
			A3	A4		A4						
							A4		A2,A3			
1984			A2									
		A2					A3	A2	A1			A2
1985												
		A1					A2					
1986									A4			
												A2
							A2,A3	A1				
1987												
				A2			A1					
						A4				A1,A3		
1988						A1						
					A1				A2,A3	A3	A1	
			A1	A2			A1	A3		A2		A2
1989												
			A1								A1	
						A1		A1		A3		A3

continua

Tabela 6.9 – Continuação.

1990							A1					
	A2			A3,A4					A1			
		A2			A4			A1				
1991			A1									
	A3											A4
				A1					A3			
1992		A3				A4	A4					
					A4						A4	
1993				A3								
												A2
		A2	A1	A1,A4	A4	A4						
1994												
									A2			A3
1995												
						A1			A1			
	A1	A3				A2			A3,A4			A1
1996								A1				
						A1	A1					
1997				A2			A4			A4	A4	
	A3		A3					A4				
					A1,A2			A1,A3	A4		A3	
1998												
					A3,A4						A1	
		A3	A3	A3		A4		A3				

continua

Tabela 6.9 – Continuação.

1999												
					A3				A2,A3		A3	A1
											A1	
2000						A3						
					A2		A3				A2	
2001												
		A1	A2		A3							
2002								A4			A3	A3
				A3	A2							
				A2			A2		A4		A2	
2003		A3										
	A3											A3
	A2		A2			A2						
2004										A2		
		A1	A1	A1					A2			
		A3		A2						A3		A4
2005												
			A2									
				A2	A3		A4					A1
2006						A1						
						A2						
		A2	A1		A2					A1		
2007			A3	A3			A2	A1		A2		
									A3	A3		
	A2			A2	A3		A3		A2		A2	

continua

Tabela 6.9 – Continuação.

2008					A1							
	A1						A3	A2		A1,A3		A1
2009					A1							
					A2							
				A2					A4	A4		A4
2010				A4							A1	
					A3		A3,A4			A3		A1
					A1		A2		A2,A3			
2011						A2				A2		
	A1					A3						
										A1		
2012											A3	
	A2			A2	A4	A4					A2	
		A1	A2	A3	A1		A4		A2,A3			A1
2013												
							A1					
	A1	A1		A4					A1			
2014												
		A2						A4		A4		
											A2	
2015	A2	A2								A4	A3,A4	
	A3			A1								
					A1				A4			A3,A4
2016		A3			A3							
						A3		A3		A1		
	A2		A2		A2	A4						

continua

Tabela 6.9 – Conclusão.

2017								A2,A3				
									A4			
										A2		A4
2018					A2	A2,A3						
	A2		A1					A2				
		A1		A4				A3				
2019												
										A1		
		A2					A2			A3		

7 CARACTERÍSTICAS ATMOSFÉRICAS E OCEÂNICAS OBSERVADAS ASSOCIADAS AOS EVENTOS DE SECA

Com objetivo de identificar padrões atmosféricos e oceânicos atuantes nas áreas homogêneas definidas durante eventos de seca, foram calculadas as anomalias mensais de diferentes campos e respectivos compostos, tendo como base para o cálculo o período climatológico de 1981 a 2010. Serão mostrados a seguir, os campos referentes à precipitação (mm/mês), temperatura, altura geopotencial, ROL, PNMM, TSM, fluxo de umidade integrado na vertical e escoamento (componentes zonal (u) e meridional (v) do vento) em altos níveis (200 hPa) para os compostos dos casos de seca identificados nas áreas para cada estação do ano.

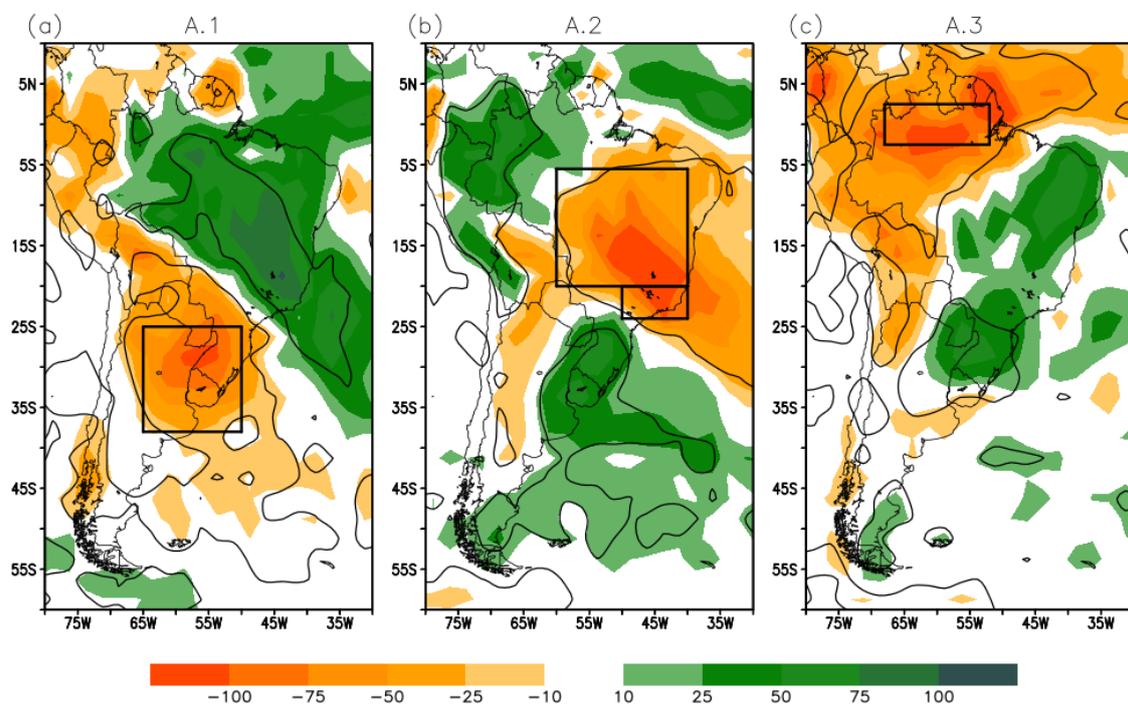
7.1 VERÃO

Na Figura 7.1 são apresentados os compostos de anomalia de precipitação para as áreas homogêneas do trimestre de Dezembro/Janeiro/Fevereiro. O referido período, compreende o verão austral e a estação chuvosa na maior parte do continente, característica importante do sistema de monções da América do Sul. Observa-se que, existe uma clara configuração de dipolo entre as áreas A1V (a) e A2V (b) durante o verão, e que indica que períodos mais secos na região sul (que compreende parte da Bacia do Prata, área A1V) coincidem com períodos mais chuvosos no CO, Amazônia, SE e oeste do NE do Brasil, e vice versa. Nota-se que em A1V as anomalias negativas apresentam magnitude inferior àquelas observadas em A2V, com valores entre 25 e 50 mm/mês, enquanto em A2V os valores estão, na maior extensão da região, no intervalo de 50 e 75 mm/mês. Há dois fatores que podem ter contribuído para tal resultado: além do total de eventos contabilizados ter sido ligeiramente superiores em A2V, o número de secas extremas foi o dobro das registradas em A1V (4 e 2, respectivamente), conforme mostrado na Tabela 6.1. Estes resultados demonstram que, existe uma inversão dos sinais de anomalias de precipitação quando períodos mais secos são registrados em A1V ou A2V. Como mencionado anteriormente, esse dipolo representa a variabilidade da ZCAS, e assim, os eventos de seca em A1V ocorrem quando a

ZCAS está bem ativa, causando muita precipitação em A2V. Os eventos de seca em A2V ocorrem quando há redução da atividade da ZCAS, ou ausência de sua ocorrência, enquanto há mais precipitação sobre A1V.

Figura 7.1 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas A1V (a), A2V (b) e A3V (c). Os contornos delimitam as regiões que apresentam anomalias com significância estatística no nível 0,1 (teste T – Student).

Compostos DJF Anomalia Precip (mm mes⁻¹)

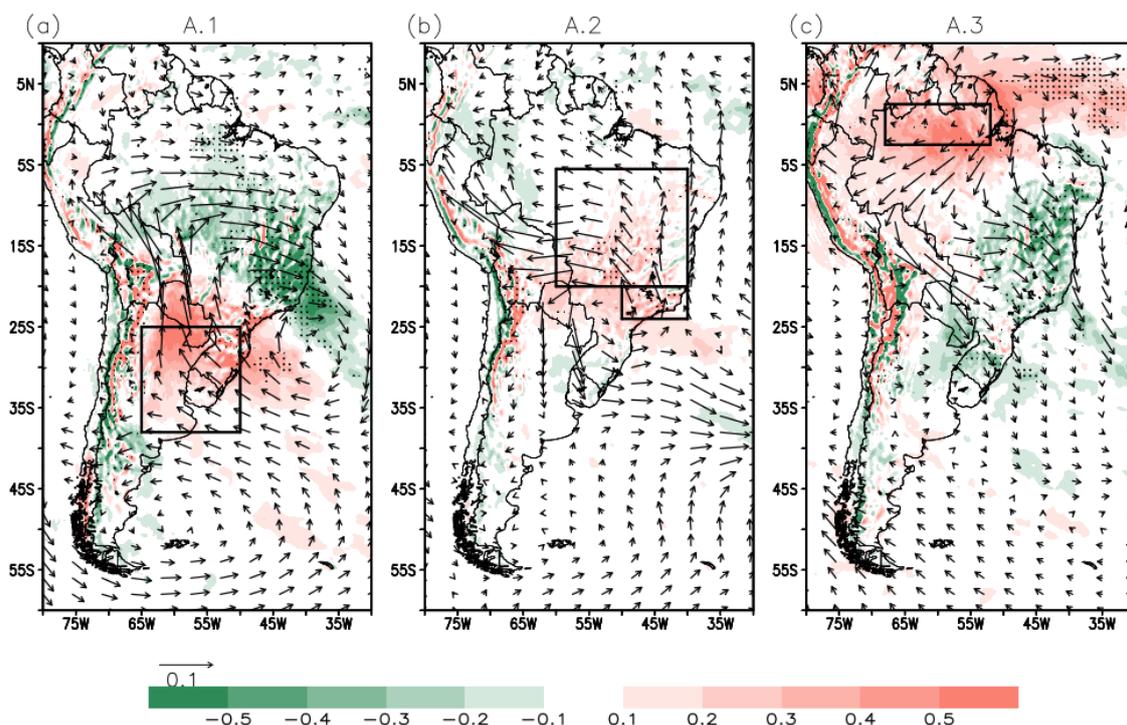


O composto referente a A3V (c), também demonstra fortes anomalias negativas de precipitação no extremo norte do Brasil, com valores entre 75 e 100 mm/mês na maior parte de sua extensão. Em relação às demais áreas, esta foi aquela em que se observou uma maior frequência da ocorrência de casos de secas extremas, explicando desta forma, a intensidade das anomalias. A ocorrência de anomalias de maior magnitude em A2V e A3V pode ter relação ao fato de apresentar climatologia superior à A1V nesse período do ano, quando os processos convectivos e o aporte de umidade ganham

intensidade na região tropical do continente. O padrão observado em A3V, em termos, remete ao comportamento das chuvas durante a fase positiva do ENOS, quando há períodos mais secos na região da Bacia Amazônica. A região sul do Brasil também costuma ser afetada nestes casos por períodos mais chuvosos, o que também costuma ser observado durante episódios de El Niño. Para que a hipótese seja confirmada ou descartada, serão realizadas análises dos campos de TSM posteriormente.

Figura 7.2 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 2 (c).

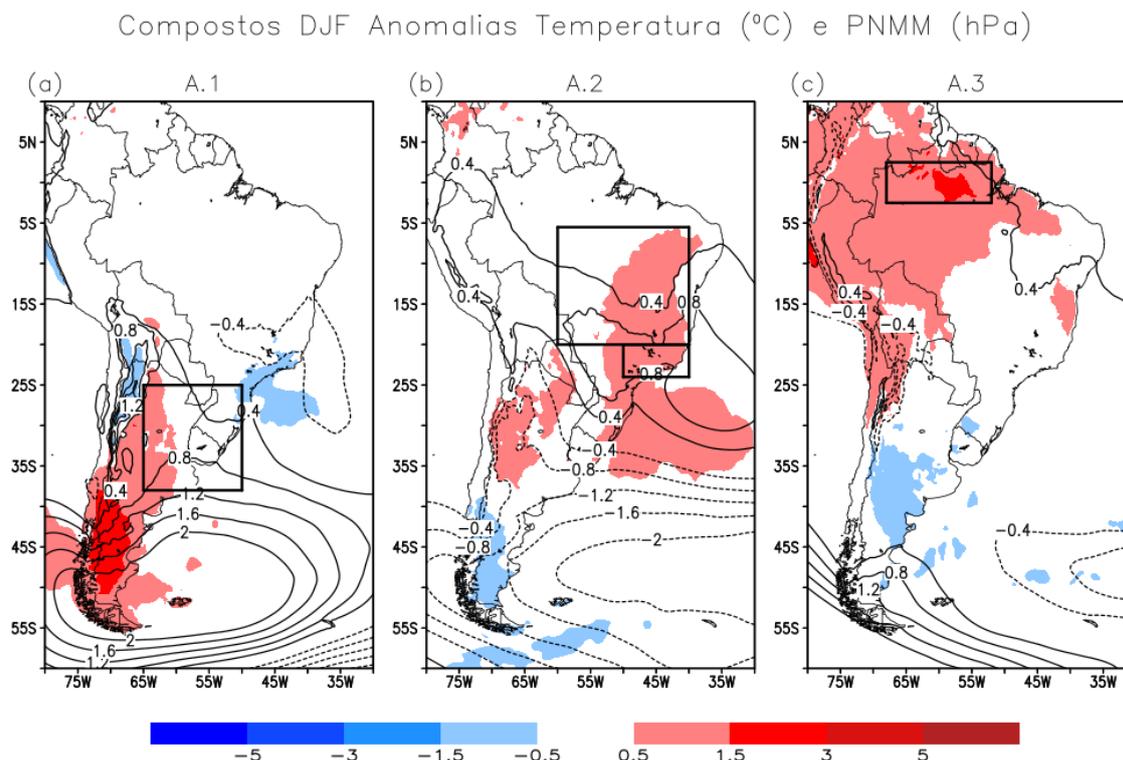
Compostos DJF Fluxo Umidade Integrado e Div



Principalmente em A1V e A3V, são observadas anomalias positivas no campo de divergência de umidade, estando o fluxo de umidade anormalmente mais forte entre o SE e NE do Brasil, como mostrado na Figura 7.2. O enfraquecimento do fluxo de umidade nas áreas A1V e A3V contribuiu para a ocorrência de eventos secos nestas áreas, e a intensificação da convergência de umidade observada no SE e NE do Brasil favorece a intensificação dos processos convectivos e conseqüentemente das chuvas nas regiões. Esse padrão é consistente com o comportamento das chuvas identificado nos compostos de anomalias de precipitação, apresentados na Figura 7.1. A

divergência de umidade e a redução do fluxo para a área A2V também contribuem para a seca nesta região.

Figura 7.3 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

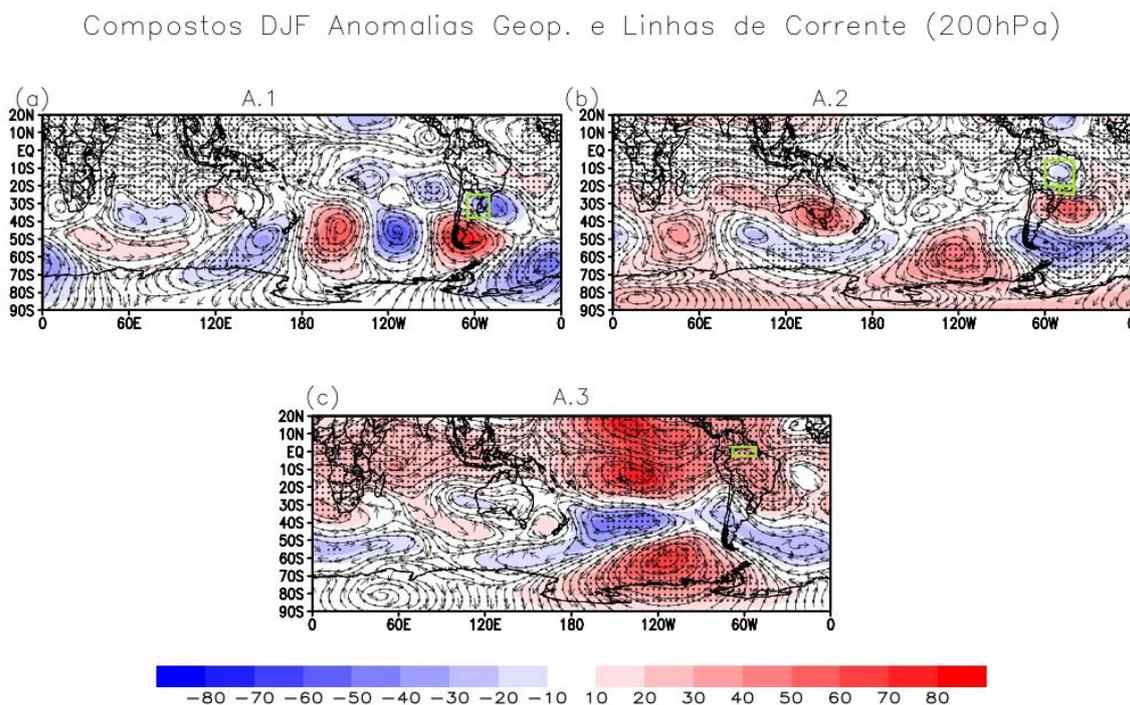


Um aumento da temperatura durante os episódios identificados, pode ser observado nos compostos da Figura 7.3, potencializando, desta forma, os efeitos das secas sobre as regiões, com destaque para A2V e A3V; nesta última, toda área encontra-se sob influência de anomalias positivas (entre 1,5°C e 2°C acima da média). O enfraquecimento da convecção, observado nas figuras 7.3 e 7.4, e conseqüentemente a inibição do desenvolvimento de nebulosidade, também favorecido pela diminuição da umidade, contribuem para a elevação das temperaturas. Também é possível observar a influência de anomalias no campo de pressão a nível médio do mar sobre as áreas 1 e 2; embora apresentem magnitude relativamente pequena, os valores positivos identificados sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) podem deslocar/enfraquecer a

passagem de sistemas frontais, bem como sistemas convectivos de mesoescala, os quais são mais comuns nesta época do ano.

Os compostos de geopotencial em altos níveis são mostrados na Figura 7.4. Em (a) é possível observar a influência de um trem de ondas número 3, que se propaga do Pacífico Sul até os subtrópicos na América do Sul, com anomalias positivas de geopotencial no sul do continente. Entre esta região, e a região de geopotencial negativo (SE do Brasil), é estabelecida uma região de movimentos subsidentes e divergência em superfície, favorecendo a estabilidade na região, e explicando as condições de seca no sul do Brasil, Uruguai e leste da Argentina. Por outro lado, a figura (b) – que se refere à área 2, mostra que a circulação atmosférica se caracteriza por uma região de anomalias ciclônicas no sul do continente, aprisionada entre outras duas áreas de anomalias anticiclônicas (uma a SO e outra a NE). Esta configuração determina o confinamento da instabilidade (como por exemplo, a passagem de sistemas frontais) a leste da região de geopotencial negativo. A leste do centro de anomalias positivas de geopotencial sobre o continente, há subsidência sobre A2V, contribuindo para a condição de seca. Esse composto é coerente com o observado na precipitação, caracterizado por um dipolo entre o sul do Brasil, Uruguai e leste da Argentina (chuvas acima da média) e SE, CO e parte do NE do país (chuvas abaixo da média). No composto da A2V é observada a fase negativa do Modo Anular Sul, com anomalias positivas de geopotencial nas latitudes altas. Nessa fase há anomalias positivas de precipitação na região sul do Brasil, Uruguai e Argentina e negativas na região Sudeste do Brasil (SILVESTRI; VERA, 2003; VASCONCELLOS; CAVALCANTI, 2010; CAVALCANTI et al., 2021), consistente com estas análises. O campo de anomalias de geopotencial para os casos de seca em A3V é típico de casos de El Niño, apresentando 2 anticlones em altos níveis dos 2 lados do Pacífico equatorial leste, e um trem de ondas dirigido da região equatorial para a extratropical e América do Sul. Durante o referido período, foram contabilizados um total de 15 eventos de seca sobre a A3V, sendo que, 12 foram registrados em anos de El Niño, conforme mostrado na Tabela 6.3.

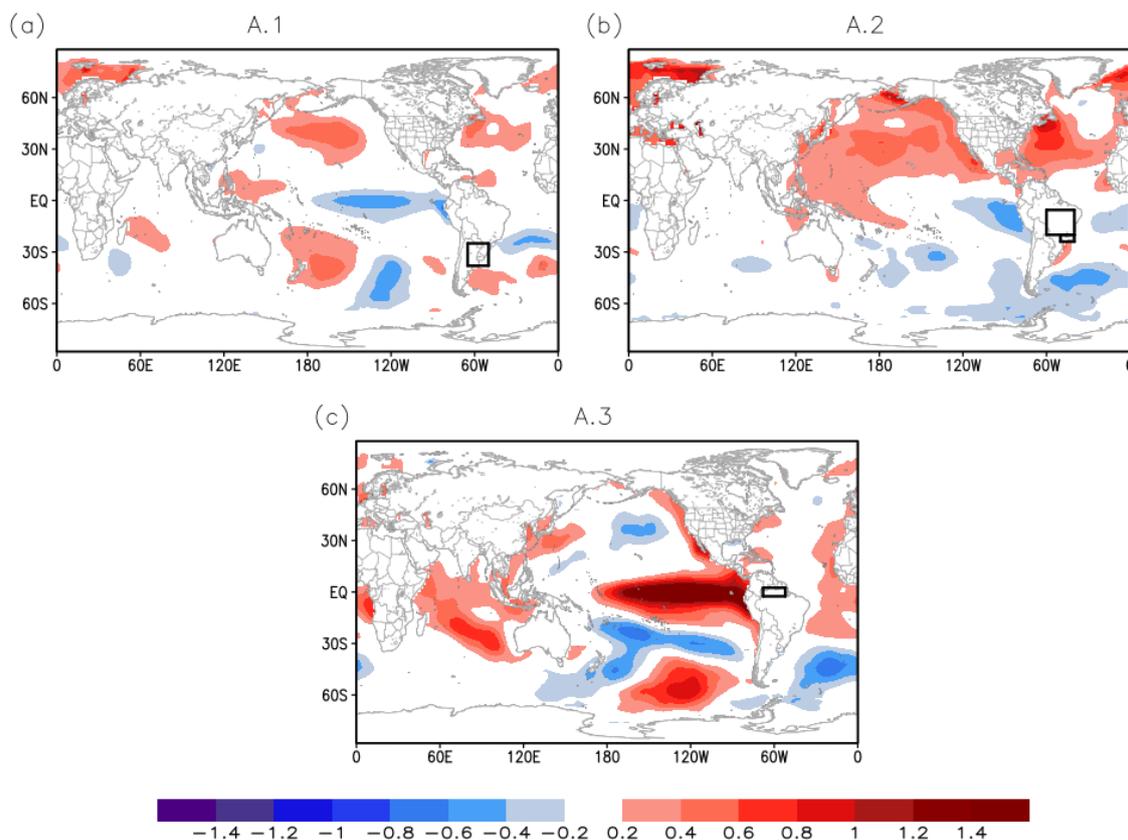
Figura 7.4 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).



O comportamento das chuvas em A1V (a) e A3V (c) mostra uma relação com a variabilidade da TSM do Pacífico Tropical Central e Leste, como mostrado na Figura 7.5. Enquanto períodos secos no Sul (a) parecem se relacionar com resfriamento atípico deste oceano, os episódios sobre a região da Amazônia (c) estão associados ao aquecimento anômalo de suas águas. A configuração converge com os resultados encontrados por Grimm et al. (2000), Grimm e Tedeschi (2009), Cai et al. (2020), Marengo e Nobre (2009), Berri e Bertossa (2004), entre outros.

Figura 7.5 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

Compostos DJF Anomalia TSM (°C)



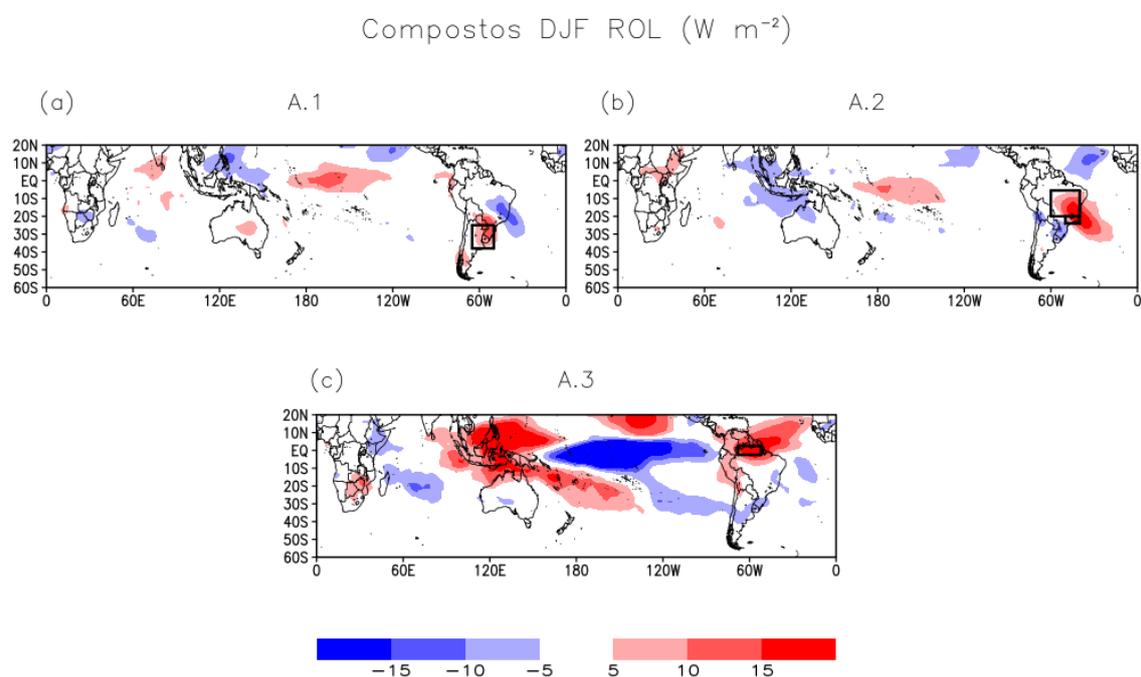
A análise dos compostos de radiação de onda longa (ROL) contribui com o entendimento do comportamento da convecção nas distintas áreas, isto porque, trata-se da fração de energia emitida pelas superfícies. A presença de nuvens representa importantes fontes desta radiação, sendo assim, valores reduzidos de ROL estão associados à presença de nuvens profundas, e consequentemente de convecção.

Na Figura 7.6, são apresentados os compostos de ROL para os casos de secas identificados para cada área durante o trimestre DJF. Uma configuração de grande escala semelhante nos casos de A1V (a) e A2V (b) pode ser observada; valores positivos são visualizados não somente nas áreas de interesse, mas também sobre o Pacífico Central-Oeste, representando inibição da convecção nas regiões mencionadas. Uma relação entre o padrão

observado e eventos de La Niña mais central pode ser estabelecida a partir do observado em A1V, consistente com a TSM. Além disso, um dipolo entre a região do Pacífico destacada e a região da Indonésia pode ser identificado, havendo uma variação da sua posição em cada caso, e que pode ser associada às diferentes fases da OMJ. Essas anomalias são forçantes para os trens de onda identificados na Figura 7.4. Em escala regional, é possível observar um claro padrão de dipolo entre A1V (sul do Brasil, Uruguai e nordeste da Argentina) e A2V (sudeste, sul do NE e parte do CO do Brasil, além do Atlântico Sul), o que significa que períodos secos em A1V, ocorrem simultaneamente a períodos mais chuvosos em A2V, e vice versa

Em A3V (c), por outro lado, as anomalias positivas observadas contrastam com aquelas vistas sobre a maior parte do Pacífico Tropical, padrão coerente com as anomalias positivas de TSM nesta região na Figura 5 (c), associadas a eventos de El Niño. Também se observa sobre a Indonésia e extremo norte da Austrália ROL acima da média durante os eventos de seca registrados. Tal comportamento é típico de eventos de El Niño, quando há menos convecção sobre esta região e é relacionado a uma mudança nos padrões da circulação de Walker.

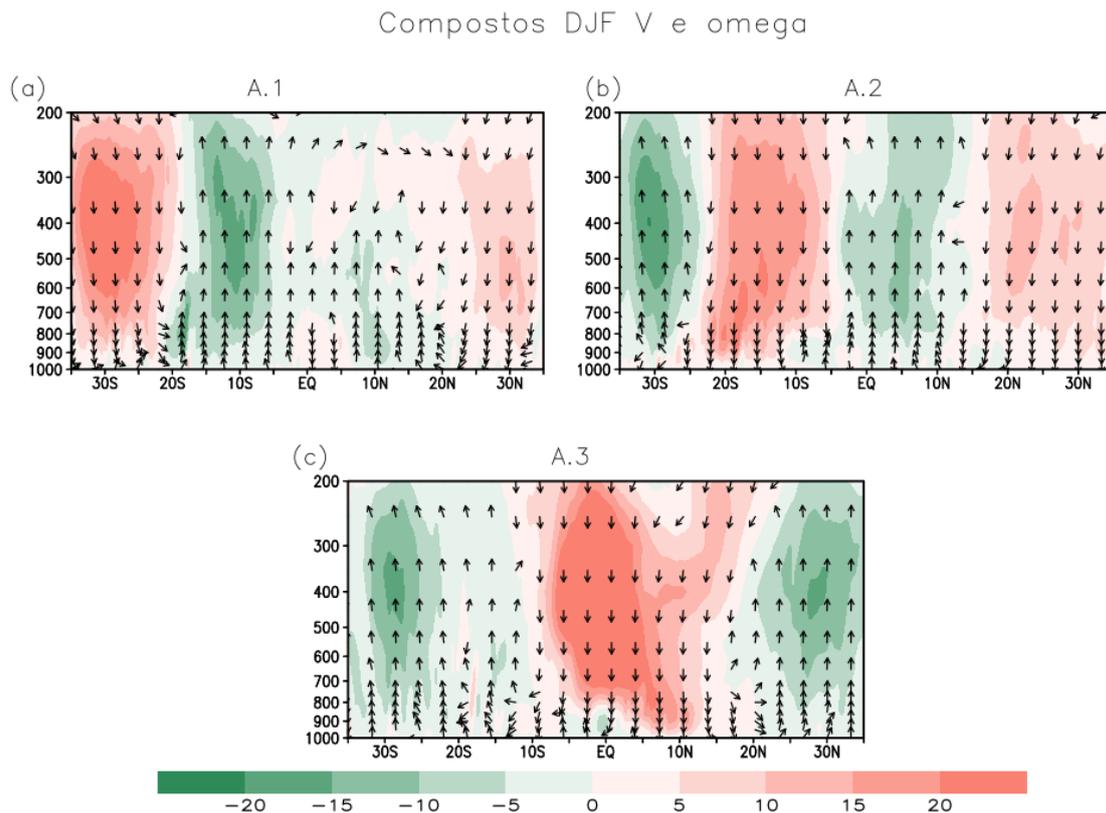
Figura 7.6 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).



As anomalias observadas nas células de circulação meridional, mostradas na Figura 7.7, convergem com os compostos de precipitação dos casos de seca durante o trimestre do verão. Assim como observado nos referidos campos e em ROL, os dipolos existentes em A1V e A2V são bem representados pelos movimentos ascendentes e subsidentes nas Figuras 7.7 a e b, o que explica a inibição de convecção e consequentemente redução das chuvas nas regiões de movimento subsidente, como observado nas Figuras 7.1 a e b. Uma região de movimento subsidente ou enfraquecimento da ascensão de ar, é estabelecida sobre A3V, estendendo-se até aproximadamente $15^{\circ}N$, enquanto anomalias de sinal oposto são observadas mais ao norte, entre 20 e $35^{\circ}N$ (Figura 7.7c). Tal comportamento anômalo pode ser associado ao aquecimento anormal das águas do Atlântico Tropical Norte próximo ao Golfo do México que é mostrada na Figura 7.3. A configuração pode contribuir para o deslocamento da ZCIT para norte, importante sistema precipitante no norte da AS, resultando em menores volumes de chuva em A3V. Isto indica que alterações da

circulação meridional – Célula de Hadley também podem ter contribuído para ocorrência de períodos mais secos na região em questão.

Figura 7.7 Compostos de anomalia de circulação média meridional ($65^{\circ}\text{O} - 45^{\circ}\text{O}$) durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).



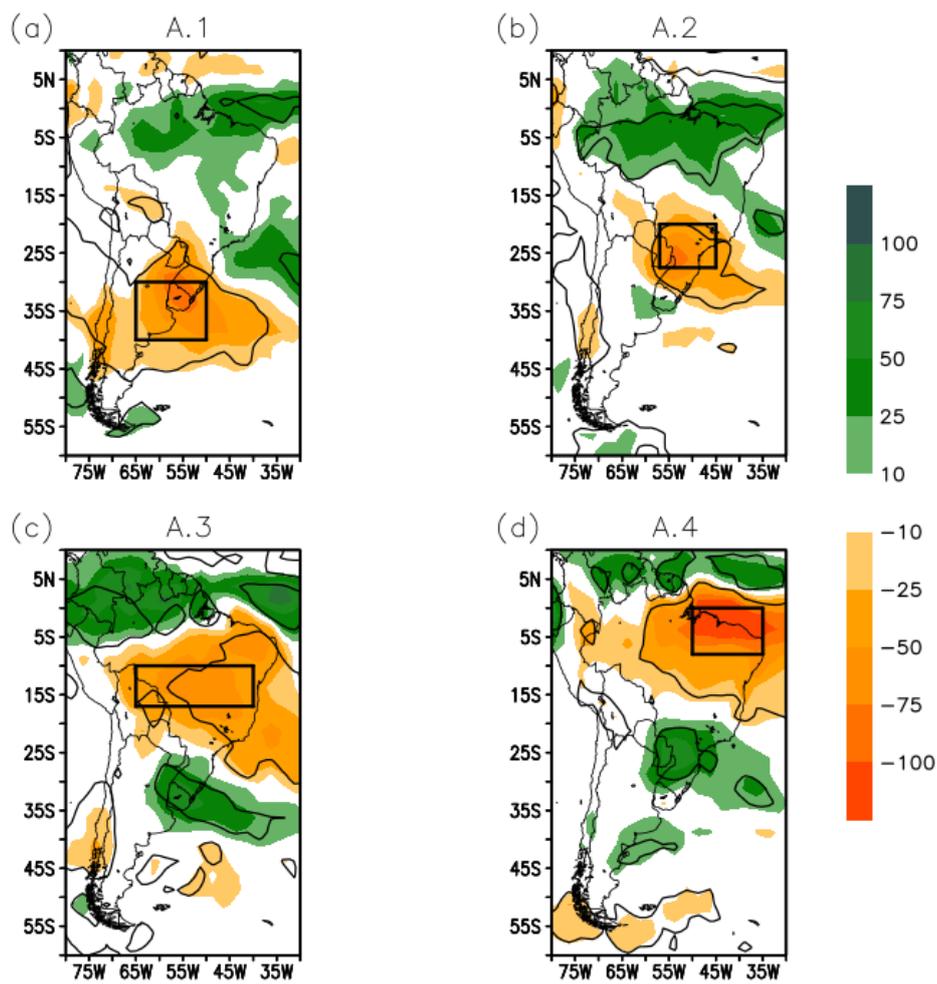
7.2 Outono

Os compostos de anomalia de precipitação para as áreas homogêneas do trimestre de março/abril/maio são mostrados na Figura 7.8. Em latitudes mais baixas, em regiões tropicais (c e d), observa-se que, simultaneamente a períodos secos, anomalias positivas de precipitação são observadas sobre o sul do Brasil, indicando a existência de uma configuração de dipolo. Na área A3O ainda é evidente a variabilidade da ZCAS, que pode ocorrer em março e abril; na área A4O a configuração indica a variabilidade da ZCIT. Já os compostos para A1O (a) A2O (b) demonstram que chuvas abaixo da média

nestas regiões, ocorrem em casos de chuva acima da média próximo ao equador, principalmente nas proximidades da costa norte do Brasil.

Figura 7.8 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d). Os contornos delimitam as regiões que apresentaram anomalias com significância estatística no nível 0,1 (teste T – Student).

Compostos MAM Anomalia Precip (mm mes⁻¹)

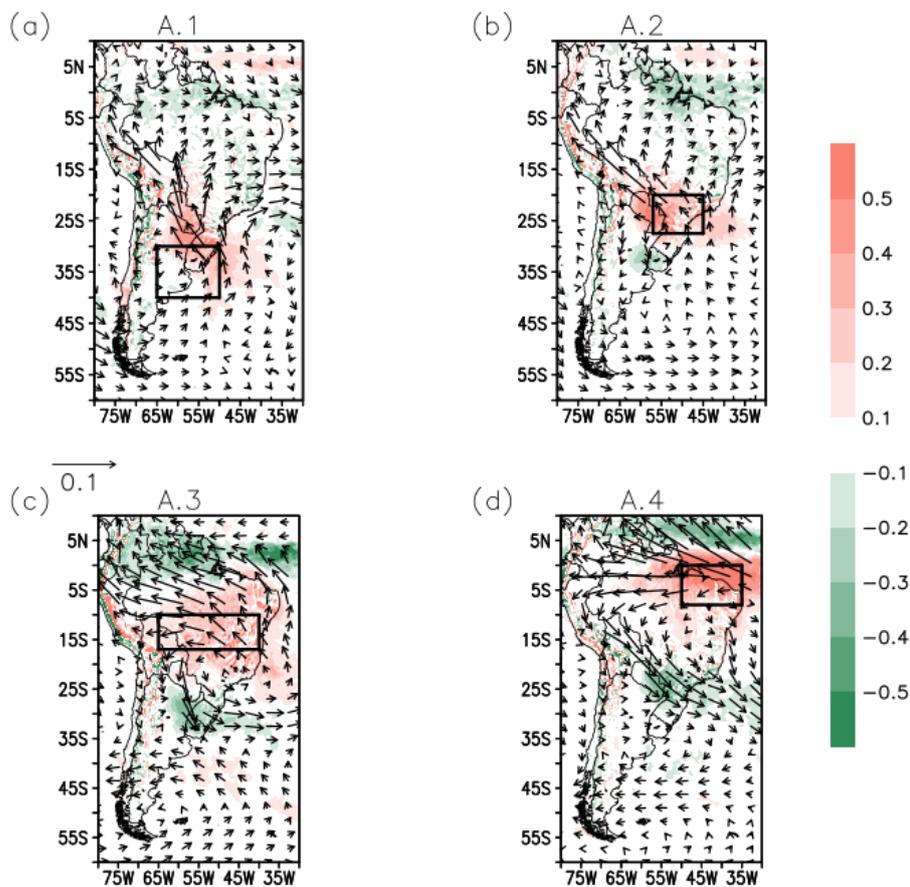


Na Figura 7.9 são mostrados os compostos de divergência e fluxo de umidade integrado durante o outono (MAM). Destaca-se A4 (d), onde são observadas anomalias de magnitude mais expressivas no campo de divergência, um reflexo das anomalias mais intensas de fluxo de umidade para norte/noroeste,

em direção ao ATN. Tal comportamento é consistente com o movimento subsidente anômalo observado na Figura 7.12 (d). Sobre A10, A20 e A30 também se observa redução da convergência de umidade embora as anomalias identificadas sejam menos intensas, assim como o fluxo de umidade, contribuindo para a diminuição das chuvas e conseqüentemente a ocorrência das secas.

Figura 7.9 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Compostos MAM Fluxo Umidade Integrado e Div

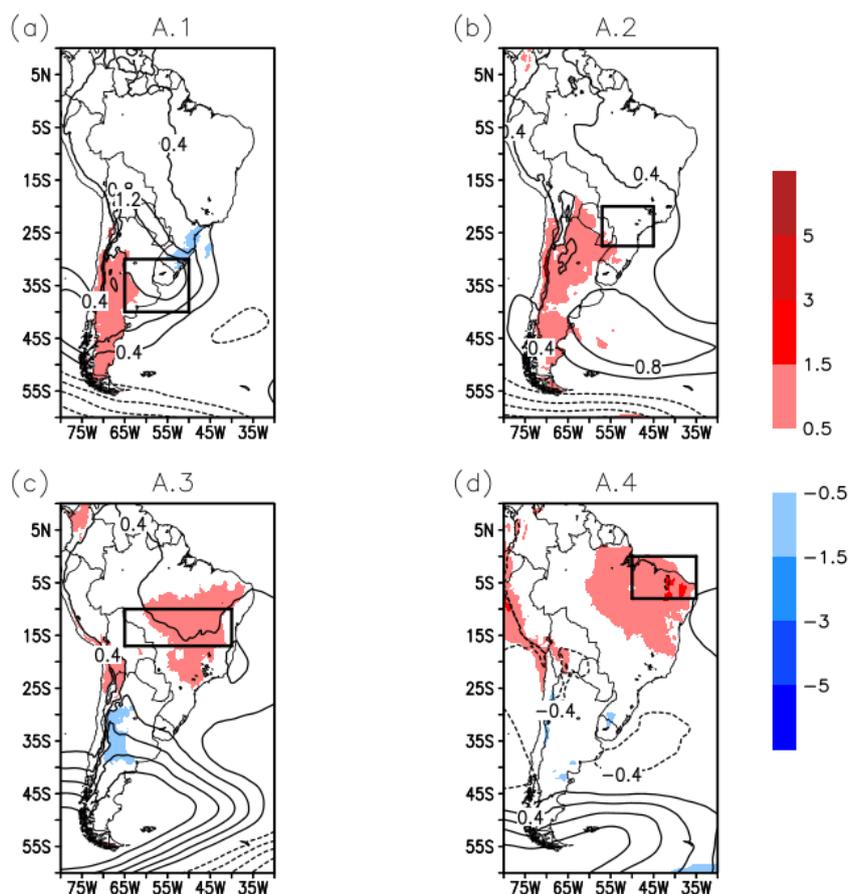


Assim como nos resultados obtidos para o verão, anomalias positivas mais expressivas no campo de temperatura foram identificadas nas áreas

localizadas em latitudes tropicais – A3O e A4O (Figura 7.10 c e d), potencializando desta forma, os impactos dos eventos secos nestas regiões. Nessas figuras também são mostradas anomalias de PNMM, e principalmente no setor leste de A1O (a) e A2O (b), destaca-se a influência de anomalias positivas de pressão em superfície nestas regiões. O aumento da pressão nestas áreas, as quais são frequentemente afetadas por sistemas frontais, pode representar um obstáculo para seu desenvolvimento e deslocamento.

Figura 7.10 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

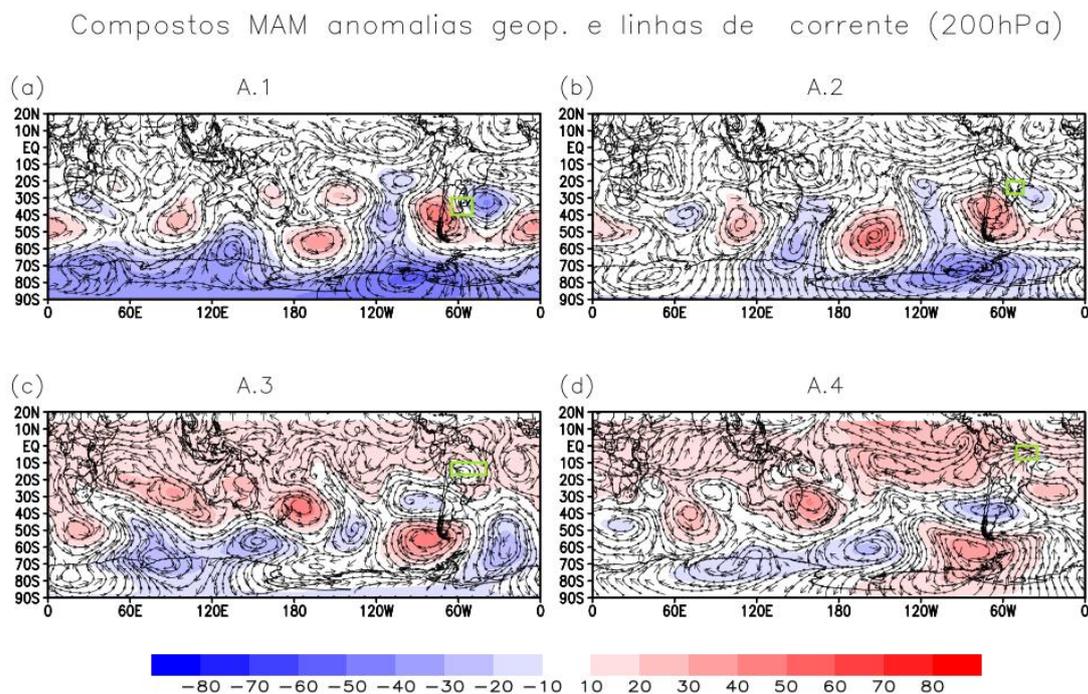
Compostos MAM Anomalias Temperatura (°C) e PNMM (hPa)



Os compostos de geopotencial e escoamento em altos níveis mais uma vez evidenciam a influência exercida por trens de ondas que se propagam

geralmente em latitudes médias até os subtropicos (Figura 7.11), como pode ser observado especialmente em relação às áreas 1 e 2 (a). Os trens de ondas que influenciam as condições meteorológicas nessas regiões possuem centros de ação próximo à Austrália, sobre o Pacífico Sul e sobre a América do Sul. As anomalias positivas de geopotencial a oeste de A1O e A2O, atuam intensificando movimentos subsidentes sobre as regiões, o que inibe o desenvolvimento de sistemas precipitantes.

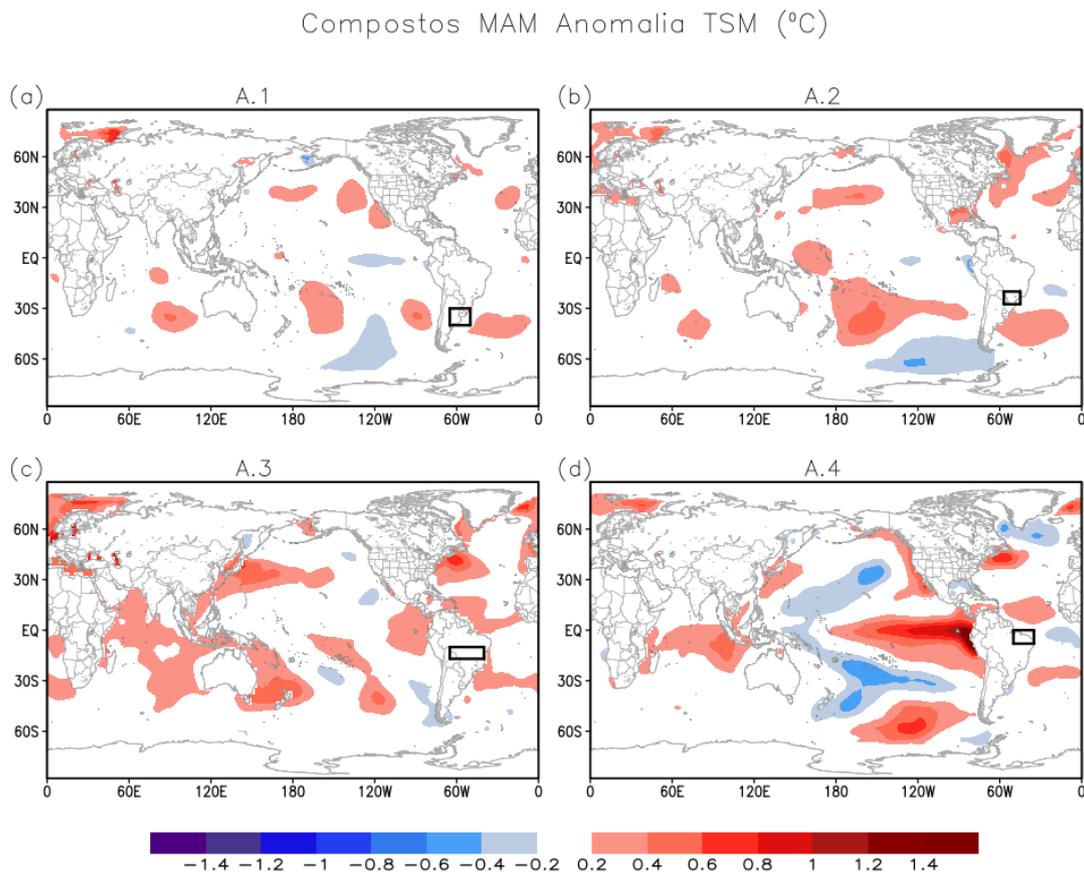
Figura 7.11 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).



Além disso, a configuração estabelecida pode estar associada a uma anomalia positiva no campo de pressão em baixos níveis, que dificulta o avanço de sistema frontais sobre as regiões. Também é identificada a fase positiva do Modo Anular Sul, principalmente no composto da A1O, com anomalias negativas de geopotencial nas latitudes altas e centros de anomalias positivas nas latitudes médias. A influência dessa fase é consistente com as análises de seca na área 1. Sobre A3O há uma anomalia ciclônica em altos níveis, que é

associada com convergência nesses níveis e subsidência sobre a área de seca.

Figura 7.12 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

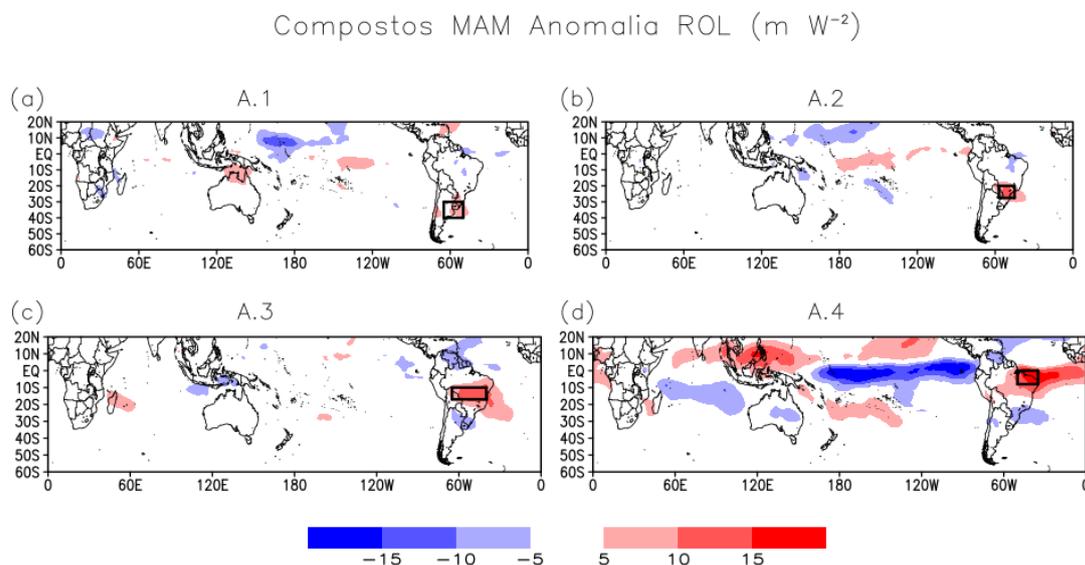


Durante o outono, observa-se que o Pacífico Tropical (Figura 7.12) também exerce influência sobre a variabilidade de chuvas de A4O (d), que corresponde ao norte do nordeste do Brasil. Assim como observado durante o verão, o oceano Pacífico desempenha papel importante na circulação da América do Sul. Outros estudos já demonstraram a relação existente entre a TSM do Pacífico, e as alterações na circulação de Walker que afeta o NE em episódios de El Niño. O resultado encontrado aqui é coerente com as análises anteriores, como por exemplo, Kousky et al. (1983), Kayano e Andreoli (2006) e outros. Nos compostos das áreas A1O e A2O, as anomalias de TSM são relacionadas

com os trens de onda de Rossby, identificados na Figura 7.11a e b, em geral associados ao modo de variabilidade PSA.

Sobre todas as áreas analisadas durante o trimestre MAM, os compostos de anomalias de ROL (Figura 7.13) demonstram a inibição da convecção, coerente com a redução de precipitação observada durante os episódios de seca. O comportamento observado sobre o Pacífico no caso de A4O converge com o comportamento das anomalias de TSM mostrado Figura 7.12 (d), que é coerente com o padrão associado a episódios de El Niño, cuja predominância foi verificada neste estudo (foi registrado em 70% dos casos identificados). A influência do fenômeno sobre a circulação e regime de chuvas no norte e nordeste do continente são conhecidas, e discutidas neste trabalho.

Figura 7.13 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

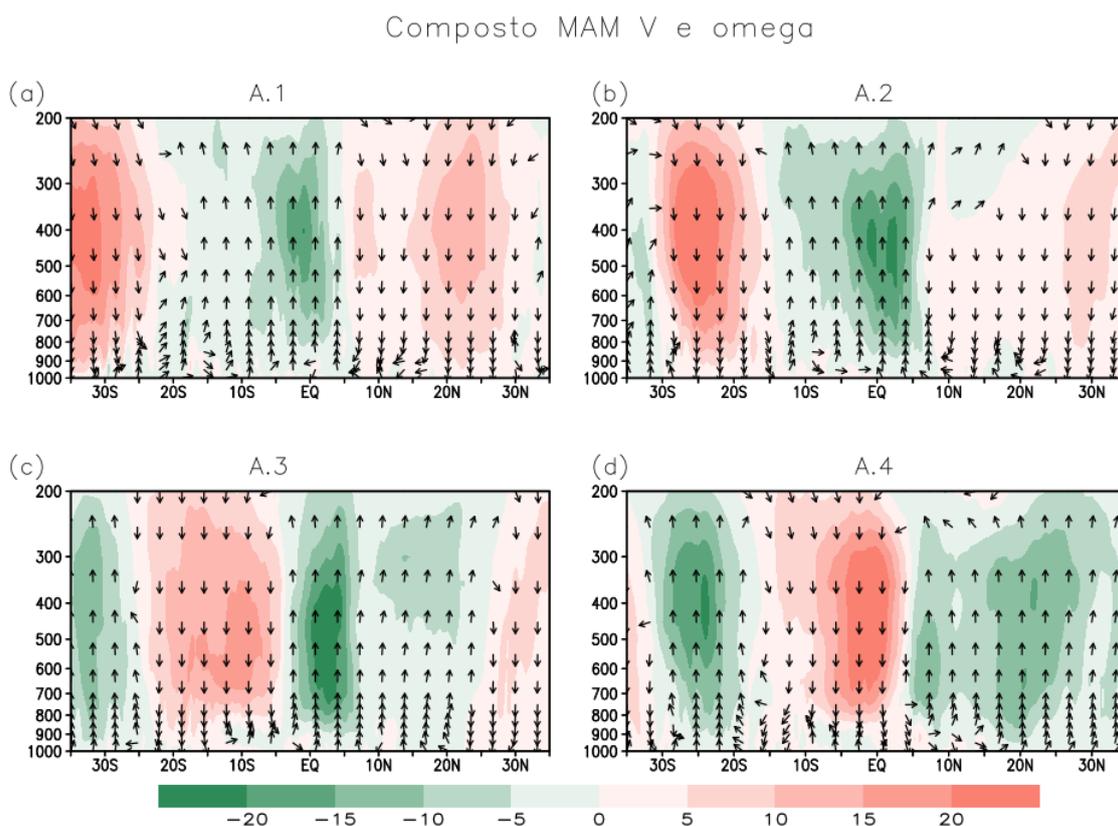


Anomalias observadas nos compostos da circulação meridional na Figura 7.14 refletem o comportamento de chuvas e de ROL identificados sobre cada uma das áreas, com movimento subsidente anômalo sobre as regiões analisadas. Destaca-se o padrão de alternância de sinais das anomalias, indicando que

ocorrem períodos de intensificação da convecção em setores a sul e a norte, concomitantemente a eventos de seca nas áreas de estudo.

Assim como identificado durante o verão, a área homogênea mais ao norte também se encontra sob anomalias positivas de ômega, sendo o oposto observado sobre a região localizada mais a norte, que corresponde ao Atlântico Norte.

Figura 7.14 Compostos de anomalia da circulação média meridional ($65^{\circ}\text{O} - 45^{\circ}$) durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).



É importante destacar que, neste caso, a última área homogênea (A4O) localiza-se sobre o norte do Nordeste do Brasil, a qual tem o período chuvoso concentrado nesses meses do outono. Desta forma, os movimentos subsidentes anômalos nesta região desempenham um papel importante na qualidade da estação chuvosa. Assim como observado anteriormente, tem-se

anomalias positivas de TSM sobre o ATN, e isto é consistente com o padrão de movimento ascendente anômalo sobre esta região, ou seja, as águas superficiais do Atlântico Norte mais aquecidas, auxiliam no deslocamento da ZCIT para norte, implicando em condições de seca sobre A4O.

7.3 Inverno

Os compostos referentes às anomalias de precipitação para A1I, A2I, A3I e A4I em Junho/Julho/Agosto, são mostradas na Figura 7.15. Eles evidenciam a relativa fraca intensidade dos eventos que as atingem neste período, comparado ao verão. Tal comportamento é coerente com a identificação dos casos de seca realizada anteriormente, onde verificou-se que mais de 51% do total de fenômenos registrados eram moderados.

Destaca-se ainda que, na A3I (c) as chuvas apresentaram uma diminuição de menor magnitude em relação às demais áreas. Deve-se levar em consideração, no entanto, que a região é caracterizada pelo regime de monções da América do Sul, onde os invernos costumam ser naturalmente muito secos, relativizando desta forma, o quão expressiva a anomalia pode ser.

As anomalias positivas identificadas no campo de divergência de umidade são coerentes com o movimento subsidente anômalo observado sobre as áreas homogêneas, como visto na Figura 7.16. Essas alterações no fluxo de umidade integrado representam uma contribuição para ocorrência dos eventos seca. No caso da A2I, as anomalias indicam uma redução do fluxo na região, e uma intensificação da divergência considerável pode ser observada, inibindo os processos precipitantes.

Figura 7.15 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d). Os contornos delimitam as regiões que apresentaram anomalias com significância estatística no nível 0,1 (teste T – Student).

Compostos JJA Anomalia Precip (mm mes^{-1})

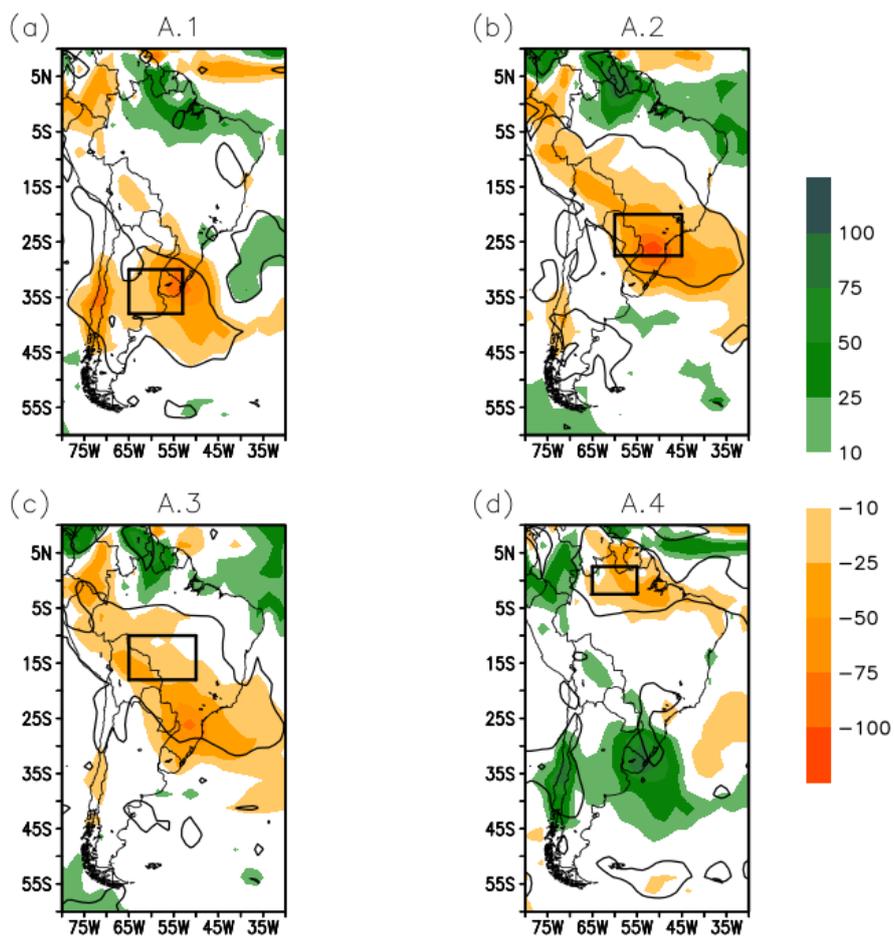
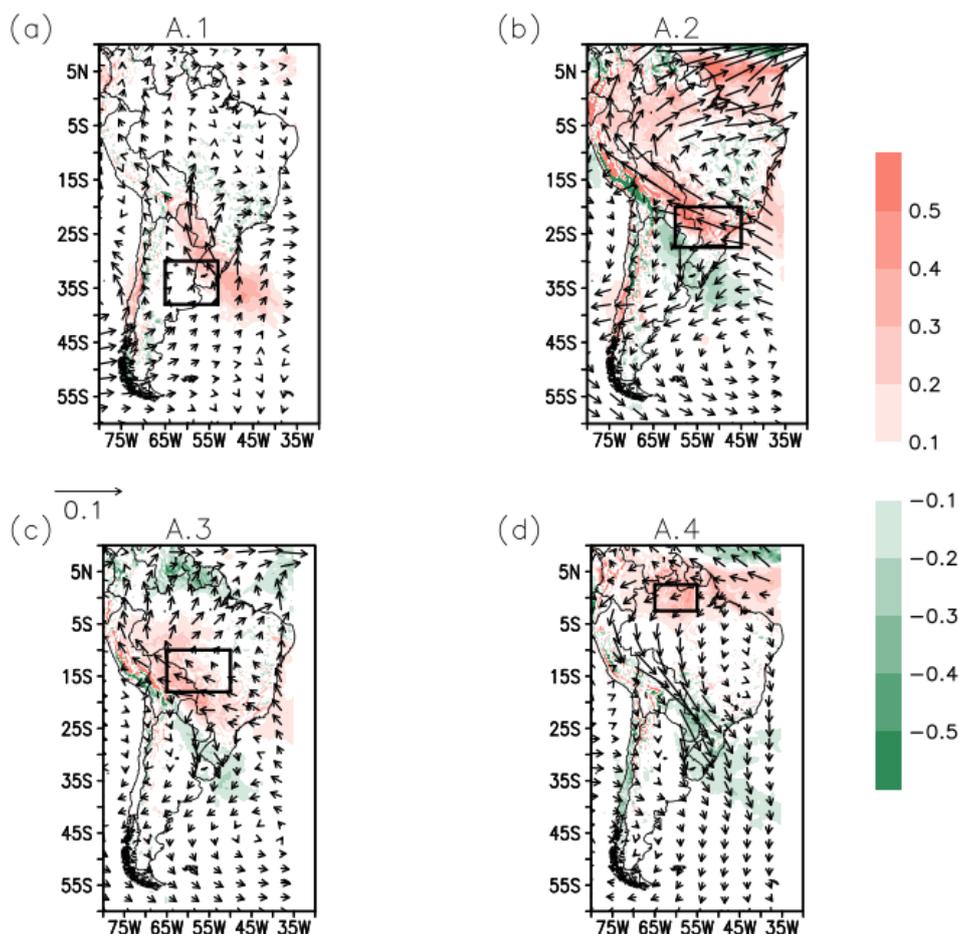


Figura 7.16 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Compostos JJA Fluxo Umidade Integrado e Div

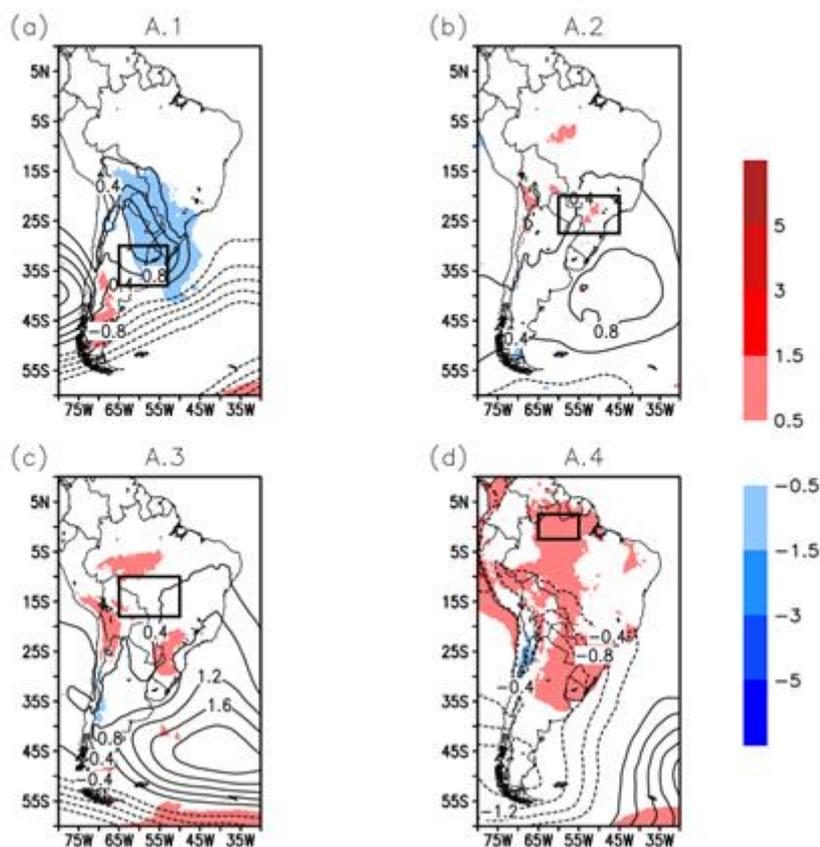


Os compostos de anomalias de pressão em superfície sugerem uma relação entre tais valores e os períodos de seca nas áreas 1, 2 e 3, na Figura 7.17. No composto de A1I, além do centro de anomalias positivas sobre o continente e a área seca, é possível visualizar um centro de anomalias positivas sobre a região da Alta Subtropical do Pacífico Sul. Embora anomalias negativas de temperatura sejam observadas ao norte da área da seca, o que pode indicar a passagem de sistemas frontais, a alta pressão pode resultar na desintensificação desses na região pós frontal. No composto de anomalias de precipitação (Figura 7.15), há chuvas acima da média a nordeste de A1I, o que

pode ser associado à passagem de sistemas frontais. Em A2I e A3I também há anomalias positivas sobre o Atlântico Sudoeste se estendendo para o continente, o que indica a presença da ASAS mais intensa e mais continental, afetando de forma semelhante o desenvolvimento de frentes e outros sistemas que costumam atingir as regiões. Na A4I, considerável aumento da temperatura em relação à média pode ser observado, e isto impacta na evaporação, bem como nos efeitos das secas.

Figura 7.17 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

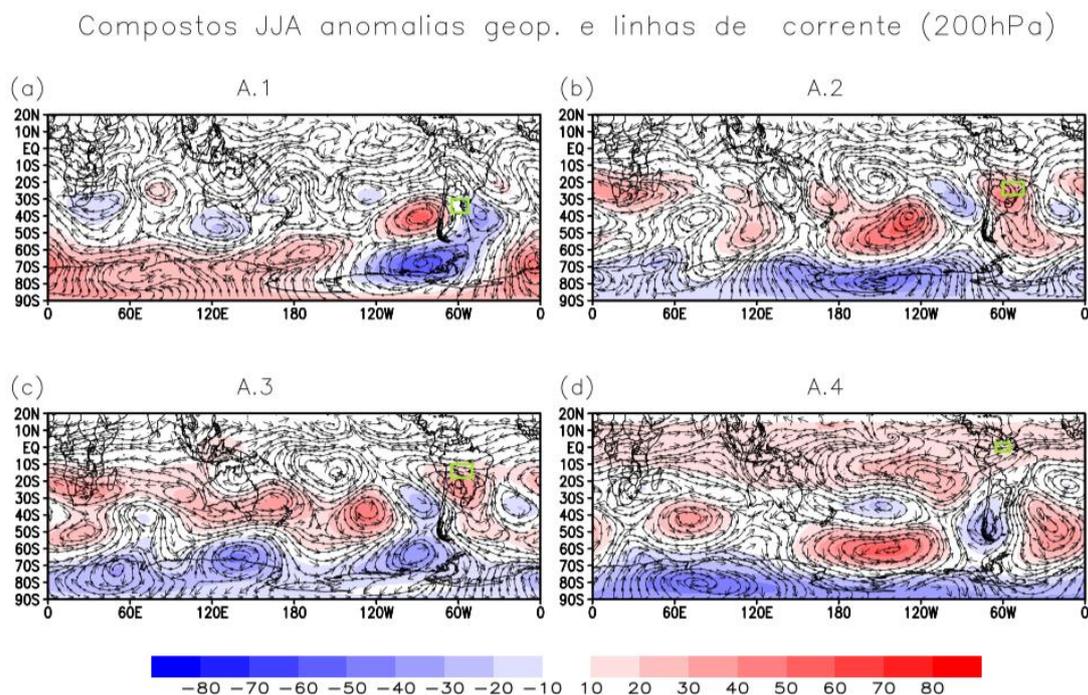
Compostos JJA Anomalias Temperatura (°C) e PNMM (hPa)



Na Figura 7.18 são mostrados os compostos de anomalias de geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante o inverno (JJA). Em A2I (b) e A3I (c) os centros anômalos apresentam relação com a propagação ondulatória na

atmosfera, originária do Pacífico, porém com uma configuração diferente das outras estações. Nas áreas mencionadas, anomalias positivas no campo de geopotencial em altos níveis podem ser observadas desde a costa SO do continente sul americano até a Argentina.

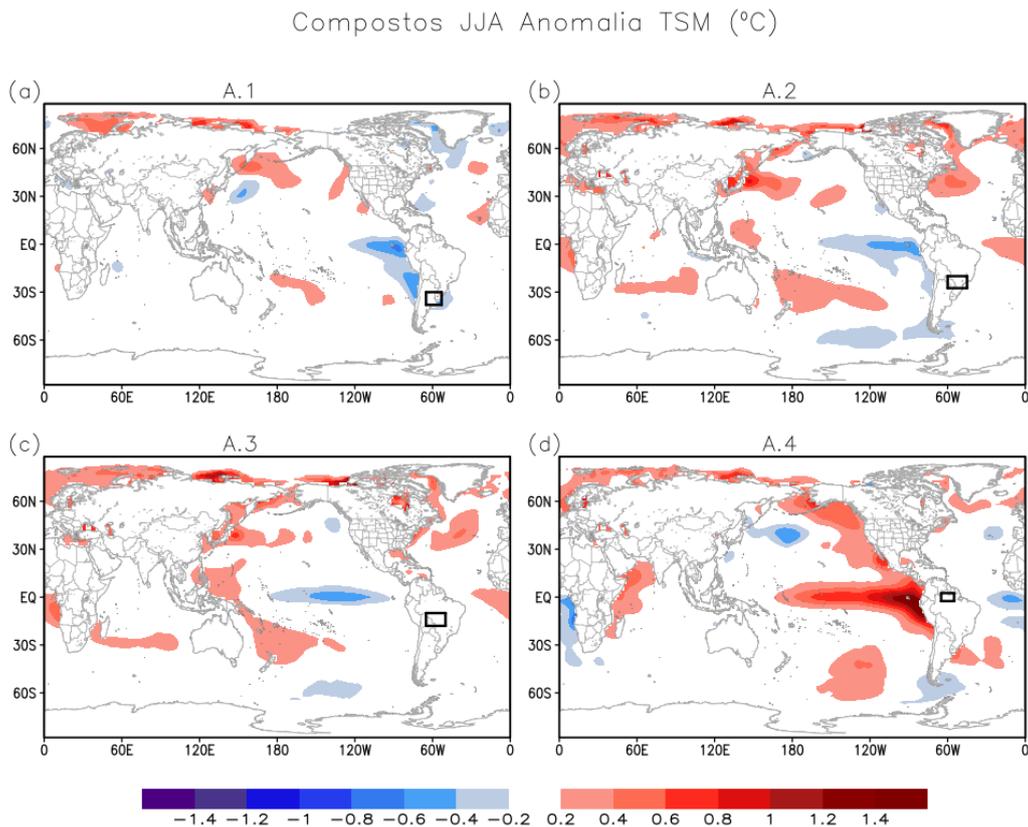
Figura 7.18 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).



Um padrão anômalo de circulação anticiclônica também pode ser observado sobre uma ampla área que inclui SE e S do Brasil, norte da Argentina e Paraguai, dificultando os processos de desenvolvimento de chuvas e alterando a trajetória de frentes frias. Em A2I, A3I e A4I observou-se a predominância de anomalias negativas de geopotencial no pólo sul, indicando a ocorrência do Modo Anular Sul em sua fase positiva. De acordo com Carpenedo e Ambrizzi (2020), este modo de variabilidade fortalece a ASAS, e há indícios de maior atividade de bloqueios atmosféricos e/ou anticiclones, resultando em menos chuva no centro sul do Brasil.

As anomalias de TSM durante os eventos de seca no inverno são apresentados na Figura 7.19. Assim como observado durante o verão, em A4 (a), que abrange a Amazônia, as secas estão relacionadas à ocorrência de El Niño (mais de 70% dos eventos secos ocorreram durante episódios de El Niño). Por outro lado, o resfriamento do Pacífico Central e Leste parece predominar em casos de seca registrados em A1I, A2I e A3I, ainda que inúmeros eventos tenham sido registrados durante a fase negativa e neutra do ENOS nessas áreas.

Figura 7.19 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).



É importante ressaltar que em A1I, anomalias negativas de TSM no Atlântico, embora fracas, aparecem próximas à costa da área homogênea, o que pode ter contribuído para o estabelecimento de anomalias positivas de pressão, e

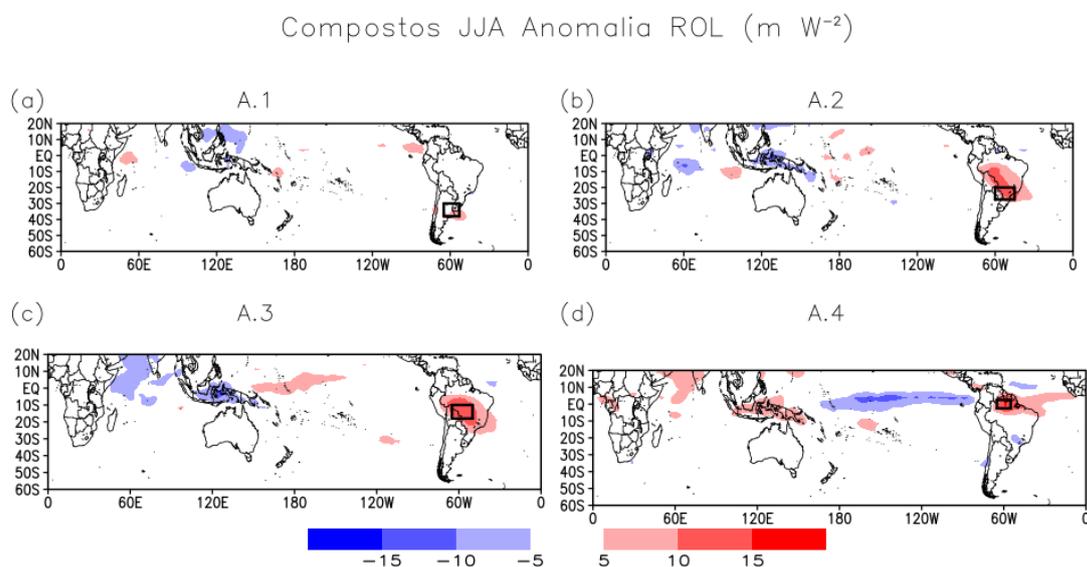
consequentemente, enfraquecendo os sistemas transientes que costumam se deslocar pela região nesta época do ano.

Valores anômalos elevados de ROL foram observados especialmente sobre as áreas 2, 3 e 4, na Figura 7.20, enquanto apenas a porção sul da área 1 (a) apresentou um aumento em relação aos valores médios. A convecção é um processo naturalmente reduzido durante o inverno, tendo em vista o menor aquecimento diurno, em especial sobre latitudes altas e médias. O comportamento observado pode ser provocado, portanto, por uma redução da nebulosidade, bem como a diminuição de umidade, e consequentemente menor absorção de radiação nesta faixa do espectro. Sabe-se ainda que este período caracteriza o início da estação seca de monção, quando há um enfraquecimento do transporte de umidade do oceano para o continente.

O padrão observado com relação à A4I (d), localizada mais a norte do continente, repete o comportamento identificado para o setor nas demais estações, e é consistente com as anomalias de TSM (Figura 7.19), que estabelece uma relação entre as secas e eventos de El Niño; anomalias negativas sobre o Pacífico Tropical central e leste sugerem um aumento de nebulosidade no oceano, o oposto no norte da AS e Indonésia.

Uma ampla região que se estende desde o centro até o SESA com considerável anomalia positiva de ROL é observada nos compostos de casos de seca das A2I (b) e A3I (c). Em comum, observa-se ainda intensificação da convecção sobre a região do Indonésia, e que pode explicar a propagação dos trens de ondas sobre o Pacífico até o continente, observado na Figura 7.18.

Figura 7.20 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

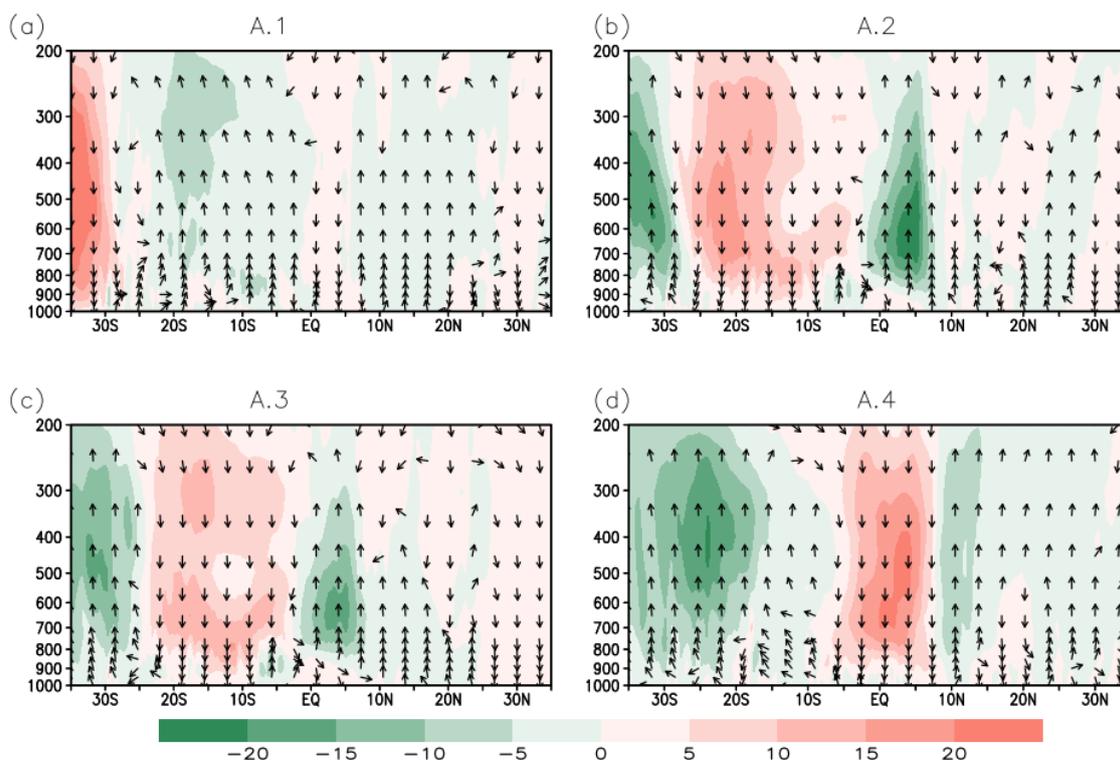


As anomalias no campo de movimento vertical indicam intensificação dos movimentos subsidentes anômalo sobre A1, (Figura 7.21 a), coerente com o padrão de anomalias de ômega, esperados entre áreas de anomalias positivas e negativas de geopotencial como identificado na Figura 7.18a. A atuação de uma anomalia anticiclônica sobre o Pacífico, que adentra o sudoeste do continente afeta a A1I, é relacionada com esse movimento subsidente de maneira a deslocar a trajetória de eventuais sistemas frontais, principal fonte de chuvas na região nesta época do ano.

A circulação meridional anômala identificada sobre as A2I (b) e A3I (c), com predominância de movimentos subsidentes explica a inibição das chuvas identificada nos compostos de anomalias de precipitação. O setor norte, representado pela A4I (d) também mostrou alterações no campo de circulação, com movimentos subsidentes, circundados por movimentos ascendentes, coerente com os padrões identificados nos campos de ROL (Figura 7.20), TSM (Figura 7.19) e precipitação (Figura 7.15).

Figura 7.21 Compostos de anomalia de circulação média meridional ($65^{\circ}\text{O} - 45^{\circ}\text{O}$) durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Composto JJA V e omega



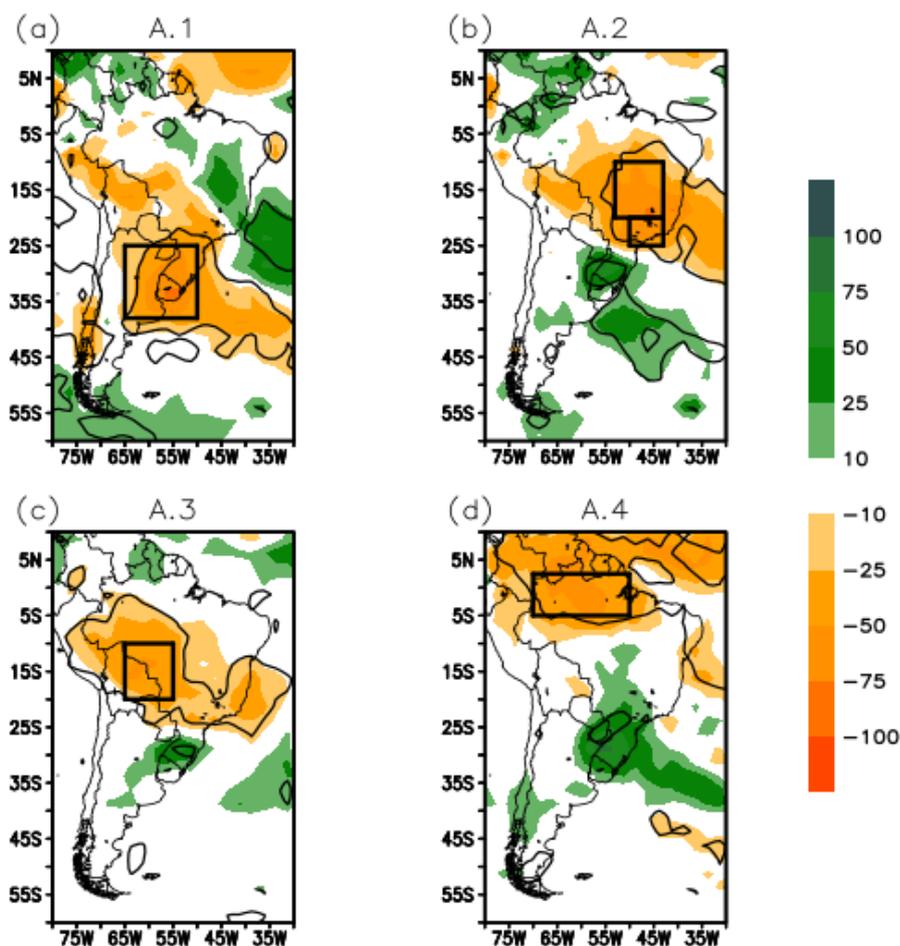
7.4 Primavera

Os compostos apresentados na Figura 7.22, representam as anomalias de precipitação observadas durante o trimestre de Setembro/Outubro/Novembro para as 4 áreas homogêneas identificadas no período. Como é possível observar, em especial nas três primeiras regiões analisadas, têm-se uma discreta mas perceptível intensificação das anomalias, em relação à estação anterior. Ainda assim, mais de 51% dos eventos registrados no período foram classificados como moderados, como mostrado na Tabela 4.

Outro fator a ser destacado, e também observado nos compostos das outras áreas, é a persistência de dipolos de precipitação. As três últimas áreas (b, c e d); períodos mais secos em regiões tropicais do continente, ocorrem durante casos com chuvas acima da média no sul do país, e em casos de seca na região sul (A1P), há anomalias positivas ao norte.

Figura 7.22 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d). Os contornos delimitam as regiões que apresentaram anomalias com significância estatística no nível 0,1 (teste T – Student).

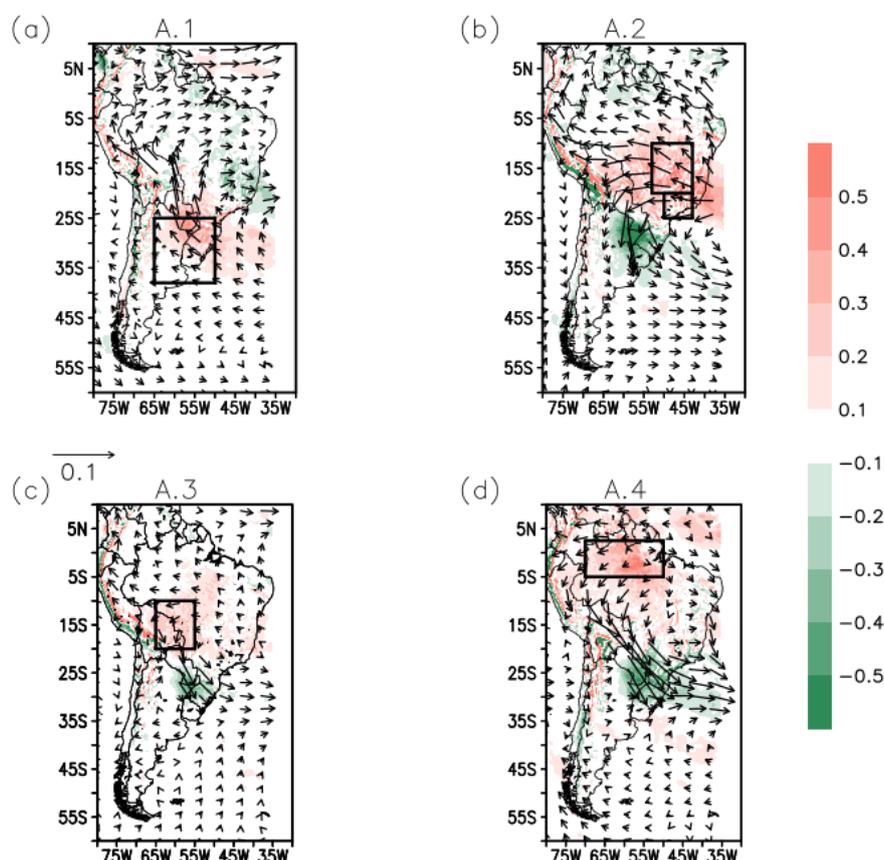
Compostos SON Anomalia Precip (mm mes⁻¹)



Assim como observado nas demais estações do ano, a divergência de umidade exerce um papel importante na caracterização de eventos de seca. Anomalias positivas são observadas na Figura 7.23, para todas as áreas homogêneas de SON, com destaque especial para A2P e A4P. No caso da A2P, por outro lado, identifica-se redução do fluxo de umidade.

Figura 7.23 Compostos de anomalia de divergência de fluxo de umidade integrado durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

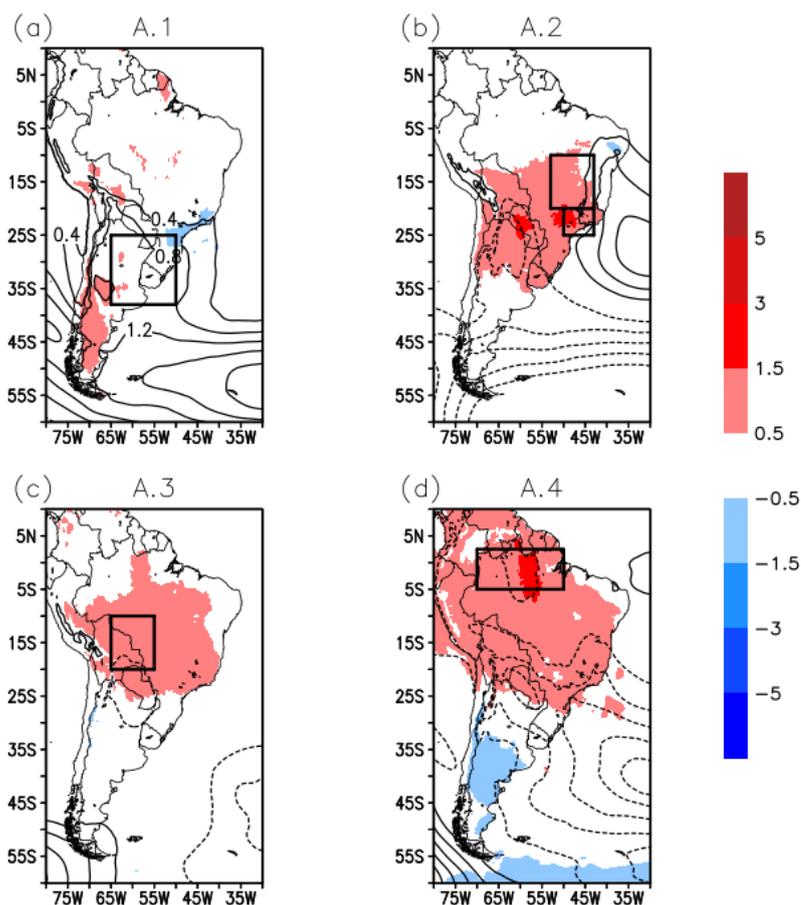
Compostos SON Fluxo Umidade Integrado e Div



Valores elevados da temperatura próximo à superfície são evidentes em SON, conforme mostrado na Figura 7.24, principalmente nas áreas A2P (b), A3P (c) e A4P (d), os quais atingem grandes extensões continentais durante os períodos de seca. Além disso, anomalias positivas no campo de pressão a nível médio do mar podem ser observadas atuando sobre as bordas das áreas A1P e A2P, o que também pode resultar na desintensificação de sistemas ou mudança da trajetória dos mesmos.

Figura 7.24 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

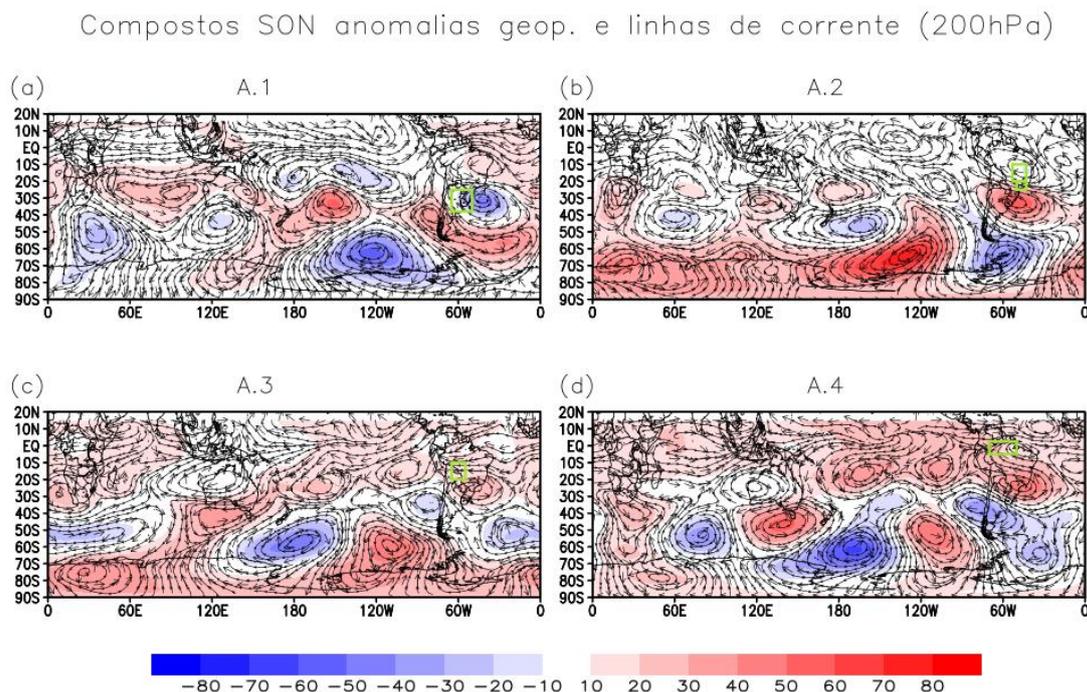
Compostos SON Anomalias Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e PNMM (hPa)



Assim como observado durante o verão, nos compostos de anomalia de geopotencial (Figura 7.25) há a predominância é de um trem de ondas número 3 nos compostos das áreas A1P, A2P e A4P, e número de onda 2 no compostos da área A3P. Os centros sobre a América do Sul atuam dinamicamente com movimentos ascendentes e subsidentes, afetando a precipitação. A advecção anticiclônica sobre a A1P (a) e ciclônica sobre o SE é consistente com as respectivas anomalias de chuvas que aparecem nas regiões mencionadas (Figura 7.22). Por outro lado, uma configuração oposta e de dipolo também pode ser observada ao analisar os compostos de geopotencial e linhas de corrente em altos níveis para a área 2 (b). Este padrão

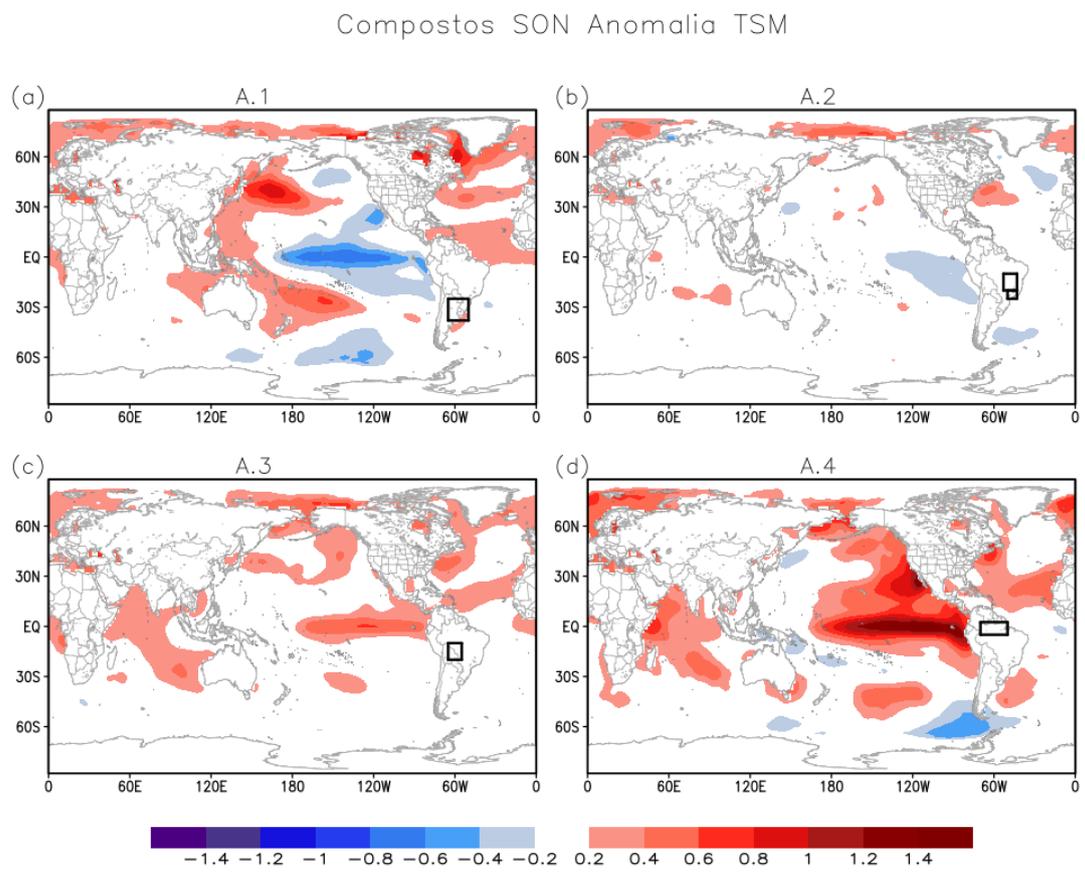
é consistente com o dipolo de precipitação entre essas regiões. Os centros nos compostos das áreas 3 e 4 também são consistentes com as anomalias de precipitação.

Figura 7.25 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).



Diferente do observado durante o inverno (Figura 7.19), em eventos secos na área central do continente (Figura 7.26c, A3P) durante a primavera, predomina o aquecimento anômalo do Pacífico Tropical. Também é evidenciada mais uma vez a relação entre episódios de El Niño e menos chuva na Amazônia (Figura 7.26d). Da mesma forma, fica evidente novamente a alteração no regime de chuvas do sul do Brasil (Figura 7.24a) provocada pelo resfriamento do Pacífico, coerente com outros estudos realizados, tais como Grimm et al. (2000) e Grimm e Tedeschi (2009).

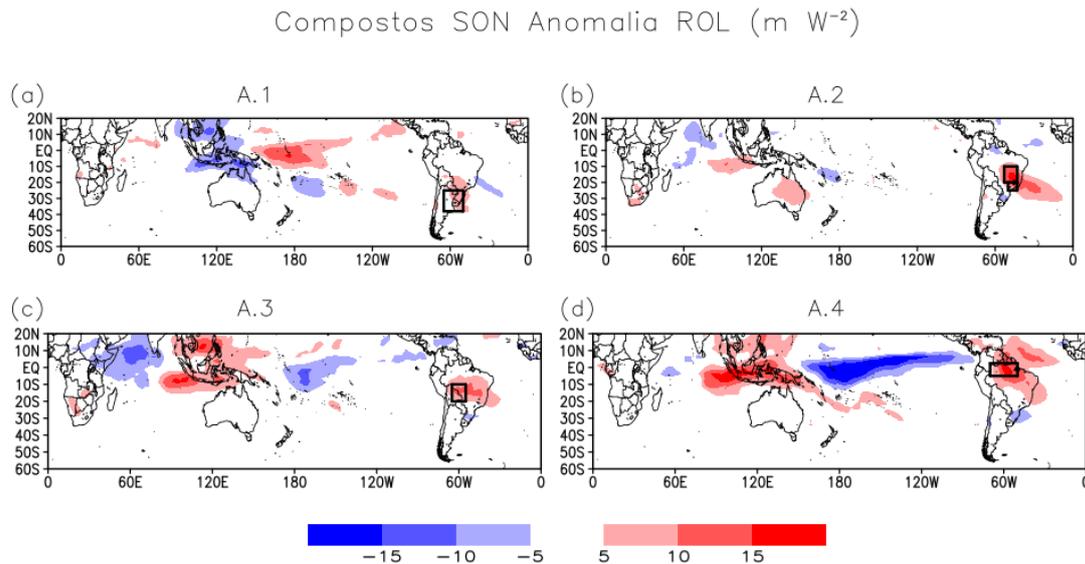
Figura 7.26 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).



As anomalias de ROL (Figura 7.27) associadas a secas identificadas sobre as áreas A3P e A4P apresentam alguns aspectos em comum, e que são coerentes com o observado no campo de TSM, onde observou-se uma relação direta entre eventos El Niño e episódios secos (embora a convecção mais forte sobre o Pacífico estenda-se mais para leste nos casos da A4P). A principal diferença entre os casos ocorridos na área A3P e as outras áreas, diz respeito a um outro centro de anomalias negativas sobre o oceano Índico, que forma também um dipolo com a região da Indonésia e que pode ser um mecanismo adicional para a ocorrência dos extremos de seca no centro do continente sul-americano. O padrão de ROL associado a casos de seca na área A1P também converge com o comportamento das anomalias de TSM identificadas na figura

anterior, onde se estabelece uma relação com intensificação da convecção na Indonésia e enfraquecimento no Pacífico Tropical (La Niña).

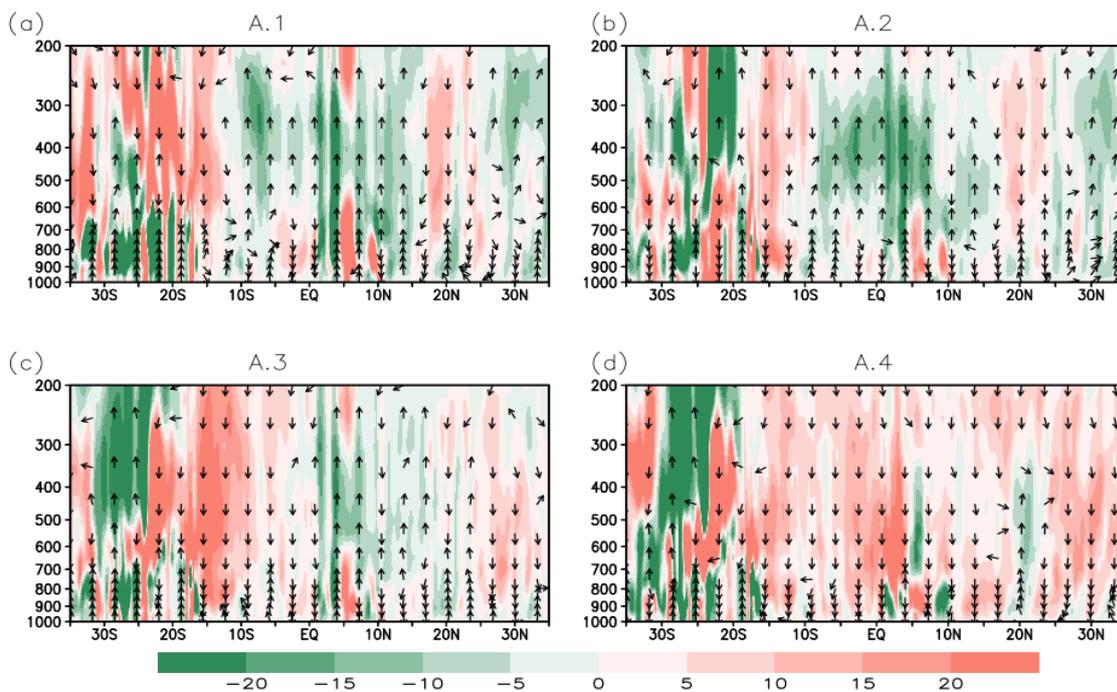
Figura 7.27 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Setembro/Octubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).



Os compostos referentes à circulação meridional anômala e ômega para SON são mostrados na Figura 7.28. As anomalias identificadas durante o trimestre foram menos intensas que as observadas nas estações anteriores, sem evidências de alterações associadas aos eventos de seca. Destaca-se apenas A3P, com considerável inibição dos movimentos ascendentes; em A4P também é identificada uma região com anomalias mais fortes de ômega e V entre aproximadamente 0° e 5N°. Em todos os casos, identifica-se de forma simultânea, a ocorrência de anomalias negativas de movimento vertical (movimento ascendente) nos subtropicais, as quais são mais intensas entre altos e médios níveis. Esse padrão é consistente com as anomalias positivas de precipitação observadas no sul do Brasil nesse período, durante eventos de seca em A3P e A4P, mostrado na Figura 7.22.

Figura 7.28 Compostos de anomalia de circulação média meridional ($65^{\circ}\text{O} - 45^{\circ}\text{O}$) durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), para os episódios de seca nas áreas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Compostos SON V e omega



8 IDENTIFICAÇÃO DOS EVENTOS SECOS EM UMA SIMULAÇÃO CLIMÁTICA COM O MODELO HADGEM3

Tendo definidas as áreas homogêneas em cada uma das estações do ano, foram utilizadas as saídas do HadGEM3 referentes ao período histórico e calculado novamente o SPI em escala mensal, a fim de verificar a capacidade do modelo de simular eventos de seca. Para que uma análise comparativa entre os dados observados e do modelo faça sentido, serão discutidos os eventos identificados na simulação, ocorridos entre 1982 e 2012, assim como feito no Capítulo 6.

Na Tabela 8.1 são mostradas as secas identificadas na simulação durante o verão, no trimestre DJF. Foram contabilizados mais episódios de seca na área 2, e menos na área 1. Observou-se uma maior frequência de eventos de intensidade moderada nas três áreas homogêneas nas simulações, sendo que, no caso da área 1, o mesmo número de eventos severos foi identificado. Em relação às secas mais intensas, comportamentos distintos foram verificados em cada uma das áreas: enquanto os casos severos foram mais frequentes que os extremos nas áreas 1 e 2, o oposto foi simulado na área 3.

Tabela 8.1 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF) na simulação do modelo.

Número de Eventos Secos Ocorridos no Trimestre DJF				
	Moderados	Severos	Extremos	Total
Área 1	5	5	1	11
Área 2	10	5	4	19
Área 3	9	2	4	15

Os eventos de seca identificados durante o outono (MAM) são mostrados na Tabela 8.2. Os eventos secos foram mais recorrentes na área 1, e menos frequentes nas áreas 2 e 3, diferentemente do comportamento identificado para o verão (DJF). Por outro lado, assim como na estação anterior, de maneira

geral (exceto na área 4) os eventos moderados foram aqueles que predominaram. Somente em A3 os eventos classificados como extremos ocorreram com maior frequência do que os severos, ao contrário do observado para as áreas 1 e 4.

Tabela 8.2 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Março/Abril/Maio (MAM) na simulação do modelo.

Número de Eventos Secos Ocorridos no Trimestre MAM				
	Moderados	Severos	Extremos	Total
Área 1	12	6	3	21
Área 2	8	3	3	14
Área 3	5	4	5	14
Área 4	5	7	5	17

Nas Tabelas 8.3 e 8.4 são mostrados os números de secas identificados por área homogênea, respectivamente na simulação do modelo para o inverno (JJA) e primavera (SON). Nas duas estações o número de eventos moderados registrados foi superior aos demais casos em todas as áreas homogêneas. Também durante o trimestre JJA, as secas classificadas como extremas foram as menos recorrentes em A1, A2, A3 e A4.

Tabela 8.3 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA) na simulação do modelo.

Número de Eventos Secos Ocorridos no Trimestre JJA				
	Moderados	Severos	Extremos	Total
Área 1	9	5	1	15
Área 2	8	5	2	15
Área 3	13	2	1	16
Área 4	7	4	3	14

O total de casos de seca contabilizados em cada área de SON foi o mesmo nas áreas 2, 3 e 4 (15 eventos), sendo superior em apenas 1 caso na área 1. Os eventos de intensidade extrema foram mais frequentes que os severos nas áreas 1 e 2, e menos frequentes nas áreas 3 e 4.

Tabela 8.4 Eventos secos identificados nas áreas homogêneas definidas para os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON) na simulação do modelo.

Número de Eventos Secos Ocorridos no Trimestre SON				
	Moderados	Severos	Extremos	Total
Área 1	9	2	5	16
Área 2	5	4	6	15
Área 3	8	4	3	15
Área 4	9	4	2	15

Nas Tabelas 8.5, 8.6, 8.7 e 8.8, são mostradas comparações entre os eventos secos identificados com dados observados e através da simulação do modelo HadGEM3 durante o período de 1982 e 2012, para respectivamente, verão (DJF), outono (MAM), inverno (JJA) e primavera (SON).

O total de casos de secas contabilizados em DJF (Tabela 8.5) com cada base de dado distinta se assemelha mais em A3, no entanto, em nenhuma das regiões foi identificado o mesmo número de eventos; os casos registrados em A2 e A3 simulados pelo modelo foram superiores aos observados, sendo o oposto identificado na área 1. Observou-se ainda, que o número de eventos extremos, foi equivalente em A1 e A3, e também para as secas moderadas em A2.

Tabela 8.5 Eventos de seca identificados nos meses de DJF com os dados do GPCP e do modelo HadGEM3.

Número de eventos de seca identificados – DEZ/JAN/FEV								
	Moderada		Severa		Extrema		Total	
	GPCP	HADGEM	GPCP	HADGEM	GPCP	HADGEM	GPCP	HADGEM
Área 1	6	5	7	5	1	1	14	11
Área 2	10	10	3	5	1	4	14	19
Área 3	4	9	5	2	4	4	13	15

O modelo mostrou-se expressivamente hábil na identificação de casos de seca nas áreas 3 e 4 em MAM (Tabela 8.6), tendo em vista a proximidade do número total de eventos contabilizados com o modelo e obtido com os dados de reanálise. Nas duas áreas, o modelo simulou um número inferior de eventos de seca moderada, e superior de extremos – vale ressaltar que os números de casos identificados com as saídas do modelo nas respectivas intensidades, foi a mesma em A3 e A4. As maiores diferenças verificadas entre os dados do GPCP e simulações do modelo foram observadas nas áreas 1 e 2, tanto no total de episódios identificados, quanto no número de secas moderadas e severas; com o modelo, foram identificados menos casos moderados e severos na área 2, e o contrário foi observado para a área 1.

Tabela 8.6 Eventos de seca identificados nos meses de MAM com os dados do GPCP e do modelo HadGEM3.

Número de eventos de seca identificados – MAR/ABR/MAI								
	Moderada		Severa		Extrema		Total	
	GPCP	HADGE M	GPCP	HADGEM	GPCP	HADGEM	GPC P	HADGE M
Área 1	6	12	3	6	5	3	14	21
Área 2	11	8	6	3	2	3	19	14
Área 3	6	5	6	4	3	5	15	14
Área 4	8	5	6	7	3	5	17	17

Os eventos moderados foram os mais frequentes durante o trimestre JJA, como mostrado na Tabela 8.7. Durante este período, observou-se uma maior homogeneidade no número de casos de seca identificados quando comparados os dados observados e os resultados das simulações, indicando que o modelo consegue reproduzir melhor os eventos ocorridos durante o inverno. Ao comparar os dados observados e as simulações do modelo, diferenças um pouco maiores são notadas quanto à intensidade dos eventos identificados; em relação aos dados observados, em termos gerais, o modelo simulou mais eventos severos, e menos eventos moderados – são exceções, para cada uma das intensidades mencionadas, respectivamente, A1 e A3. No caso das secas extremas identificadas neste período, o comportamento observado caracterizou-se por ser bastante variável de acordo com a área analisada.

Tabela 8.7 Eventos de seca identificados nos meses de JJA com os dados do GPCP e o do modelo HadGEM3.

Número de eventos de seca identificados – JUN/JUL/AGO								
	Moderada		Severa		Extrema		Total	
	GPCP	HADGEM	GPCP	HADGEM	GPCP	HADGEM	GPCP	HADGEM
Área 1	7	9	3	5	4	1	14	15
Área 2	11	8	3	5	2	2	16	15
Área 3	14	13	3	2	-	1	17	16
Área 4	8	7	2	4	5	3	15	14

O modelo HADGEM3 também se mostrou, de forma geral, eficiente na detecção do total de eventos, quando comparado àqueles contabilizados com os dados do GPCP durante a primavera, como evidenciado na Tabela 8.8. Destaca-se que na área 4, houve uma maior discrepância entre os casos identificados, atribuída à diferença entre casos secos moderados observados com GPCP e HADGEM3, porém, o modelo conseguiu simular o mesmo número de eventos extremos nesta área. Por outro lado, o número de eventos moderados verificados na área 1 foi o mesmo, e os severos na área 3. Os resultados obtidos para a área 2 demonstram que o modelo tende a representar mais eventos severos e extremos do que moderados na região.

Tabela 8.8 Eventos de seca identificados nos meses de SON com os dados do GPCP e do modelo HadGEM3.

Número de eventos de seca identificados – SET/OUT/NOV								
	Moderada		Severa		Extrema		Total	
	GPCP	HADGEM	GPCP	HADGEM	GPCP	HADGEM	GPCP	HADGEM
Área 1	9	9	5	2	1	5	15	16
Área 2	7	5	3	4	5	6	15	15
Área 3	7	8	4	4	4	3	15	15
Área 4	4	9	2	4	2	2	8	15

O total de eventos contabilizados a partir das simulações do modelo HadGEM3 não demonstra diferenças significativas em relação àquelas identificadas com os dados do GPCP. Ainda assim, com exceção do verão, em todas as outras estações do ano, são simuladas mais secas em A1. Destaca-se também que durante o inverno houve uma maior convergência entre o número de casos de seca verificado com cada conjunto de dados. Esse período é caracterizado pelo enfraquecimento dos processos convectivos, o que leva a crer que o modelo pode apresentar limitações em representar a convecção.

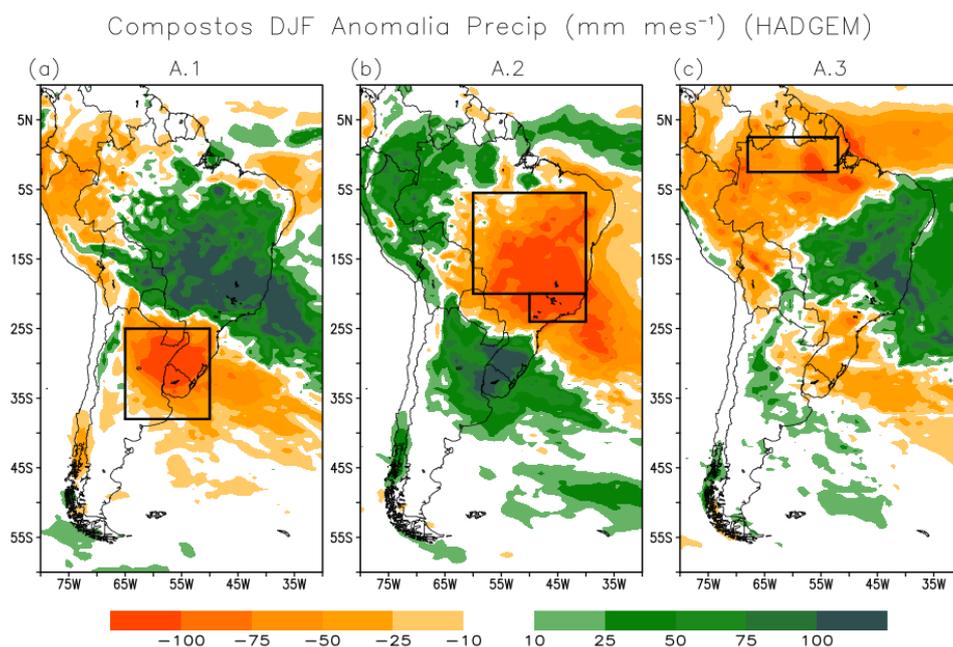
9 CARACTERÍSTICAS ATMOSFÉRICAS E OCEÂNICAS ASSOCIADAS AOS EVENTOS DE SECA UTILIZANDO HADGEM3 – SIMULAÇÕES HISTÓRICAS

Neste capítulo serão discutidos os aspectos atmosféricos e oceânicos associadas às secas, identificadas a partir das simulações históricas do modelo HadGEM3. A discussão tem como objetivo estabelecer uma comparação entre as configurações das anomalias e padrões de escala regional e grande escala utilizando o modelo, em relação à observação (GPCP e ERA5). Não é objetivo deste estudo abordar as diferenças de intensidade das anomalias, tendo em vista que o número de eventos contabilizados com cada conjunto de dados difere.

9.1 Verão

Os compostos de precipitação para as três áreas homogêneas de DJF são mostrados na Figura 9.1. Como é possível observar, de maneira geral, o modelo consegue representar bem o padrão espacial de chuvas na América do Sul, quando comparado ao GPCP (Figura 7.1). O dipolo de precipitação existente em A1V (a) e A2V (b) é simulado pelo modelo, no entanto as áreas com anomalias positivas de precipitação são mais extensas do que as identificadas com GPCP. Cavalcanti et al. (2022) compararam os dados de precipitação do GPCP às simulações do HadGEM3, e também identificaram que as características associadas ao sistema de monção durante o verão foram bem representadas pelo modelo. O estudo demonstra que os principais sistemas precipitantes do continente, como a ZCAS e ZCIT são bem simuladas pelo modelo. Tais aspectos também foram identificados no estudo de Coelho et al. (2021). Por outro lado, em A3V, o modelo não reproduz o comportamento das chuvas sobre a área da bacia do Prata. Enquanto nos dados observacionais, tem-se anomalias positivas de precipitação que se estendem desde o NE, CO e SE do Brasil até a região S, um padrão oposto é observado nesta última área.

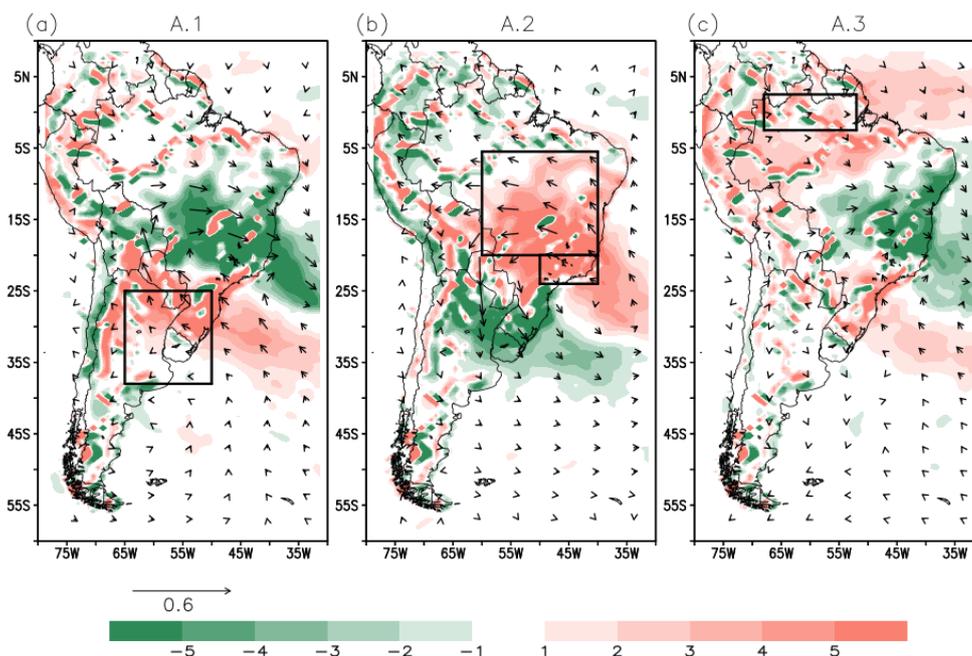
Figura 9.1 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).



O padrão espacial das anomalias de fluxo de umidade integrado e sua divergência, mostrado na Figura 9.2 é bem representado pelo modelo quando comparado ao observado, para o caso da área homogênea A1V (Figura 9.2a). Assim como identificado na Figura 9.1c, as anomalias associadas à maior convergência de umidade em A3V, abrangem uma área menor, consistente com as chuvas acima da média restritas ao nordeste do Brasil. Diferentemente do observado no composto referente à reanálise (Figura 7.2), anomalias positivas de divergência são observadas sobre a Bacia do Prata em A3V, consistente com a simulação de anomalias negativas de precipitação. Estas diferenças, em relação ao observado, pode ter contribuído para uma representação equivocada do padrão de anomalias de chuva sobre a região da Bacia do Prata durante os eventos de seca ocorridos em A3V. Ao analisar modelos do CMIP5, Yang et al. (2018), verificaram que vieses identificados em simulações de umidade e precipitação podem ser associados à superestimativa de movimentos ascendentes e descendentes em 500hPa.

Figura 9.2 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

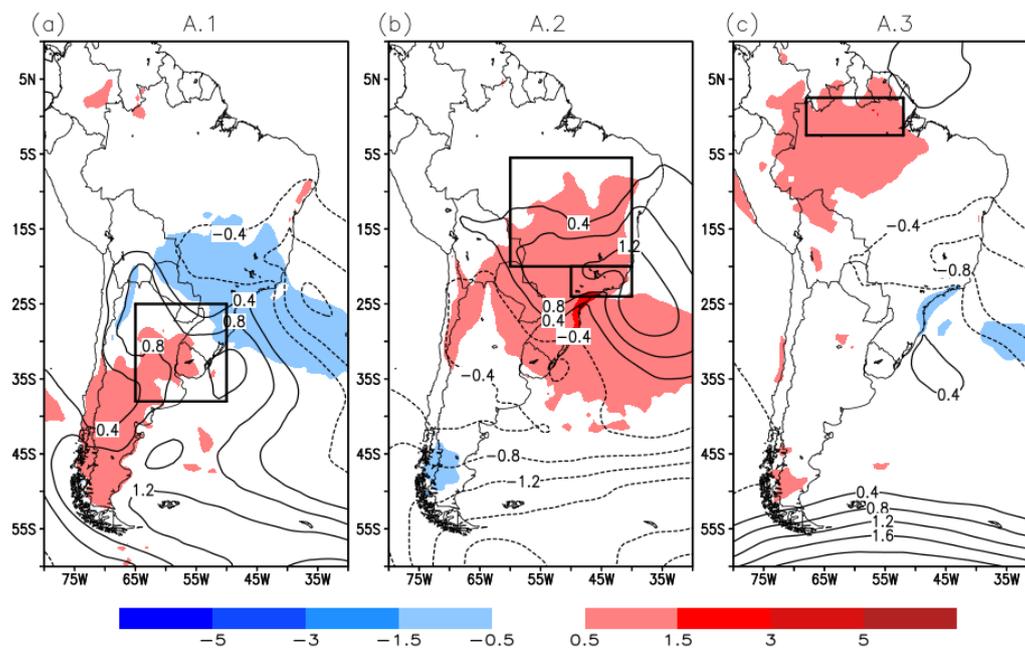
Cmp DJF Anomalias F Umid Int ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$) e Div (10^4 mm dia^{-1}) (HADGEM)



As anomalias positivas observadas no campo de pressão em superfície em A1V (Figura 9.3a) e A2V (Figura 9.3b) também são coerentes com aquelas identificadas na reanálise, associadas a períodos de convecção suprimida. O modelo demonstra a presença de anomalias positivas de temperatura mais abrangentes em termos espaciais em todas as áreas; os padrões identificados com o ERA5 (Figura 9.3), mostram que o comportamento anômalo fica restrito a pequenas regiões sobre as áreas homogêneas. García-Franco et al. (2020) também compararam os dados de temperatura próximo a superfície do ERA5 aos simulados pelo modelo HadGEM3 durante o verão, e identificaram uma tendência de viés de aquecimento nas simulações na América do Sul.

Figura 9.3 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

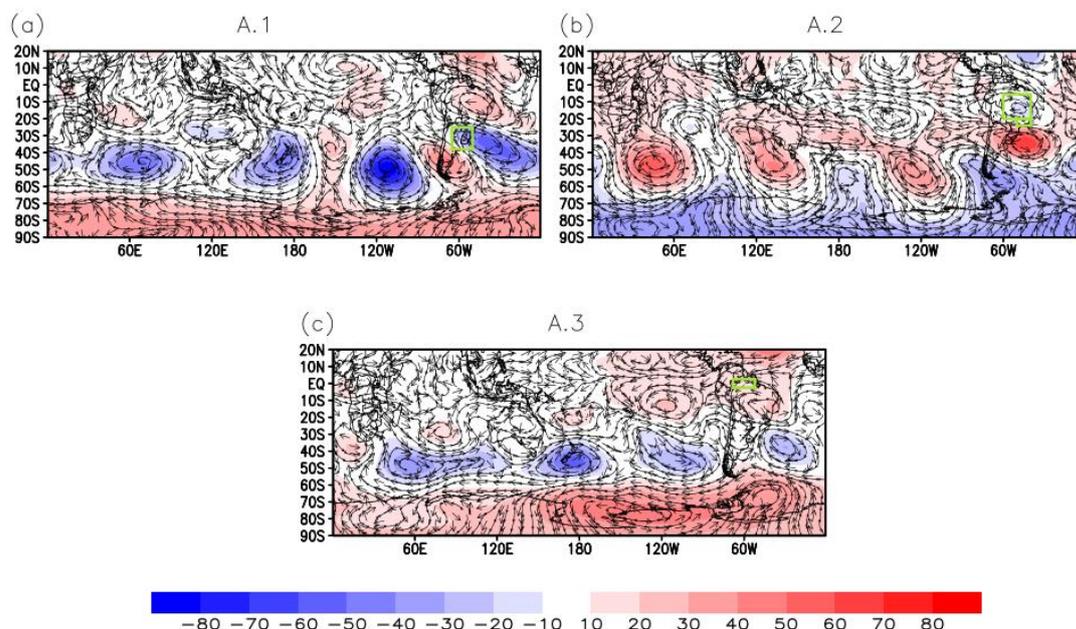
Compostos DJF Anomalias Temperatura (°C) e PNMM (hPa) (HADGEM)



A configuração atmosférica em altos níveis, mostrada na Figura 9.4, no caso dos eventos de seca da área 1 (a) também é bastante coerente com aquela observada com os dados de reanálise do ERA5 (Figura 7.4a). A propagação do trem de ondas que tipicamente se estabelece no Pacífico Sul até o SESA é bem representada.

Figura 9.4 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simuladas pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

Compostos DJF anomalias geop. e linhas de corrente (200hPa) HADGEM

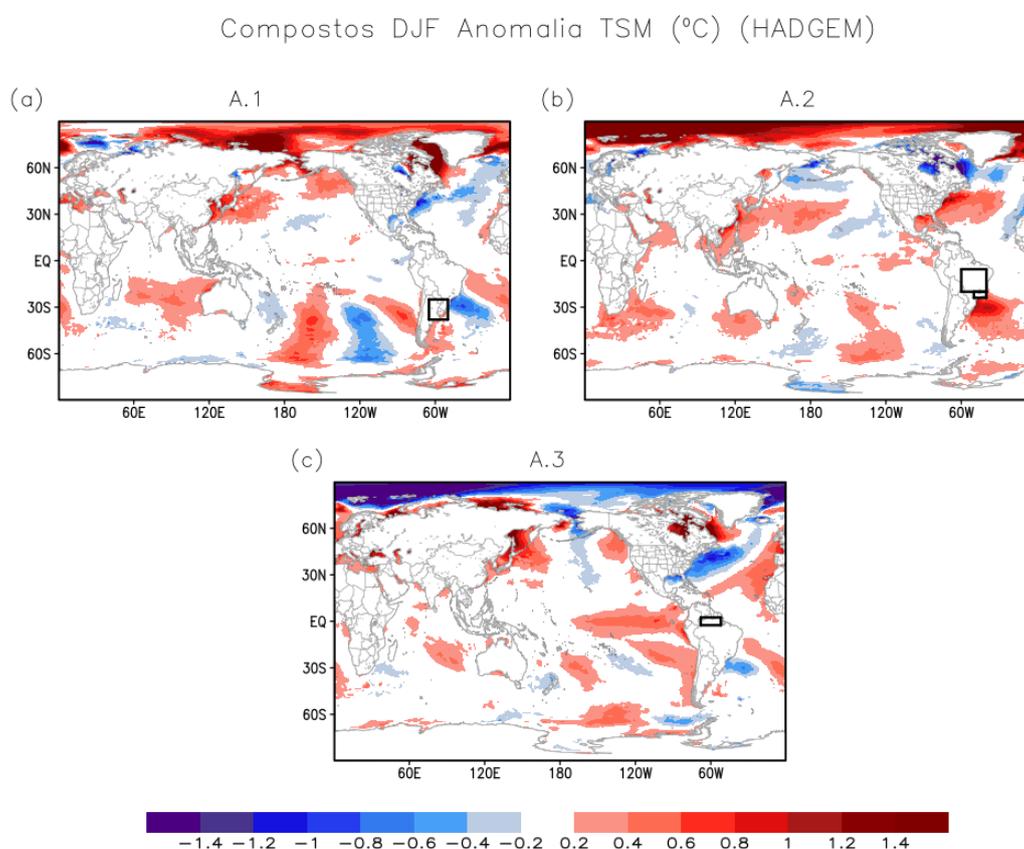


O modelo também consegue reproduzir satisfatoriamente a circulação para os casos de A2V (b), quando também se observou anomalias de geopotencial e linhas de corrente alternadas, desde o Pacífico até a América do Sul (Figura 7.4b). No entanto, sobretudo em altas latitudes o padrão é completamente oposto ao identificado nas reanálises, com anomalias de geopotencial negativas sobre o pólo sul (no ERA5 aparecem anomalias positivas). Contudo, os dois centros de ação sobre a América do Sul são bem representados e indicam movimento subsidente nas áreas afetadas pelas secas. O padrão espacial de altura geopotencial e linhas de corrente em altos níveis em A3V (c) é coerente com aquele identificado por meio da reanálise (Figura 7.4c), onde foram identificadas anomalias negativas sobre o Pacífico e Atlântico Sul. As circulações anticiclônicas a norte e sul do equador, tipicamente observadas em anos de El Niño, também são reproduzidas pelo modelo.

Os compostos de anomalias de TSM para DJF simulados pelo modelo são mostrados na Figura 9.5. Em todas as áreas homogêneas, as simulações do

modelo HadGEM3 evidenciam padrões anômalos sobre os mares das altas latitudes do Hemisfério Norte, não identificados nos dados observacionais (Figura 7.5). O modelo reproduz satisfatoriamente, embora com algumas diferenças de posicionamento, anomalias sobre o Pacífico Sul e Atlântico Sul associados a episódios de seca identificados em A1V (a) e A3V (c).

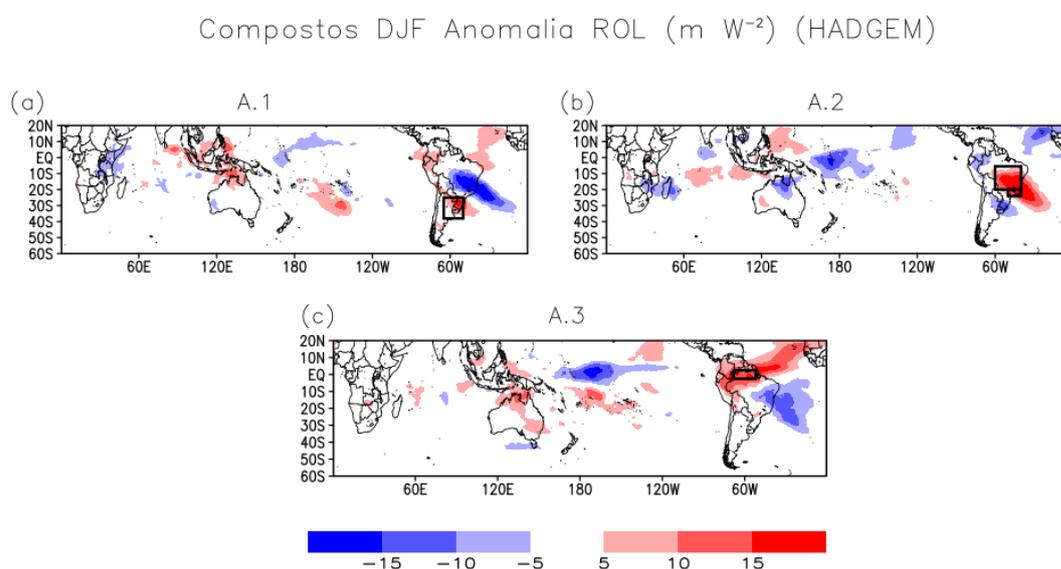
Figura 9.5 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).



Em relação aos compostos da área 2 (b), um padrão contraditório é mostrado pelo modelo, especialmente próximo à costa sudeste da América do Sul e Pacífico Tropical leste, onde anomalias de sinal oposto foi observado (o modelo simulou valores positivos, enquanto que com os dados observados valores negativos foram identificados).

O modelo conseguiu reproduzir o padrão de dipolo observado nos compostos de anomalia de ROL (Figura 9.6) sobre as áreas 1 (a) e 2 (b), coerentes com o comportamento das chuvas, observado durante os eventos de seca (Figura 9.1). No entanto, para ambos os casos mencionados anteriormente, observou-se um padrão oposto de convecção anômala sobre o Pacífico Tropical, Indonésia e Índico Oriental, regiões estas que exercem influência importante na circulação e chuvas em diferentes regiões do planeta.

Figura 9.6 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).



Os aspectos de grande escala associados aos eventos de seca em A3V (Figura 9.6 c) são melhor representados pelo modelo. A convecção realçada e suprimida, respectivamente, sobre o Pacífico Tropical Central e Indonésia/Austrália, é consistente com a observada no composto referente aos dados observados (CDR/NOAA). Os estudos indicam que a maioria dos modelos globais atuais ainda não consegue reproduzir o padrão OMJ (LING et al., 2017; SLINGO et al., 1996; SPERBER et al. 1997), principalmente no que diz respeito à propagação para leste do padrão de ondas, típica do modo de variabilidade (ZHANG et al., 2006; HUNG et al., 2013).

9.2 Outono

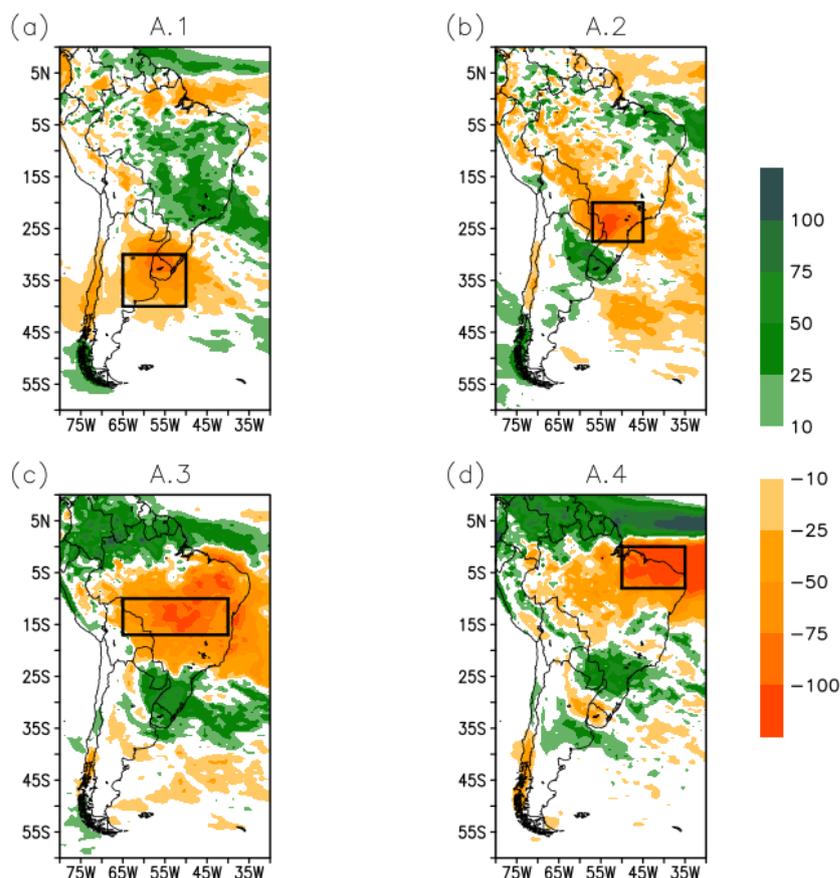
Os compostos de anomalia de precipitação simulados pelo HadGEM3 referentes ao outono (MAM) são apresentados na Figura 9.7.

O modelo representa o padrão espacial das secas na estação, em especial o dipolo recorrentemente observado entre A1O e A2O, porém no caso desta última, a extensão territorial da área seca é menor quando comparada ao identificado com o GPCP (Figura 7.8), e o contrário é válido para o sul do Brasil e Uruguai. Por outro lado, as anomalias positivas de precipitação que também apareciam no norte do continente (Figura 7.8b) se restringem a uma área bem menor, situada mais a nordeste da América do Sul com pequenos núcleos isolados no norte e noroeste. A distribuição das chuvas relacionada nos compostos de A3O (Figura 9.7c) e A4O (Figura 9.7d) também foi consistente com aquela observada anteriormente com o GPCP.

Na Figura 9.8 são mostrados os compostos de anomalias de fluxo de umidade integrado verticalmente e sua divergência para o outono (MAM). As anomalias negativas de divergência de umidade em A2O (b) encontram-se sobre uma área mais ampla entre o Sul do Brasil e o Uruguai, o que explica a abrangência espacial também maior das anomalias positivas de precipitação observadas nessa região. Também é possível observar em A3O (c) e A4O (d) um deslocamento para norte das anomalias negativas de divergência identificadas no norte do continente em relação aos dados observacionais (Figura 7.9c e d). Porém as áreas de seca estão sob a ação de divergência de umidade, como na observação.

Figura 9.7 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

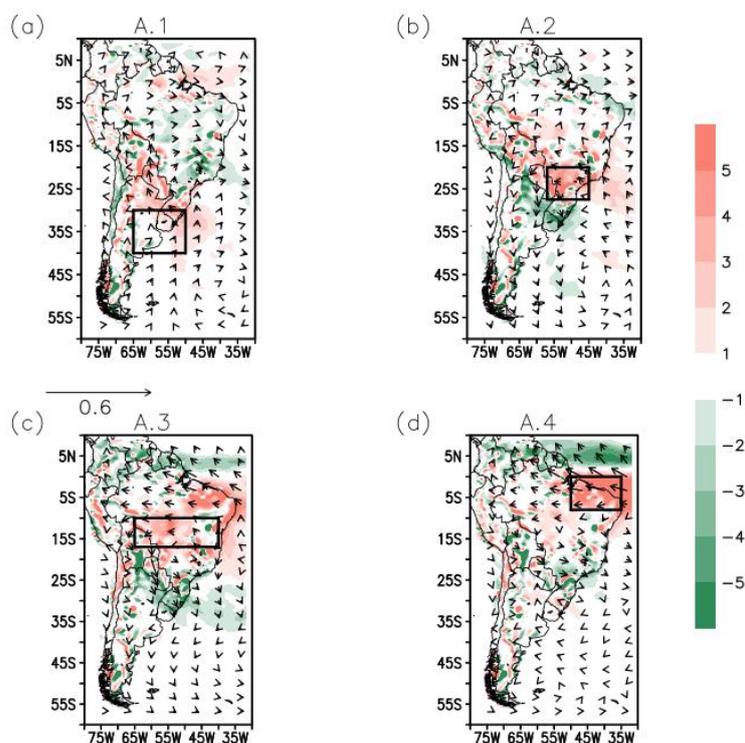
Compostos MAM Anomalia Precip (mm mes⁻¹) (HADGEM)



O comportamento das temperaturas e pressão a nível médio do mar associado às secas em MAM simulado pelo HadGEM3 é mostrado na Figura 9.9. Embora algumas semelhanças sejam observadas quanto à PNMM em A10 e A20, diferenças importantes foram identificadas nas anomalias de temperatura próxima a superfície. Para estes casos, os centros de anomalias positivas de pressão a SO da América do Sul e Atlântico, respectivamente, também foram simulados pelo modelo, assim como identificado na Figura 7.10. As anomalias negativas de temperatura, as quais apareciam restritas anteriormente (Figura 7.10a) a uma pequena área a nordeste, encontram-se sobre uma área maior no norte de A1, enquanto que as anomalias positivas identificadas antes a oeste da mesma região, não são simuladas pelo modelo.

Figura 9.8 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

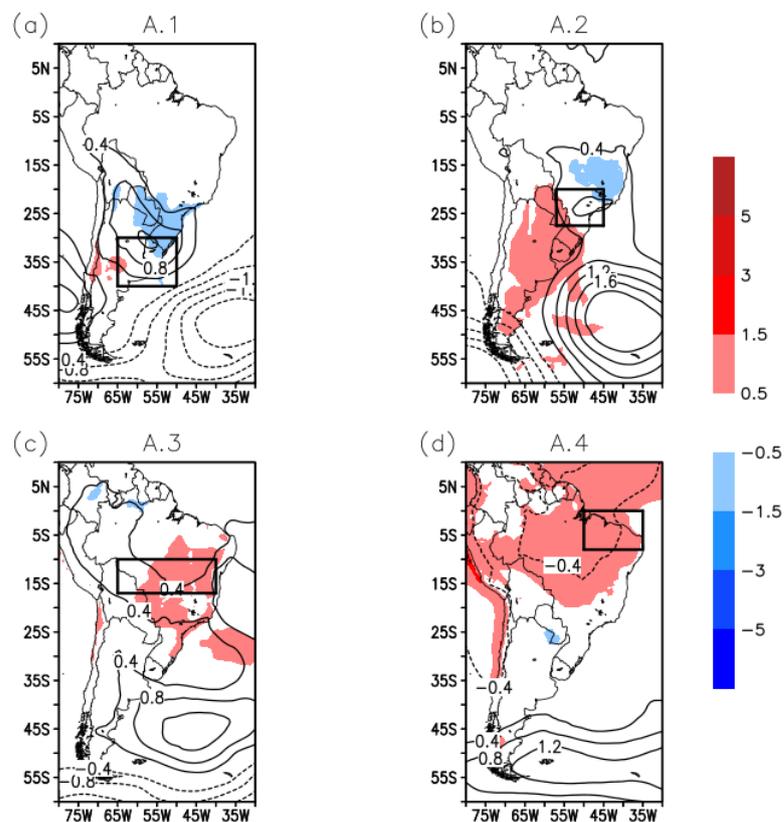
Cmp MAM Anomalias F Umid Int ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$) e Div (10^4 mm dia^{-1}) (HADGEM)



As anomalias positivas de temperatura identificadas na metade sul do continente, abrangendo o oeste de A2 (b), encontram-se mais deslocadas para oeste quando comparadas aquelas observadas com os dados de reanálise (Figura 7.10b). Observou-se ainda que, as regiões com padrões anômalos de pressão, mais concentradas na metade sul do continente, encontram-se mais deslocadas para oeste no caso das saídas do HadGEM3 (Figura 9.9). Áreas expressivamente mais extensas apresentam anomalias positivas de temperatura em A3 e A4, sendo esta a principal diferença das saídas do modelo quando comparadas ao ERA5.

Figura 9.9 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

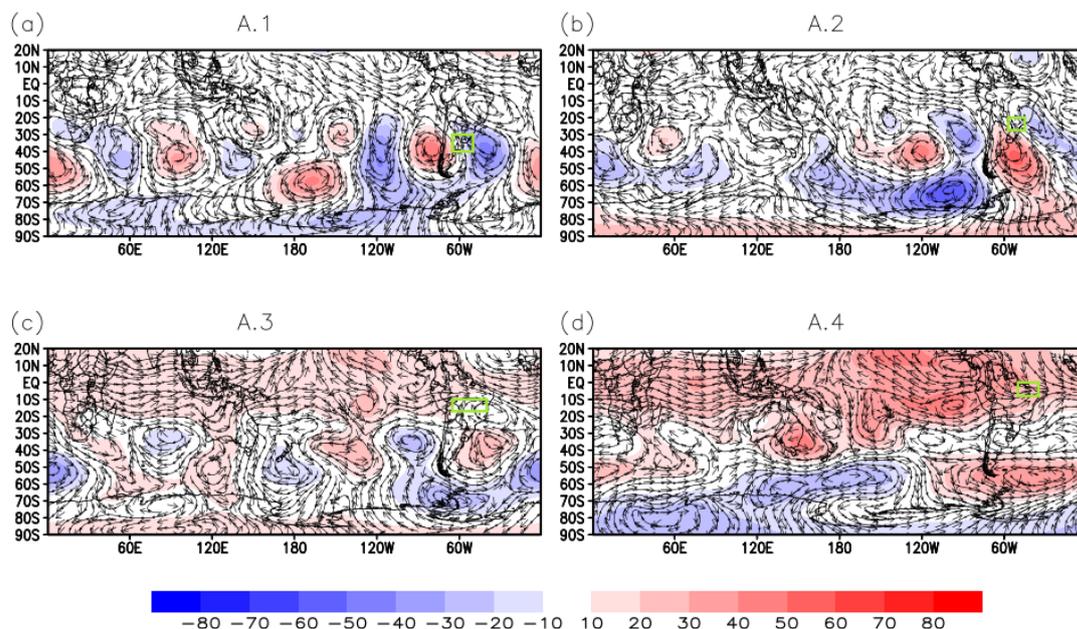
Compostos MAM Anomalias Temperatura (°C) e PNMM (hPa) (HADGEM)



De maneira geral, as anomalias de altura geopotencial e linhas de corrente em altos níveis simuladas pelo modelo (Figura 9.10) são consistentes com a reanálise ERA 5 nas áreas 1, 2 e 4 (Figura 7.11a, b e d). Somente em A2 (Figura 9.10b) foram identificadas algumas diferenças referentes ao posicionamento dos centros de alta e baixa pressão que compõem os trens de onda que se propagam desde o Pacífico Sul até o continente – mais deslocados para leste/nordeste. Entretanto, os centros anômalos sobre o continente são consistentes com movimento subsidente sobre a área de seca. Em relação à A3, somente entre o Pacífico Sul e Atlântico Sul diferenças ficaram evidentes, com o deslocamento do centro de anomalia positiva para nordeste na simulação do modelo (de 110°W – 50°W (Figura 9.10) para 70°W – 40°W).

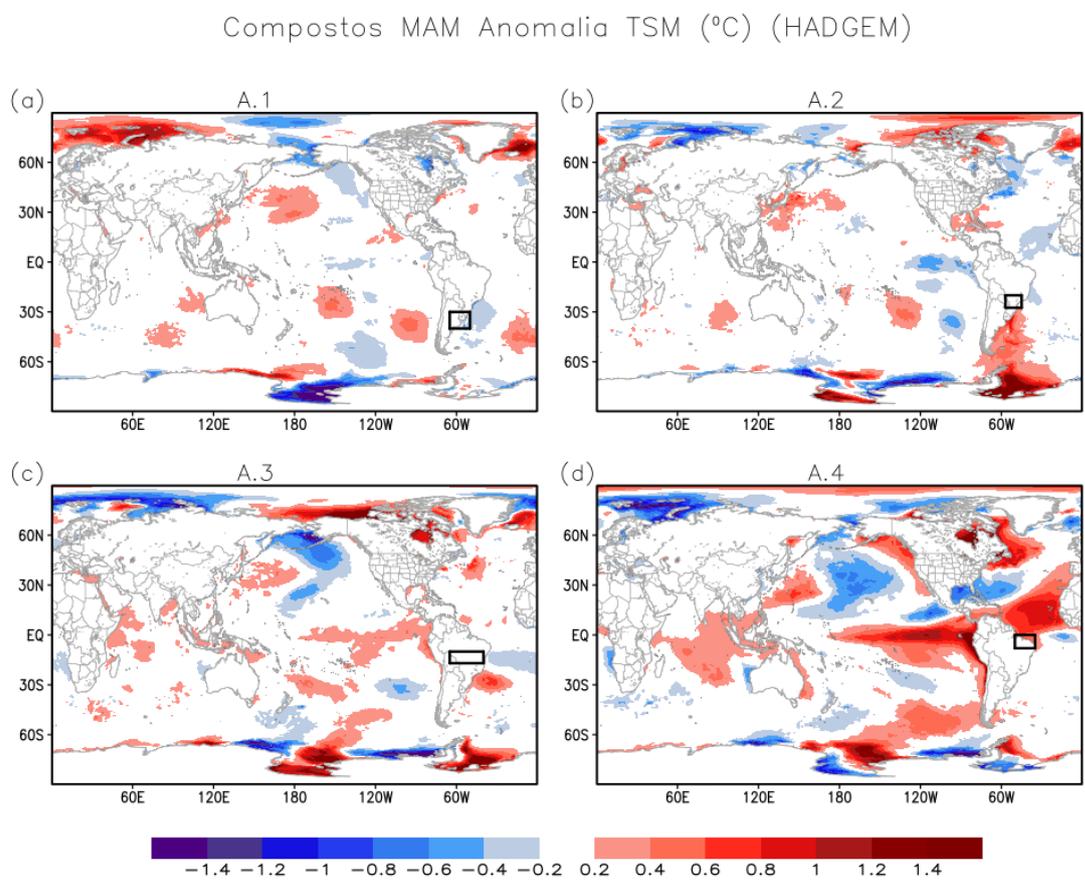
Figura 9.10 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simuladas pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Compostos MAM anomalias geop. e linhas de corrente (200hPa) HADGEM



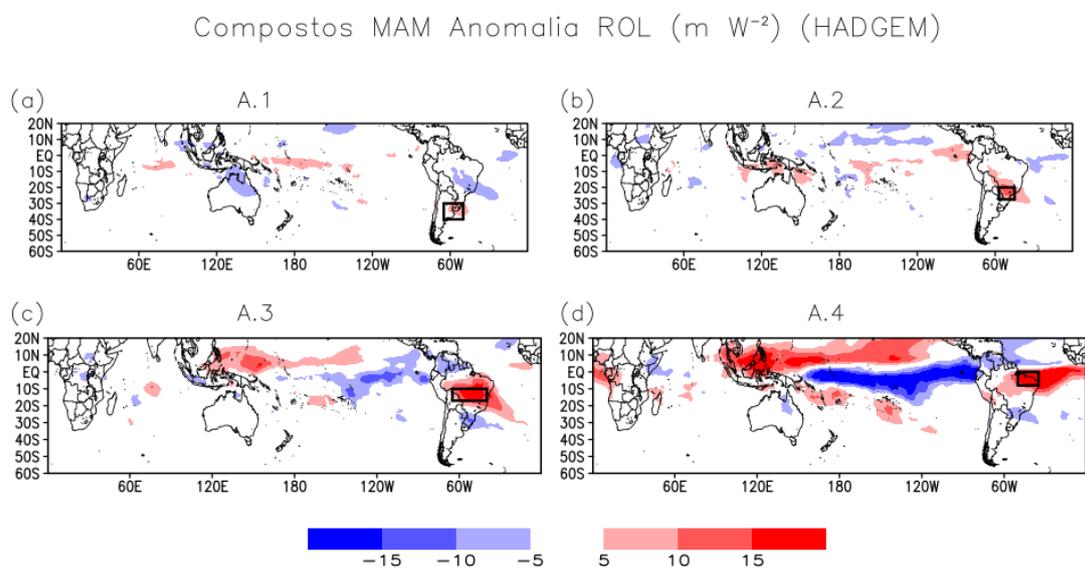
Os padrões de anomalias de TSM identificados em A2, A3 e A4 (Figura 9.11b, c e d) são coerentes com o identificado nos dados do ICOADS (Figura 7.12b, c e d), o que representa um importante resultado do modelo, tendo em vista sua importância para a previsibilidade das chuvas em regiões remotas. As anomalias identificadas especialmente próximas ao litoral sul do Brasil, no composto de A1 (Figura 9.11a), no entanto, não demonstram uma convergência entre análise (Figura 7.12a) e modelo.

Figura 9.11 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca na área homogênea 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).



Os compostos de ROL para MAM são apresentados na Figura 9.12. De maneira geral, o padrão de convecção identificado através das anomalias de OLR, é bem simulado pelo modelo sobre o continente sul-americano em MAM nas quatro áreas homogêneas. Por outro lado, o comportamento em regiões remotas, em especial sobre o Pacífico e Indonésia, mostra semelhanças com os dados observados (Figura 7.13) apenas para A4O (Figura 9.12d). Destaca-se que, as áreas mencionadas representam importante influência no padrão de chuvas de regiões diversas do planeta, inclusive a A1O e A2O (Figura 9.12a e b), como é discutido em outros estudos.

Figura 9.12 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca na área homogênea 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

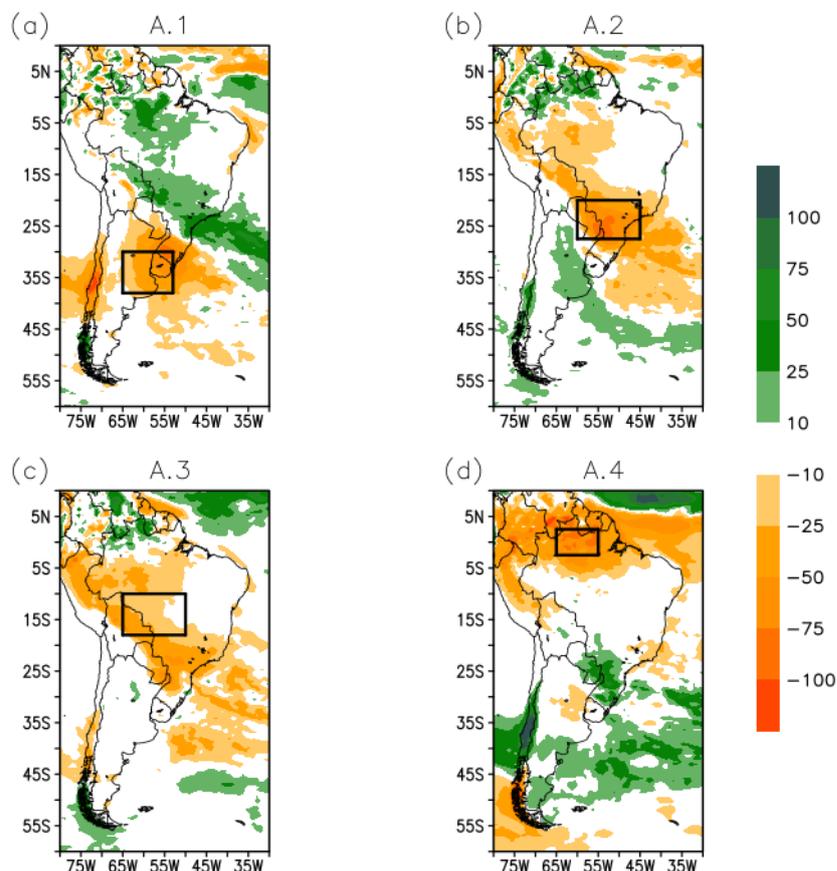


9.3 Inverno

O modelo conseguiu simular o comportamento das chuvas principalmente em A1I e A2I, conforme mostrado nas Figuras 9.13 (a) e (b), respectivamente, ainda que as anomalias positivas de precipitação identificadas no SE, para a primeira área mencionada, abrangem uma área maior em relação ao observado (Figura 7.14a). As anomalias de chuva sobre A3I e A4I (Figura 9.13c e d) são consistentes com o padrão identificado com os dados do GPCP (Figura 7.14c e d); porém as anomalias positivas em A4I restringem-se a uma menor área.

Figura 9.13 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

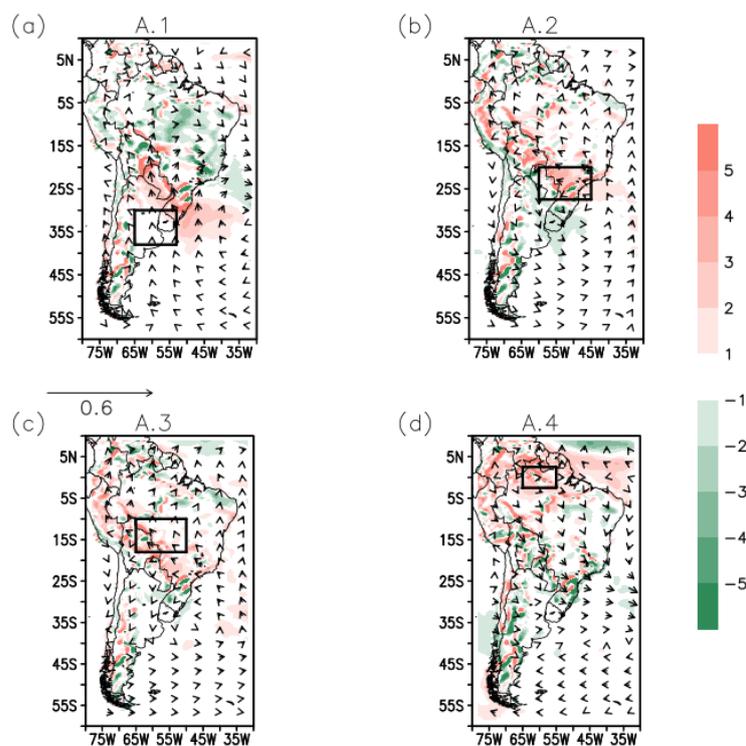
Compostos JJA Anomalia Precip (mm mes⁻¹) (HADGEM)



Especialmente sobre as áreas homogêneas, o modelo demonstrou habilidade em representar os padrões espaciais anômalos de divergência de umidade associados às secas, como mostrado na Figura 9.14. Apenas em A2I e A4I (Figura 9.14b e c), pequenas diferenças entre os padrões foram perceptíveis; por meio dos dados do ERA5 (Figura 7.15) identificou-se uma ampla área de anomalias positivas de divergência de umidade, estendendo-se desde o noroeste da AS até A2I (Figura 7.15b), e que o modelo simula sobre uma área mais restrita à região central do continente e A2I (Figura 9.14b). Quanto à A4I, verifica-se um deslocamento para norte tanto das anomalias positivas como negativas de divergência de umidade entre o norte do continente e o Atlântico (Figura 9.14d) em relação à reanálise (Figura 7.15d).

Figura 9.14 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

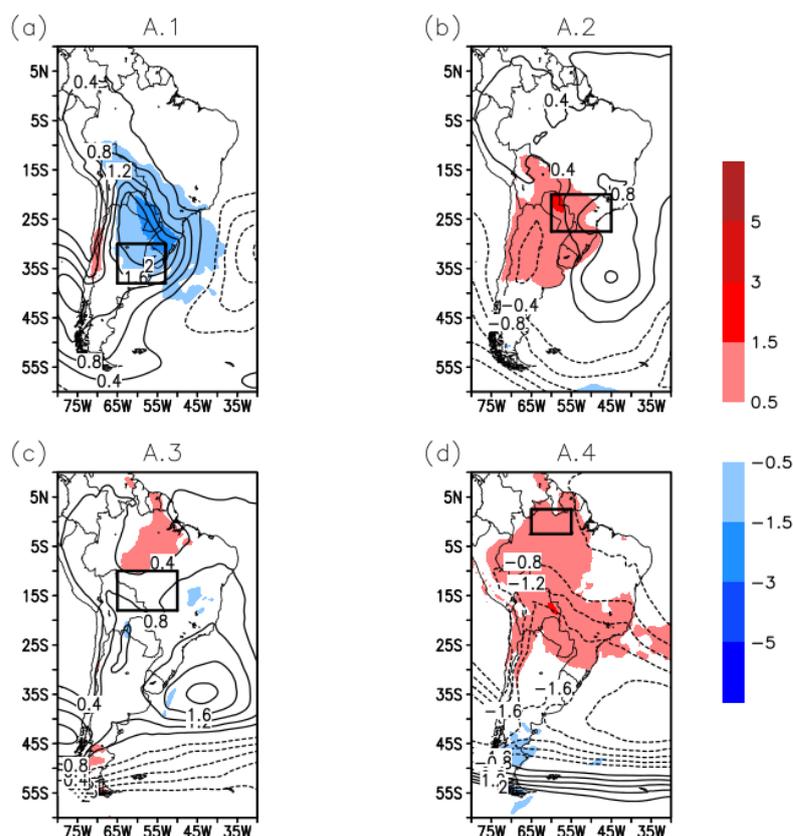
Cmp JJA Anomalias F Umid Int ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$) e Div (10^4 mm dia^{-1}) (HADGEM)



No inverno, o composto observado de temperatura de A11 apresentou anomalias negativas de temperatura ao norte da área (Figura 7.16a), o que também foi simulado pelo HadGEM3 (Figura 9.15a). O padrão espacial de pressão ao nível do mar associado a secas em A11 também foi representado pelo modelo, que simulou os centros de anomalias positivas próximo à costa do continente, no Pacífico Sul, e sobre a área homogênea. No entanto, as anomalias negativas identificadas no campo de pressão encontram-se mais deslocadas para leste (sobre o Atlântico Sul) (Figura 9.15a), quando comparadas às da reanálise (Figura 9.16a).

Figura 9.15 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Compostos JJA Anomalias Temperatura (°C) e PNMM (hPa) (HADGEM)



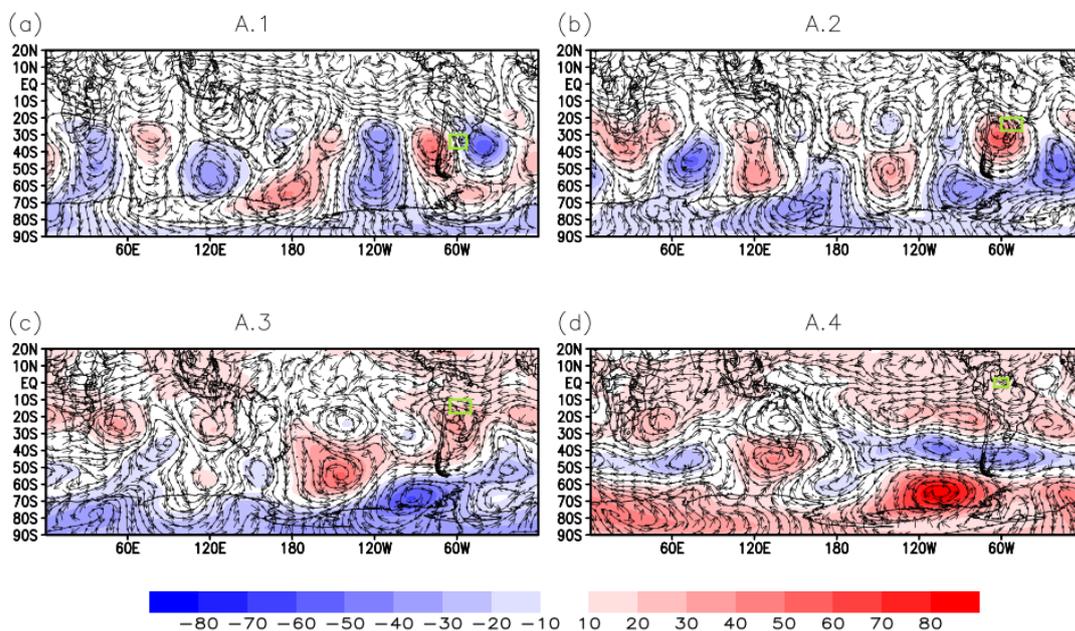
De forma geral, o padrão de anomalias simuladas para A3I (Figura 9.15c) e A4I (Figura 9.15d) também é consistente com o ERA5, mas destaca-se que, para estas três áreas, maiores extensões continentais encontram-se sob influência de um comportamento anômalo. Isso é perceptível também no caso do composto de A2I (Figura 9.15b), onde uma ampla área na metade sul do continente é simulada pelo modelo com temperaturas superiores à média, o que não foi observado anteriormente (Figura 7.16b). Além disso, o centro de anomalias positivas de pressão neste caso, encontra-se mais deslocado para nordeste.

Embora as simulações tenham demonstrado inúmeras diferenças relativas à configuração de altos níveis (Figura 9.16) em JJA em relação ao ERA5 (Figura

7.17), nas áreas homogêneas e regiões próximas, o padrão é bastante semelhante. Nesse sentido, destacam-se A1I, A2I, e A3I (Figura 9.16a, b e c), as quais encontram-se respectivamente a leste e sob uma região de anomalias positivas de altura geopotencial.

Figura 9.16 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Compostos JJA anomalias geop. e linhas de corrente (200hPa) HADGEM

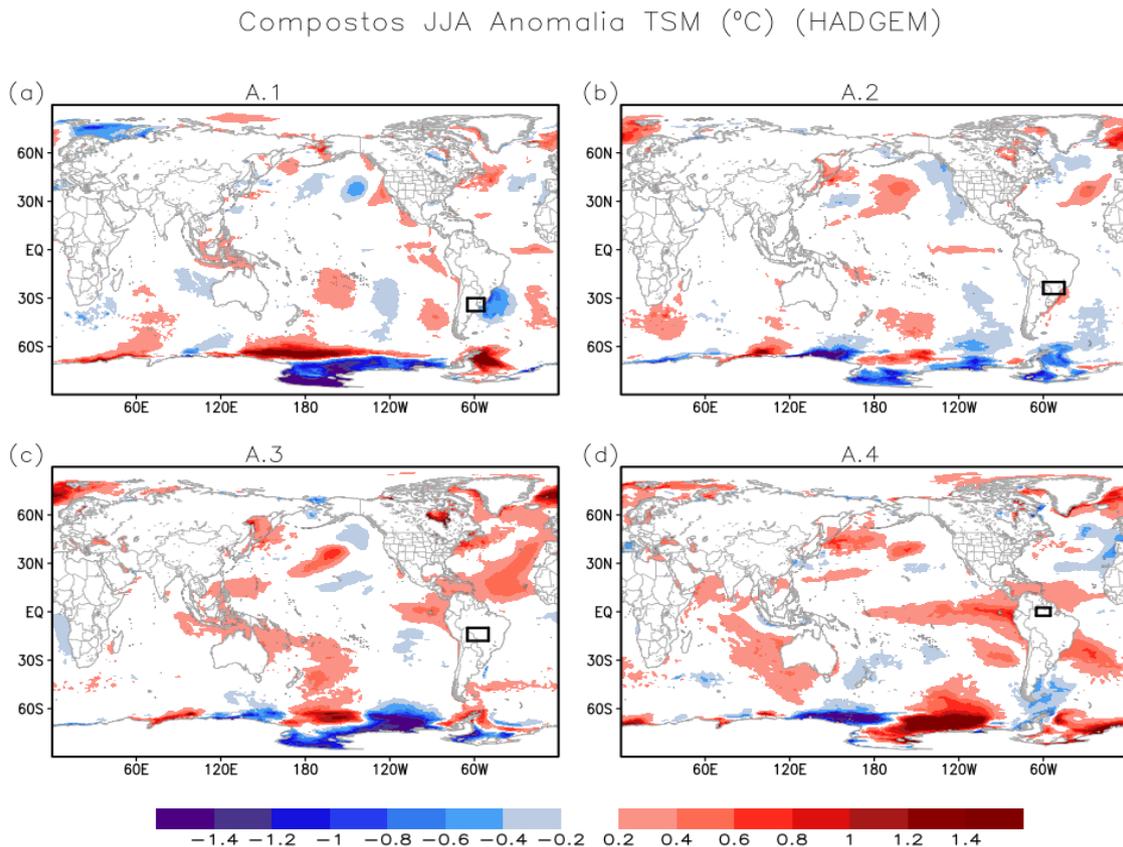


As maiores diferenças em relação aos dados observacionais encontram-se no posicionamento e extensão dos centros anômalo no Pacífico e Atlântico Sul (concentrados em uma menor área e mais deslocados para norte nas simulações). As anomalias sobre o pólo sul para o composto de A4I (Figura 9.16d), apresenta sinal positivo, o que é oposto ao identificado com os dados de reanálise (Figura 7.17d).

As anomalias de TSM identificadas nos compostos de JJA (Figura 9.17) sobre o Pacífico Tropical Leste, importante região devido a ocorrência do ENOS,

demonstra semelhanças com os dados observacionais (Figura 7.18) apenas em A4I (d).

Figura 9.17 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

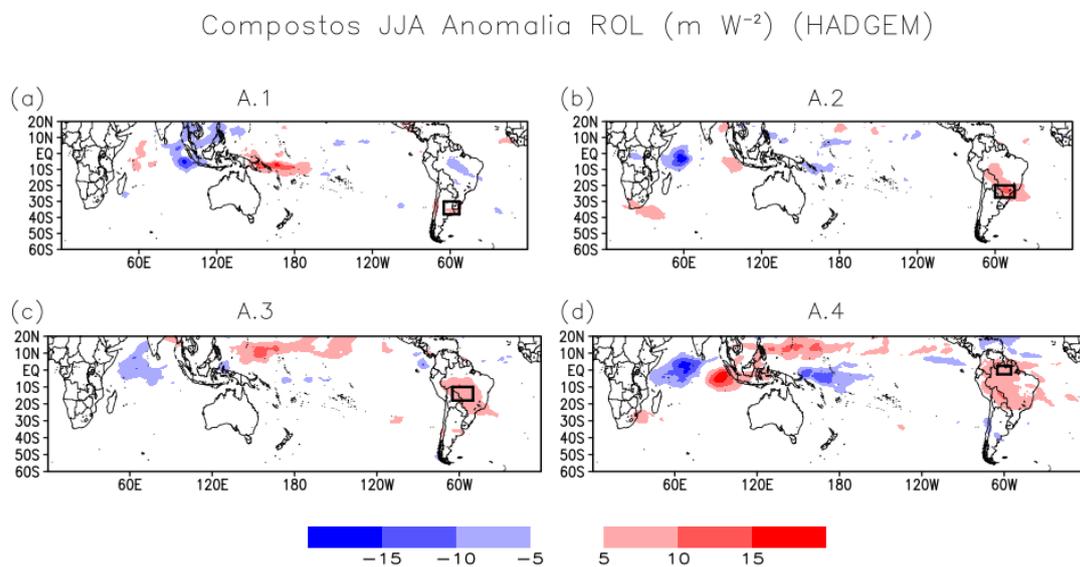


Em A3I (Figura 9.17c), as águas superficiais dos oceanos simuladas pelo modelo apresentam uma maior extensão de áreas mais quentes que a média, principalmente no Atlântico. Assim como em MAM, os valores próximos à Antártica podem ser relacionados a erros devido à presença de gelo nas estações frias do Hemisfério Sul.

O comportamento da convecção em JJA, representado nos compostos pelas anomalias de ROL, são mostrados na Figura 9.18. Eles convergem com o padrão de anomalias identificados na observação (Figura 7.19) para as áreas A1I, A2I e A3I (Figura 9.18a, b e c), e nas regiões tropicais remotas, as quais

exercem influência importante na circulação em grande escala. O modelo simula uma grande extensão da América do Sul com convecção suprimida em A4I (Figura 9.18d), diferentemente do dado observado (Figura 7.19d), no qual a região seca restringia-se ao norte do Brasil. As anomalias sobre o Índico, associadas aos eventos ocorridos em A4I também apresentam um comportamento diferente, pois o modelo simula um dipolo sobre o Índico.

Figura 9.18 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

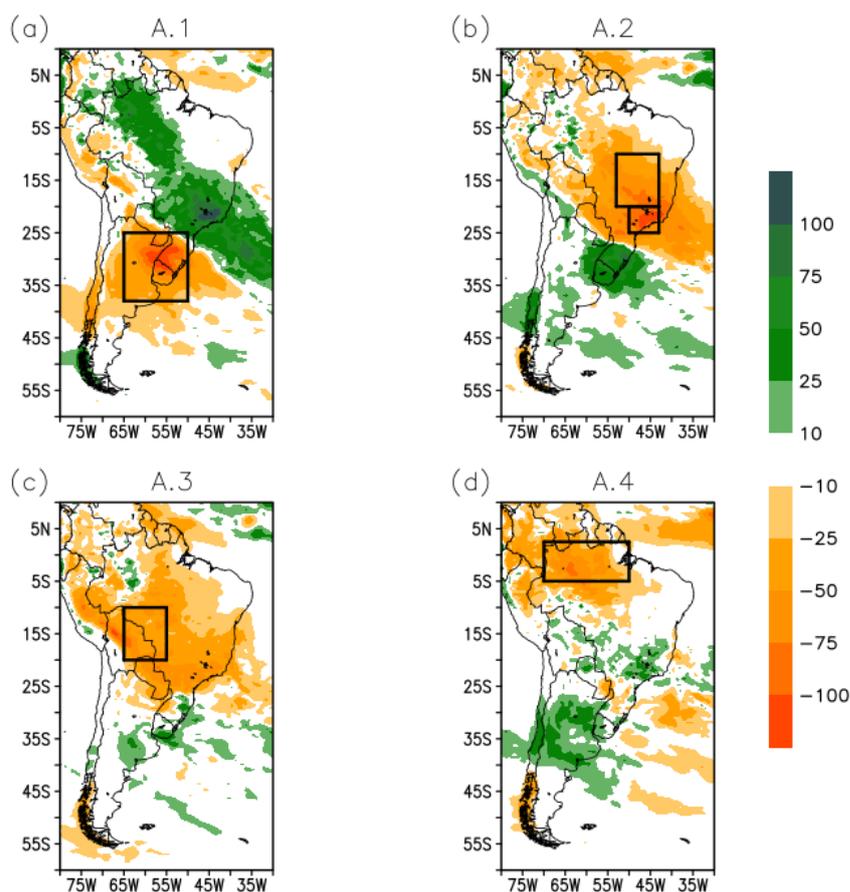


9.4 Primavera

Embora o modelo HADGEM3 mostre habilidade em representar o comportamento anômalo das chuvas sobre as áreas homogêneas durante a primavera, diferenças no padrão espacial sobre o continente foram identificadas, especialmente referente às áreas A3P e A4P (Figura 9.19c e d). Anteriormente foram observadas anomalias de sinal oposto na região sul do Brasil (Figura 7.20c e d).

Figura 9.19 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Compostos SON Anomalia Precip (mm mes⁻¹) (HADGEM

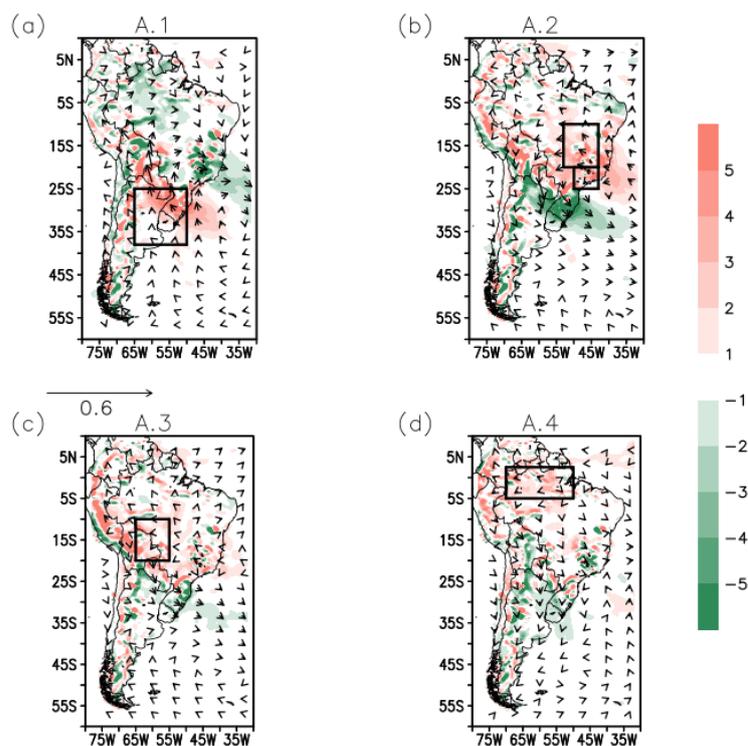


Por outro lado, o padrão espacial de anomalias de precipitação sobre a América do Sul para os compostos das áreas A1P e A2P (Figura 9.19a e b) é melhor representado pelo modelo.

O modelo demonstrou habilidade em representar o padrão espacial de anomalias de fluxo de umidade integrado verticalmente e divergência em todas as áreas homogêneas de SON, conforme mostrado na Figura 9.20, tendo em vista o observado na reanálise (mostrado na Figura 7.21). Porém, ao contrário do identificado com as simulações do modelo para as demais estações do ano, as regiões com valores inferiores à média de divergência de umidade, especialmente em A3P e A4P (Figura 9.20c e d) ocupam uma extensão menor.

Figura 9.20 Compostos de anomalia de divergência e fluxo de umidade integrado durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

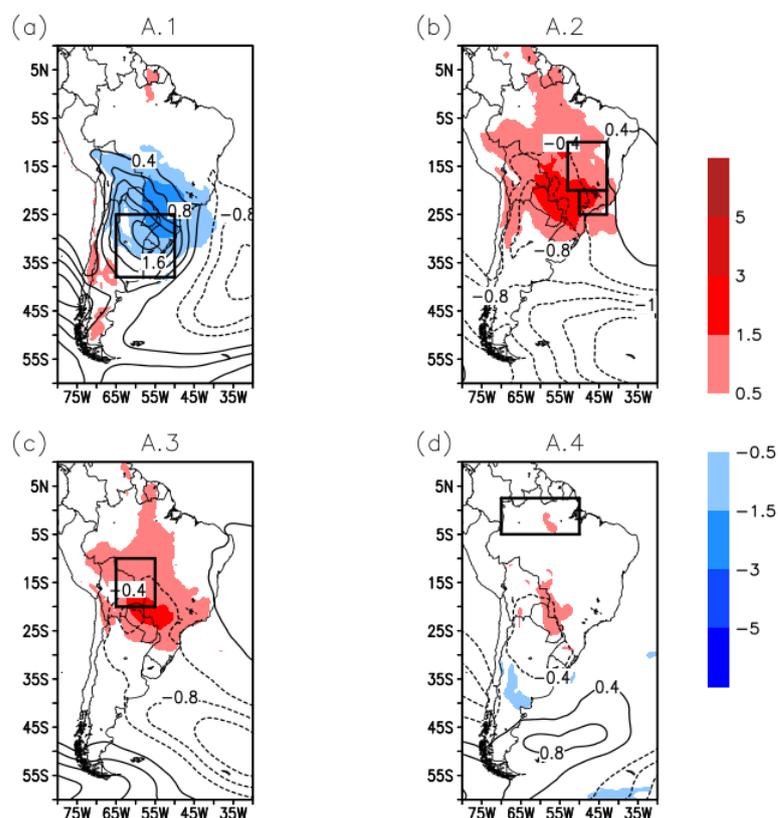
Cmp SON Anomalias F Umid Int ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$) e Div (10^4 mm dia^{-1}) (HADGEM)



Embora algumas diferenças no posicionamento e intensidade dos centros de pressão anômala em superfície sejam identificadas nas simulações de SON (Figura 9.21), o modelo representou o comportamento associado às secas principalmente sobre A1P, A2P e A3P (Figura 9.21a, b e c). No entanto, anomalias de temperatura nas duas primeiras áreas abrangem uma maior extensão do que o observado com o ERA5 (Figura 7.22a e b). Destaca-se que as simulações do modelo mostram uma considerável extensão a norte de A1P e sobre a bacia do Prata com temperaturas inferiores à média.

Figura 9.21 Compostos de anomalia de pressão a nível médio do mar (PNMM) e temperatura a 2 metros durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Compostos SON Anomalias Temperatura (°C) e PNMM (hPa) (HADGEM)

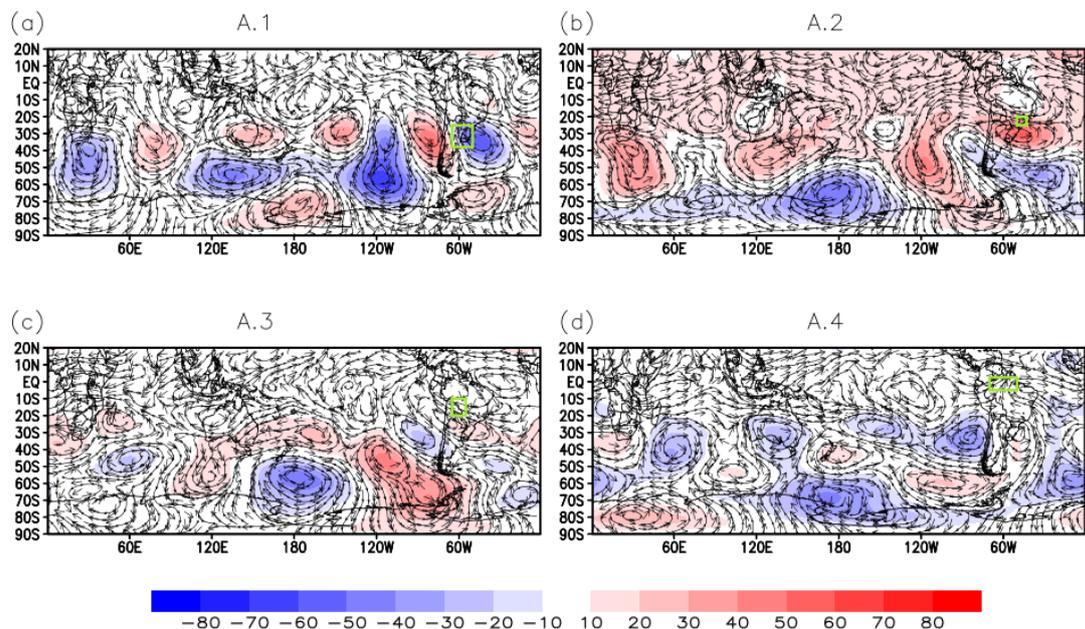


No caso de A4P (d), no entanto, um padrão de temperaturas e pressão ao nível do mar bastante distinto do observado na reanálise (Figura 7.22d) foi simulado pelo modelo; os dados observados mostram condições de aquecimento anômalo generalizados no centro-norte do continente (incluindo A4P), o que aparece apenas em áreas isoladas da bacia do Prata e A4P na simulação do HadGEM3.

Ainda que o HadGEM3 tenha demonstrado habilidade em representar trens de ondas entre o Pacífico e AS, a principal diferença na configuração atmosférica de altos níveis em SON (Figura 9.22) está no posicionamento dos centros anômalos sobre os oceanos.

Figura 9.22 Compostos de anomalia de altura geopotencial e linhas de corrente em 200 hPa durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

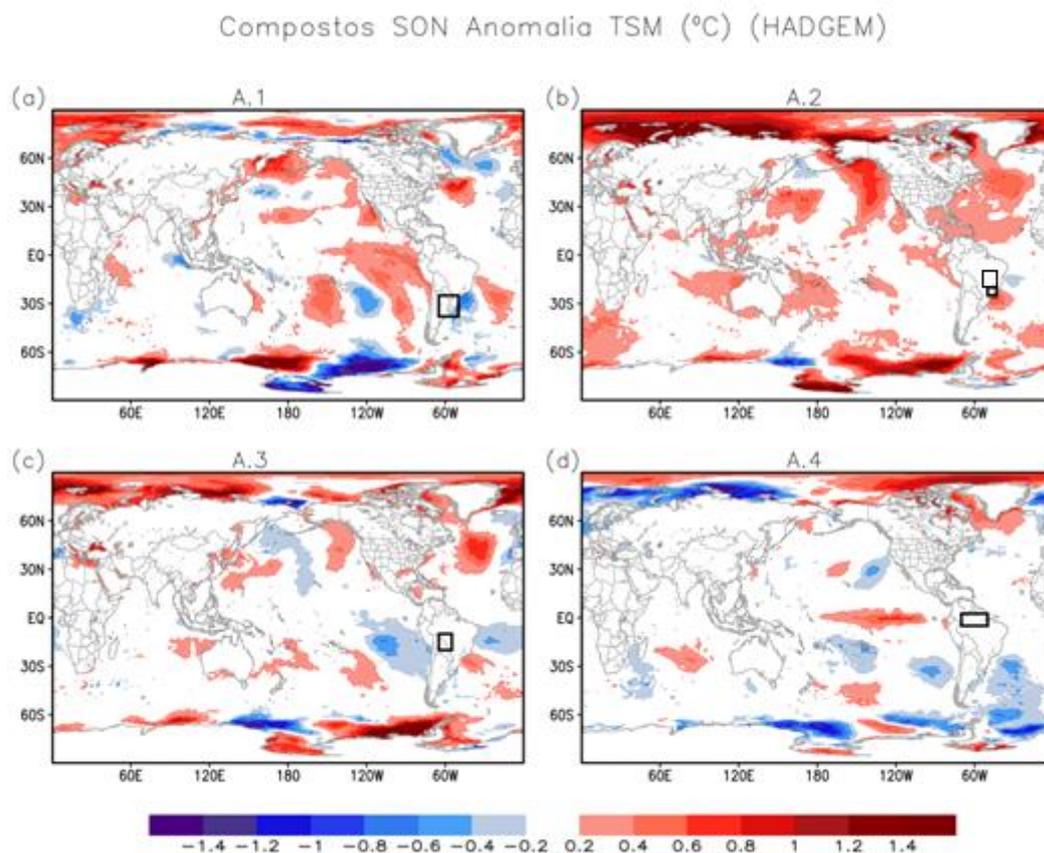
Compostos SON anomalias geop. e linhas de corrente (200hPa) HADGEM



Nas proximidades das áreas homogêneas, o padrão de anomalias de geopotencial e linhas de corrente identificadas é consistente com a demonstrada nos dados de reanálise (Figura 7.23); a leste de cristas tem-se movimento subsidente e divergência, inibindo os processos convectivos, e as áreas homogêneas A1P, A2P e A3P (Figura 9.22a, b e c) encontram-se situadas neste setor.

Os padrões de anomalias de TSM associados aos eventos de seca ocorridos na primavera simulados pelo modelo são mostrados na Figura 9.23. Assim como verificado na análise das demais estações, de maneira geral, o HadGEM3 não reproduz o comportamento observado (ICOADS) (Figura 7.24).

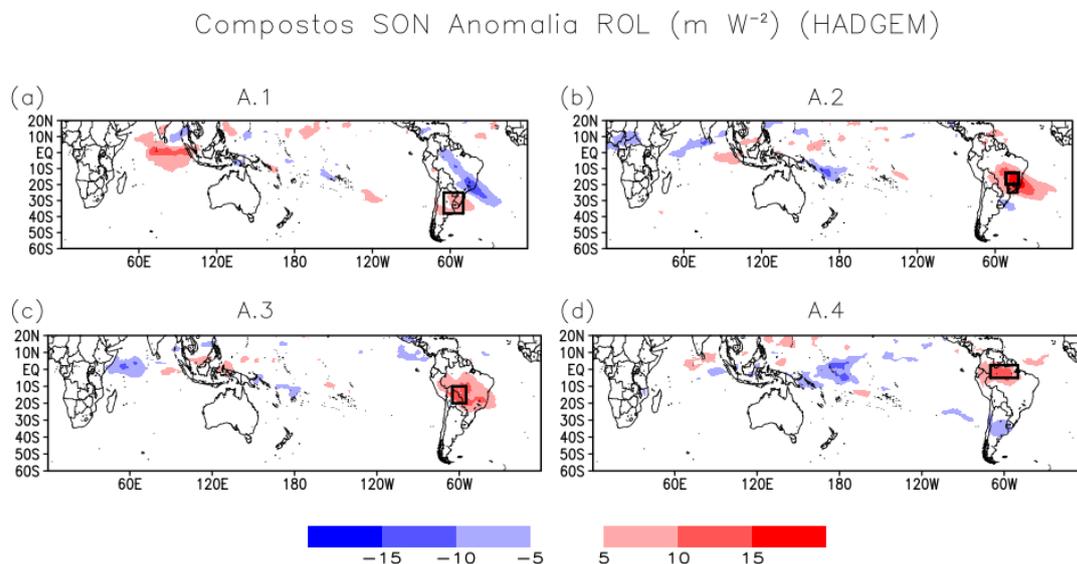
Figura 9.23 Compostos de anomalia de TSM durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).



O padrão de ENOS, considerado o modo de variabilidade dominante na circulação global e chuvas, é similar somente em A4P (Figura 9.23d); nas demais áreas, anomalias de sinais opostos ao observado no Pacífico equatorial são identificados nos compostos simulados pelo modelo. As temperaturas superficiais do Atlântico também desempenham importante papel na circulação e conseqüentemente no regime de chuvas da América do Sul. O modelo consegue capturar um padrão mais discreto de anomalias positivas de TSM no Atlântico Norte em todas as áreas, porém não representa o mesmo comportamento observado no mesmo oceano no Hemisfério Sul.

As anomalias positivas de ROL, associadas à inibição dos processos convectivos também são simuladas pelo modelo sobre as áreas homogêneas em SON (Figura 9.24), assim como demonstrado anteriormente (Figura 7.25).

Figura 9.24 Compostos de anomalia de ROL durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).



No entanto, o padrão de radiação de onda longa emergente identificado sobre os oceanos, em especial o Pacífico Tropical, não condiz com o observado; a região, bem como a Indonésia e o Oceano Índico, desempenham um papel importante como fontes de calor e consequentemente geração de trens de ondas que se propagam até a América do Sul. Somente em A2P (Figura 9.24b) um padrão semelhante foi identificado sobre a Indonésia (anomalia positiva de ROL) e oceanos Índico e Pacífico adjacentes a região (anomalias negativas).

10 PROJEÇÕES FUTURAS DO MODELO HADGEM3 CMIP6 PARA O PERÍODO 2070 A 2100

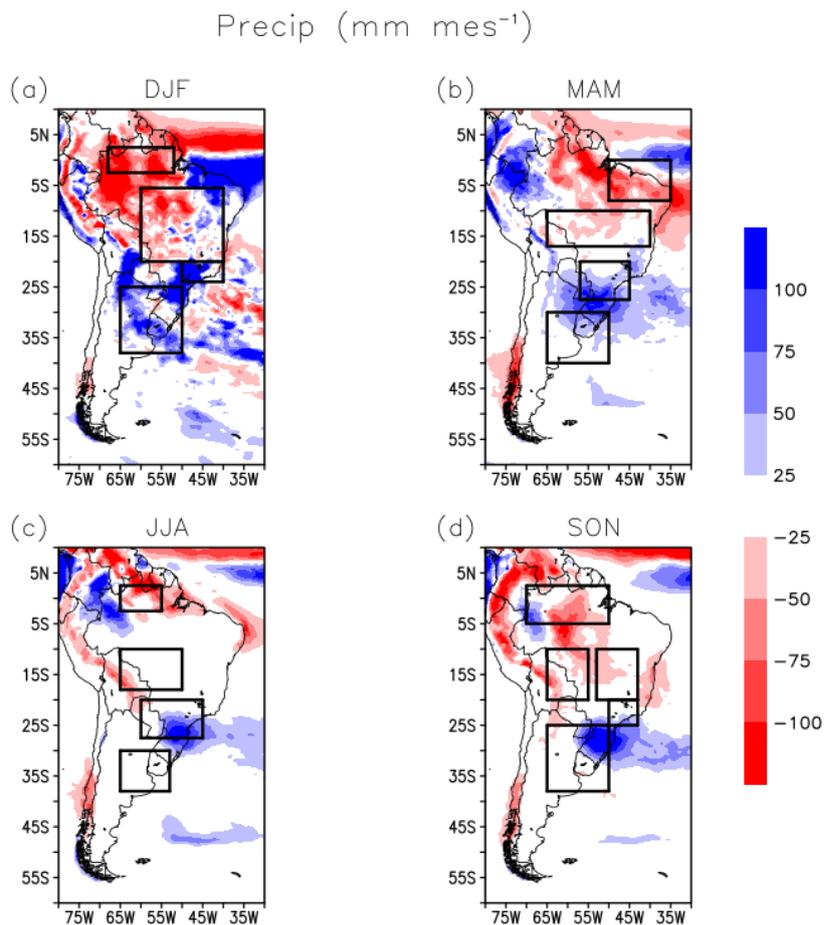
10.1 Diferenças entre as climatologias dos períodos futuro e histórico

Antes da identificação e análise das secas no período futuro, é necessário mostrar as alterações nas condições climáticas, pois a identificação dos casos é baseada na climatologia de precipitação de cada período. Desta forma, uma discussão pode ser estabelecida com a finalidade de comparar as simulações do modelo HadGEM3 no período histórico com as projeções do mesmo modelo em um cenário futuro específico de mudanças climáticas. Para tanto, foram analisados 31 anos de dados: 1982-2012 (simulações) e 2070-2100 (projeções). Na Figura 10.1 são mostradas as diferenças entre a climatologia dos períodos futuro e histórico de precipitação.

As áreas localizadas mais ao norte da AS (área 3 em DJF (a) e A4 nas demais estações), entre aproximadamente 0° e 5°N, bem como as situadas na região central do continente, apresentam média de precipitação inferior àquela simulada para o período presente. Estes resultados indicam que nas projeções futuras, essas regiões contarão com um clima mais seco em todas as estações, mas principalmente DJF (a). Por outro lado, observa-se que na A1, localizada mais ao sul do continente, e A2 de MAM (b) e JJA (c), há uma tendência de aumento da precipitação no futuro.

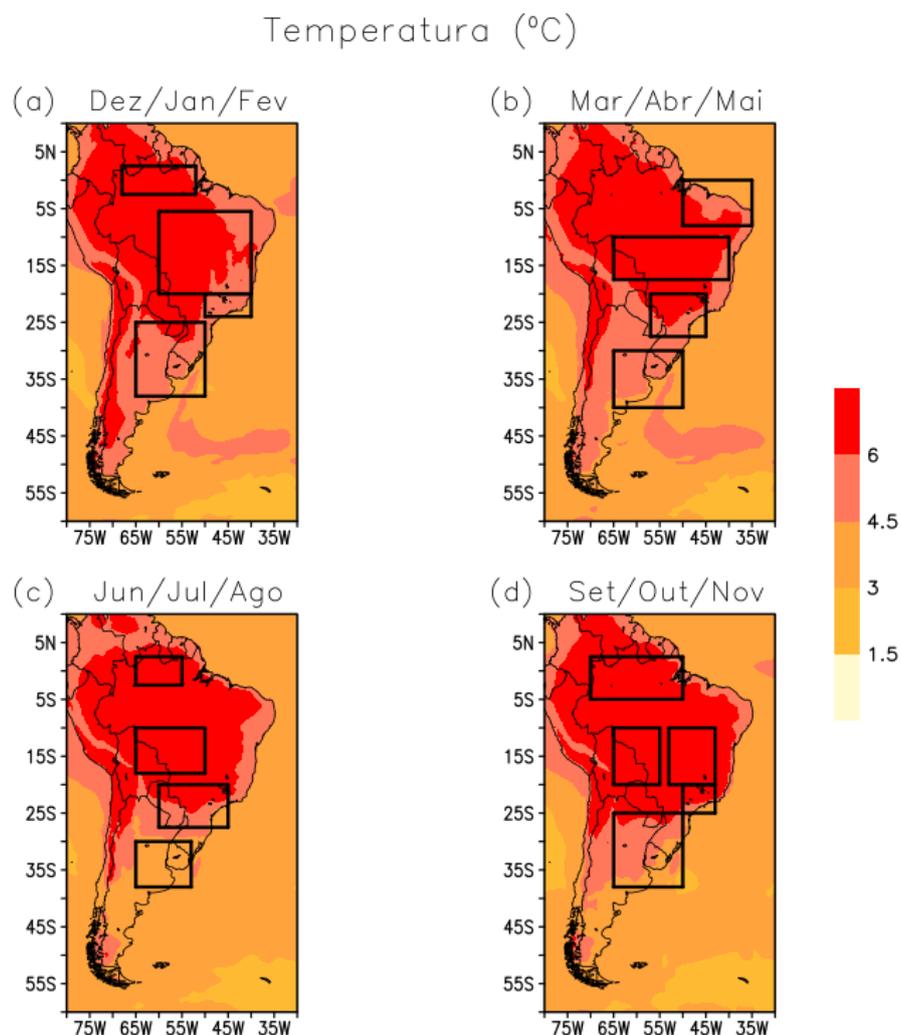
Assim como demonstrado nas Figuras anteriores, também existem diferenças nas temperaturas médias próximas à superfície do continente, como evidenciado na Figura 10.2. Um aumento generalizado das temperaturas sobre o continente e oceanos adjacentes é projetado pelo modelo no cenário futuro analisado.

Figura 10.1 Diferença entre a climatologia da precipitação do período futuro (2071-2100) e histórico (1981-2010), simuladas pelo modelo HadGEM3.



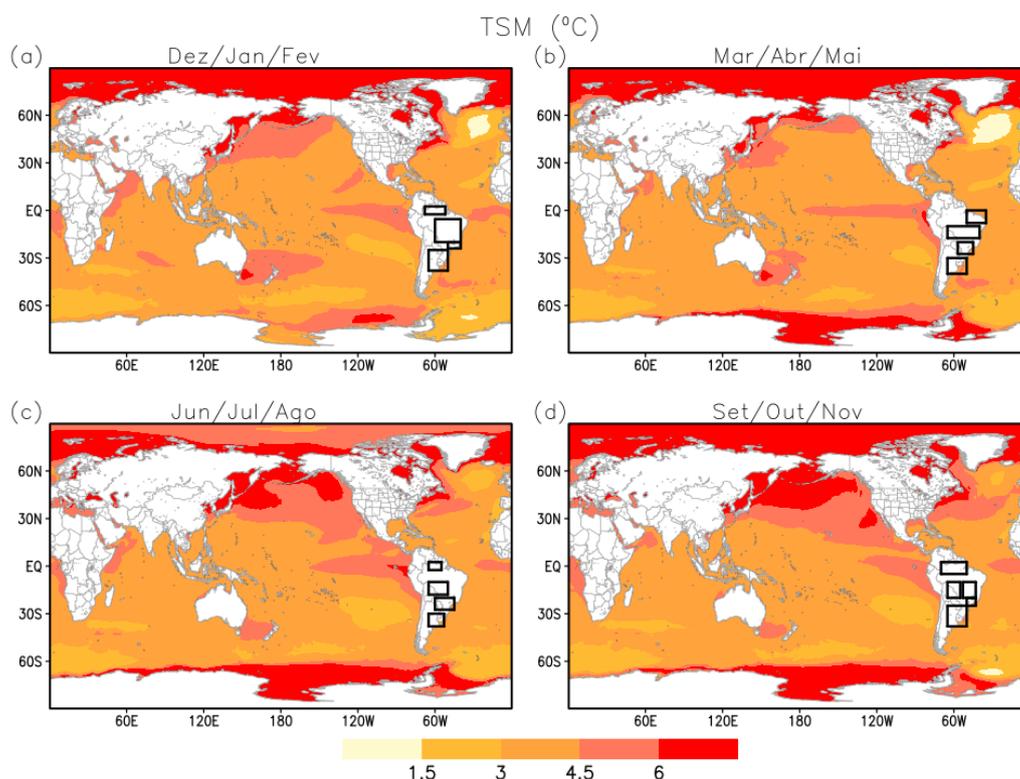
Esse padrão mais quente esperado para o futuro é mais evidente no norte do continente, porém observa-se que também há uma elevação da média sobre latitudes mais altas, implicando em um gradiente térmico menor, e menos energia disponível para o desenvolvimento de instabilidade.

Figura 10.2 Diferença entre a climatologia da temperatura em 2 metros no período futuro (2071-2100) e histórico (1981-2010) simuladas pelo modelo HadGEM3.



A análise das diferenças de TSM para os períodos aqui discutidos é mostrada na Figura 10.3. Os resultados também evidenciam uma elevação generalizada das temperaturas sobre os oceanos, mas destaca-se o significativo aumento sobre as regiões polares. Tais condições levam a um enfraquecimento do gradiente no futuro para todas as estações do ano, implicando em menos energia disponível para a formação de transientes e alteração no transporte de calor de latitudes baixas para altas latitudes.

Figura 10.3 Diferença entre a climatologia da TSM no período futuro (2071-2100) e histórico (1981-2010), simuladas pelo modelo HadGEM3.



10.2 Identificação dos eventos secos no período futuro (projeções do HadGEM3-CMIP6)

Considerando o cenário futuro de mudanças climáticas mais pessimista, foram analisadas as projeções do modelo HadGEM3, para ocorrência de eventos de seca no período de 2070 e 2100, nas áreas homogêneas identificadas neste estudo. As secas foram identificadas levando em consideração a climatologia do período futuro, que corresponde à média de 2070 a 2100. Assim, as características de temperatura e precipitação global diferem do clima presente.

As tabelas a seguir mostram o número de episódios de seca para os períodos histórico e futuro durante as estações do ano. Os resultados obtidos para DJF são apresentados na Tabela 10.1, e demonstram um aumento de casos de intensidade severa nas áreas 2 e 3, e uma diminuição no número de eventos moderados e extremos. Na área 1, por outro lado, exatamente o contrário é observado, tendo em vista o número superior de casos identificados em um

cenário futuro de eventos moderados e extremos, e menos eventos extremos. Ainda que o total de eventos de seca contabilizado seja relativamente semelhante para todas as áreas homogêneas, para um cenário futuro pessimista, no verão ocorreriam mais eventos secos na área 1, e menos nas áreas 2 e 3.

Tabela 10.1 Eventos de seca identificados nos meses de DJF com os dados do modelo HadGEM3 para os 31 anos do período histórico (1982-2012) e projeção futura (2070-2100).

Número de eventos de seca identificados – DEZ/JAN/FEV								
	Moderada		Severa		Extrema		Total	
	2070-2100	1982-2012	2070-2100	1982-2012	2070-2100	1982-2012	2070-2100	1982-2019
Área 1	7	5	4	5	2	1	13	11
Área 2	5	10	9	5	2	4	16	19
Área 3	4	9	7	2	3	4	14	15

Os resultados mostrados na tabela 10.2 referem-se às secas identificadas durante o outono. Somente na área 3 o total de eventos identificados em projeções de um cenário futuro é superior ao simulado pelo modelo no período histórico analisado; este é o reflexo de um aumento considerável (de 5, para 10 eventos) de casos moderados. O número de eventos moderados também é expressivamente maior no futuro em A4, no entanto os casos classificados como mais intensos, são menos recorrentes, e isto também foi observado em todas as demais áreas homogêneas. Neste sentido, destaca-se a A1, onde uma redução mais significativa do número de secas deve ser registrada, principalmente aqueles considerados extremos. A frequência de eventos de seca em A2, por outro lado, é praticamente igual em ambos os períodos analisados, sendo diferente apenas o número de casos extremos (2 no futuro e 3 no período histórico).

Tabela 10.2 Eventos de seca identificados nos meses de MAM com os dados do modelo HadGEM3 para os 31 anos do período histórico (1982-2012) e projeção futura (2070-2100).

Número de eventos de seca identificados – MAR/ABR/MAI								
	Moderada		Severa		Extrema		Total	
	2070-2100	1982-2012	2070-2100	1982-2012	2070-2100	1982-2012	2070-2100	1982-2012
Área 1	10	12	5	6	-	3	15	21
Área 2	8	8	3	3	2	3	13	14
Área 3	10	5	2	4	3	5	15	14
Área 4	9	5	2	7	3	5	14	17

Na tabela 10.3 são mostrados os eventos secos identificados no inverno (JJA). Embora o total de casos contabilizados utilizando os conjuntos de dados em cada uma das áreas seja praticamente igual, algumas diferenças importantes podem ser observadas. O número de eventos extremos é superior no cenário futuro para A1 e A2, e os severos mais recorrentes em A3 e A4. Os eventos de seca de intensidade moderada nas projeções analisadas não foram superiores ao total de casos verificados durante o período histórico simulados pelo modelo.

Tabela 10.3 Eventos de seca identificados nos meses de JJA com os dados do modelo HadGEM3 para os 31 anos do período histórico (1982-2012) e projeção futura (2070-2100).

Número de eventos de seca identificados – JUN/JUL/AGO								
	Moderada		Severa		Extrema		Total	
	2070-2100	1982-2012	2070-2100	1982-2012	2070-2100	1982-2012	2070-2100	1982-2012
Área 1	7	9	3	5	5	1	15	15
Área 2	8	8	3	5	3	2	14	15
Área 3	12	13	4	2	1	1	17	16
Área 4	9	7	5	4	2	3	16	14

A recorrência de eventos de seca durante a primavera (SON) é apresentada na tabela 10.4. Um número superior de eventos de seca deve ocorrer no cenário futuro analisado na área 2, tendo em vista a maior frequência de casos severos e principalmente moderados na região. Eventos de intensidade severa também deverão ocorrer de forma mais recorrente na área 1, ao contrário dos moderados e extremos. No caso da área 3, o número de secas severas identificadas em cada um dos períodos simulados pelo modelo é o mesmo, porém tanto os moderados e extremos é inferior no futuro, quando comparado ao período histórico. A área 4 é a única região homogênea na qual o número de eventos severos é superior na simulação do período histórico, porém inferior para casos extremos.

Tabela 10.4 Eventos de seca identificados nos meses de SON com os dados do modelo HadGEM3 para os 31 anos do período histórico (1982-2012) e projeção futura (2070-2100).

Número de eventos de seca identificados – SET/OUT/NOV								
	Moderada		Severa		Extrema		Total	
	2070-2100	1982-2012	2070-2100	1982-2012	2070-2100	1982-2012	2070-2100	1982-2012
Área 1	7	9	4	2	2	5	13	16
Área 2	12	5	5	4	-	6	17	15
Área 3	6	8	4	4	2	3	12	15
Área 4	9	9	2	4	4	2	15	15

Os resultados discutidos neste capítulo não evidenciam grandes diferenças entre o número total de secas identificadas durante o período histórico analisado, e projeções futuras para 2070-2100, simuladas pelo HadGEM3. No entanto, é importante ressaltar que os casos identificados levam em consideração períodos climatológicos diferentes, o que resulta em condições médias da atmosfera distintas das atuais principalmente em função do cenário de mudanças climáticas. Essas diferenças foram mostradas na seção 10.1

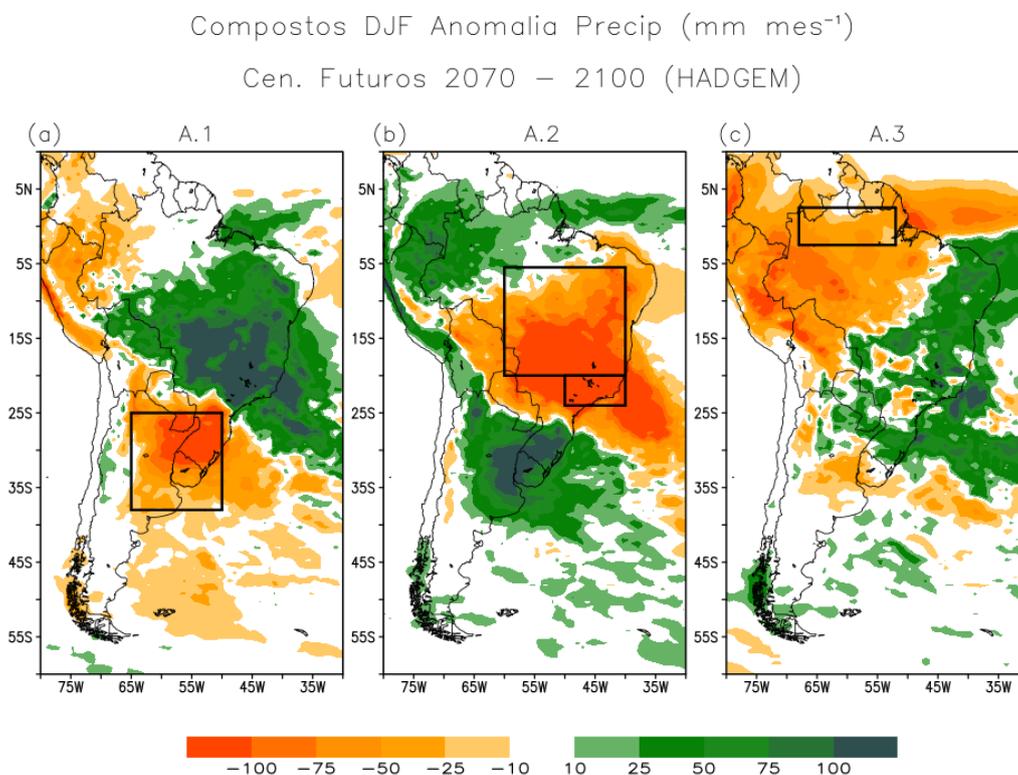
10.3 Padrões de anomalias de precipitação para os casos de secas nas projeções futuras

Com objetivo de identificar alterações nos padrões de precipitação associados às secas em um cenário futuro de mudanças climáticas, foram analisados os compostos das anomalias durante tais eventos.

10.3.1 Verão

Na Figura 10.4 são apresentados os compostos de anomalias de precipitação no trimestre DJF. A principal diferença no comportamento das chuvas foi identificada sobre a região que abrange a Amazônia, isso porque no caso do composto para A1V (Figura 10.4a), uma área menor no noroeste do Brasil aparece com anomalias positivas de precipitação, do que a do período histórico.

Figura 10.4 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro (DJF), simulados pelo modelo HadGEM3 para o cenário futuro para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).



Além disso, em A3V (Figura 10.4c), observa-se que a região a norte do continente que apresenta um padrão de seca, estende-se mais em direção ao Brasil central. Neste caso, as anomalias opostas sobre o sudeste e centro-oeste ocorrem de maneira mais esparsa, chegando até o sul do Brasil e leste da Argentina, onde anomalias negativas eram identificadas no período histórico. Porém, o padrão de dipolo em A1V e o principal modo de variabilidade de precipitação da América do Sul visto em A2V permanecem nesses compostos para o clima futuro.

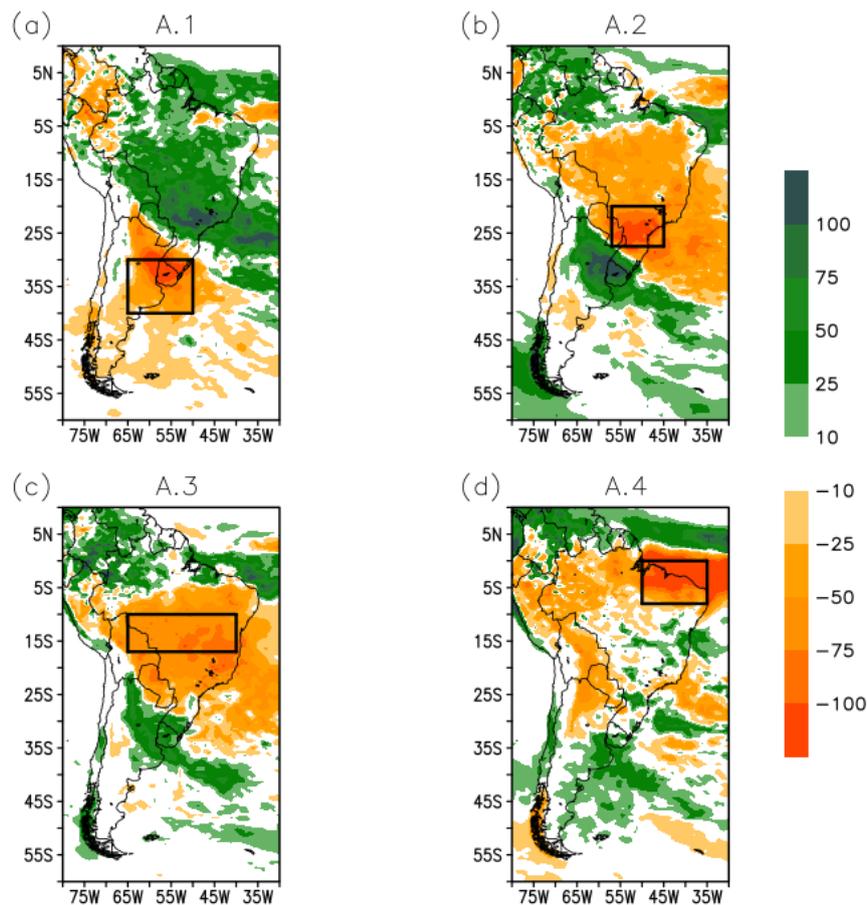
10.3.2 Outono

A magnitude das anomalias negativas de precipitação sobre A1O e A2O em MAM (Figura 10.5a e b) é maior nos compostos que representam a projeção futura, indicando eventos mais severos no cenário analisado. A existência de

um padrão de dipolo entre A1O e A2O é melhor estabelecida em um cenário futuro, e no caso da área A2 há uma ampla área do Brasil tropical, incluindo CO, SE, parte do NE e N, parte do Paraguai e da Bolívia com condições de seca. Também se observou no composto de A3O, anomalias negativas enfraquecidas, o que pode indicar em um cenário futuro, a ocorrência de eventos de seca menos severos nessa região durante o outono.

Figura 10.5 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Março/Abril/Maio (MAM), simulados pelo modelo HadGEM3 para o cenário futuro para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Compostos MAM Anomalia Precip (mm mes^{-1})
Cen. Futuros 2070 – 2100 (HADGEM)

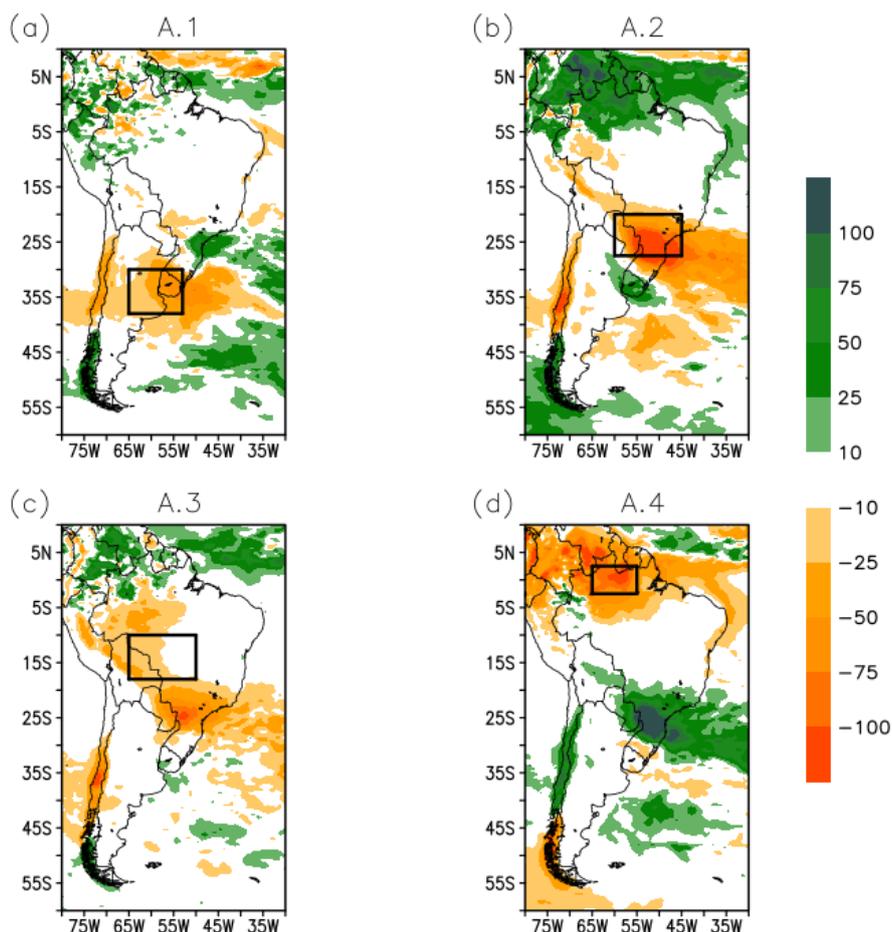


10.3.3 Inverno

O padrão das secas nas áreas continua a ser o mesmo do período histórico e das observações (Figura 10.6). A intensidade das anomalias de precipitação identificadas em A2I e A4I (Figura 10.6b e d) é maior quando comparada à identificada nos compostos do período histórico, embora ocupem uma área menor, o que pode significar eventos de seca mais severos. As anomalias observadas sobre as áreas A1I e A3I além de abrangerem uma extensão menor, como em A2I e A4I (Figura 10.6b e d), apresentam magnitude menor durante JJA.

Figura 10.6 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Junho/Julho/Agosto (JJA), simulados pelo modelo HadGEM3 para o cenário futuro para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Compostos JJA Anomalia Precip (mm mes⁻¹)
 Cen. Futuros 2070 – 2100 (HADGEM)



Destaca-se ainda que, o dipolo de anomalias de precipitação identificado no período histórico entre A1I (Figura 9.13a) e o SE e CO do Brasil se concentra, no setor norte, apenas em uma pequena área entre leste de SC, PR e litoral de SP com chuvas acima da média. Para os compostos desta área, as regiões ao norte, sobre o Brasil que apresentavam chuvas acima da média no período histórico, mostram precipitação dentro da normalidade – valores próximos a normal climatológica do período futuro. A A4 (Figura 10.6d), localizada no norte da região Amazônica, destaca-se durante o inverno (JJA) com anomalias de

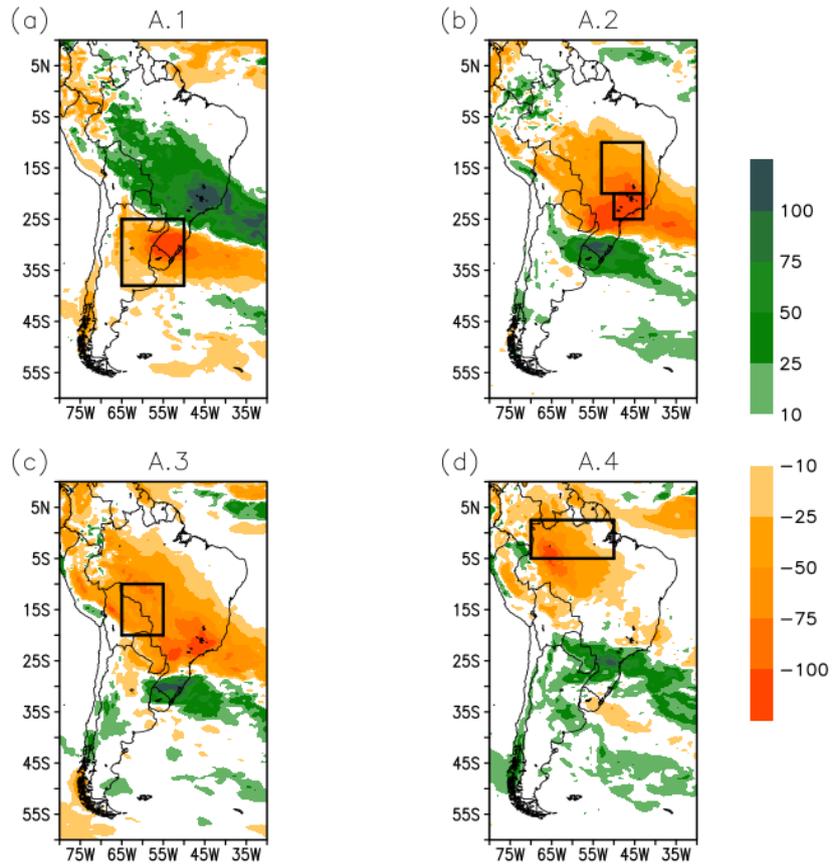
magnitude ainda maior em casos de seca em um cenário futuro de mudanças climáticas. Este é um fator importante pois pode intensificar os efeitos dos eventos de seca, principalmente durante a estação seca, favorecendo a ocorrência de incêndios.

10.3.4 Primavera

Durante SON, o padrão de anomalias de precipitação associadas aos casos de seca nas projeções futuras (Figura 10.7) também se assemelha muito ao comportamento identificado nas simulações do presente. Entretanto, as projeções de anomalias negativas de precipitação indicam a ocorrência de eventos mais intensos principalmente em A1P e A2P (Figura 10.7a e b). No composto da área A4P nota-se que as anomalias mais fortes estão no oeste da Amazônia. A distribuição espacial das anomalias é bastante semelhante àquela identificada no período histórico, com a presença de um dipolo estabelecido entre as áreas 1 e 2 (Figura 10.7a e b).

Figura 10.7 Compostos de anomalia de precipitação durante os meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON), simulados pelo modelo HadGEM3 para o cenário futuro para os episódios de seca nas áreas homogêneas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Compostos SON Anomalia Precip (mm mes⁻¹)
Cen. Futuros 2070 – 2100 (HADGEM)



11 SECA 2019/2020

11.1 Contextualização do caso

A América do Sul enfrentou a segunda seca mais severa desde 2002 entre 2019 e 2020, conforme a NASA (2020). Em seu relatório, a NASA (2020) identificou os primeiros sinais de seca foram observados no armazenamento de águas subterrâneas rasas a partir de dados de gravimetria de satélite em meados de 2018 sobre o SE do Brasil e se espalhando por áreas no Paraguai, Bolívia e, posteriormente, no norte da Argentina, cobrindo todo o continente até outubro de 2020.

O longo período de estiagem no centro e sul da SA teve grandes impactos nos setores social, econômico e ambiental. Os impactos desse fenômeno representaram milhões de dólares em prejuízos para os países afetados. As colheitas de milho de inverno foram baixas e o atraso nas chuvas de primavera fez com que os agricultores atrasassem a semeadura da soja. Níveis de água muito baixos nos principais rios da América do Sul (Paraguai, Paraná e La Plata) prejudicaram e até impediram a navegação e o transporte, afetaram o turismo e as economias locais e regionais por meio da redução da pesca. O nível de água no rio Paraguai durante 2020 estava entre os mais baixos registrados nos últimos 100 anos (AP News, 2020) e o baixo nível de água no rio Paraná foi o mais crítico nos últimos 50 anos (INA, 2020). Consequentemente, o transporte teve que ser restringido em alguns trechos deste rio e com atrasos de cargas e navios com cargas menores que o normal, milhões de dólares em comércio foram perdidos (BCR, 2020). O embarque de cereais e minerais pelo Paraná-Paraguai Hidrovia, que funciona como uma saída para o Oceano Atlântico, foi seriamente afetada (MARENGO et al., 2021). Além disso, a falta de água no rio Paraná também afetou o ecossistema fluvial e outras atividades essenciais, como pesca e purificação de água (BCR, 2020).

11.2 Precipitação, temperatura e fluxo de umidade sobre a América do Sul

O verão austral (DJF) é a estação chuvosa climatológica em grandes áreas da AS, associada ao Sistema de Monções Sul-Americano (SMSA, MARENGO et

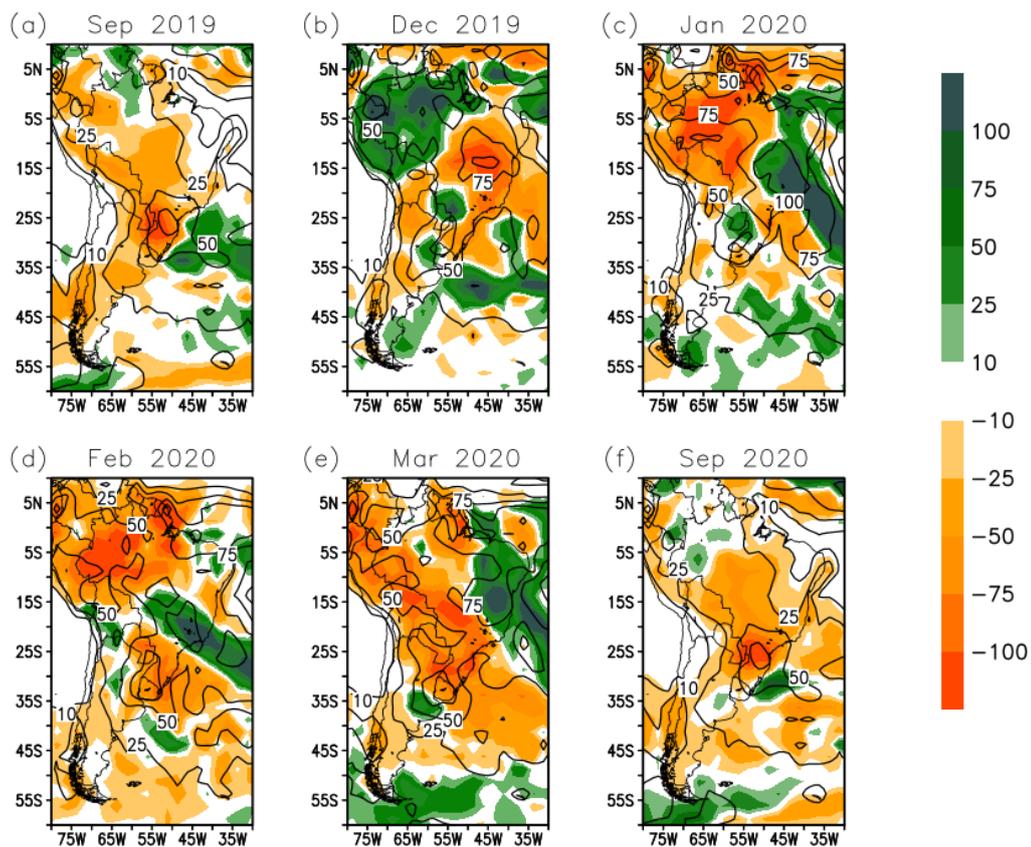
al., 2012; CARVALHO; CAVALCANTI, 2016). No entanto, durante o verão 2019-2020, foi registada precipitação abaixo do normal na maior parte do continente e as anomalias negativas apresentaram valores superiores ao desvio padrão (Figura 11.1b,c,d). Em dezembro (Figura 11.1b), exceto na Amazônia ocidental, houve condições de seca em muitas regiões da AS. A seca foi intensa na Amazônia, centro-oeste e partes do sudeste da AS em janeiro (Figura 11.1c) e fevereiro (Figura 11.1d). Nesses dois meses, ocorreram anomalias de precipitação positivas em parte do sudeste do Brasil, estendendo-se até o oceano, em um padrão consistente com a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), quando a banda convectiva se estende de SE ao oceano e há condição seca na Amazônia (CARVALHO et al., 2004). A mesma configuração foi discutida por Vasconcellos e Souza (2022), que analisaram o trimestre chuvoso de JFM 2020 sobre o SE do Brasil. Diferente dessa configuração, a ZCAS continental é mais ampla e se estende até a região amazônica (CARVALHO et al., 2004; ROSA et al., 2020). O modo dominante de variabilidade da precipitação no verão, sobre a América do Sul, apresenta anomalias opostas entre a região das monções e as regiões noroeste e sudeste da AS (GRIMM; ZILLI, 2009; CAVALCANTI et al., 2017; BARRETO et al., 2019). Durante o verão 2019/2020, embora tenha havido precipitação positiva anômala sobre o sudeste do Brasil em janeiro e fevereiro, e anomalias negativas ao sul e noroeste, as anomalias negativas se estenderam por toda a Amazônia, em um padrão diferente, em comparação com a variabilidade normal e aos eventos continentais da ZCAS.

Antes dos meses de verão, condições secas foram estabelecidas em setembro de 2019 (Figura 11.1a) sobre AS e, após o verão, altas anomalias negativas de precipitação se estenderam da região amazônica ao sudeste da SA em março de 2020 (Figura 11.1e) afetando essas regiões e também a região central. A seca continuou em algumas regiões do continente até a primavera de 2020, conforme mostrado em setembro de 2020 (Figura 11.1f), muito semelhante às anomalias de precipitação de setembro de 2019 (Figura 11.1a). No norte da Argentina e no sul do Brasil, a persistência de chuvas abaixo do normal ficou evidente principalmente em setembro de 2019, março e setembro de 2020.

Considerando as anomalias em toda a Argentina, 2020 foi considerado o quinto ano mais seco de toda a série histórica de 1961 a 2020, e o ano mais seco na Argentina desde 1995 (SMN, 2021).

Figura 11.1 Anomalias de precipitação (mm/mês) e desvio padrão para (a) SET 2019, (b) DEZ 2019, (c) JAN 2020, (d) FEV 2020, (e) MAR 2020 e (f) SET 2020.

Precipitation Anomaly (mm month⁻¹) and Standard Deviation

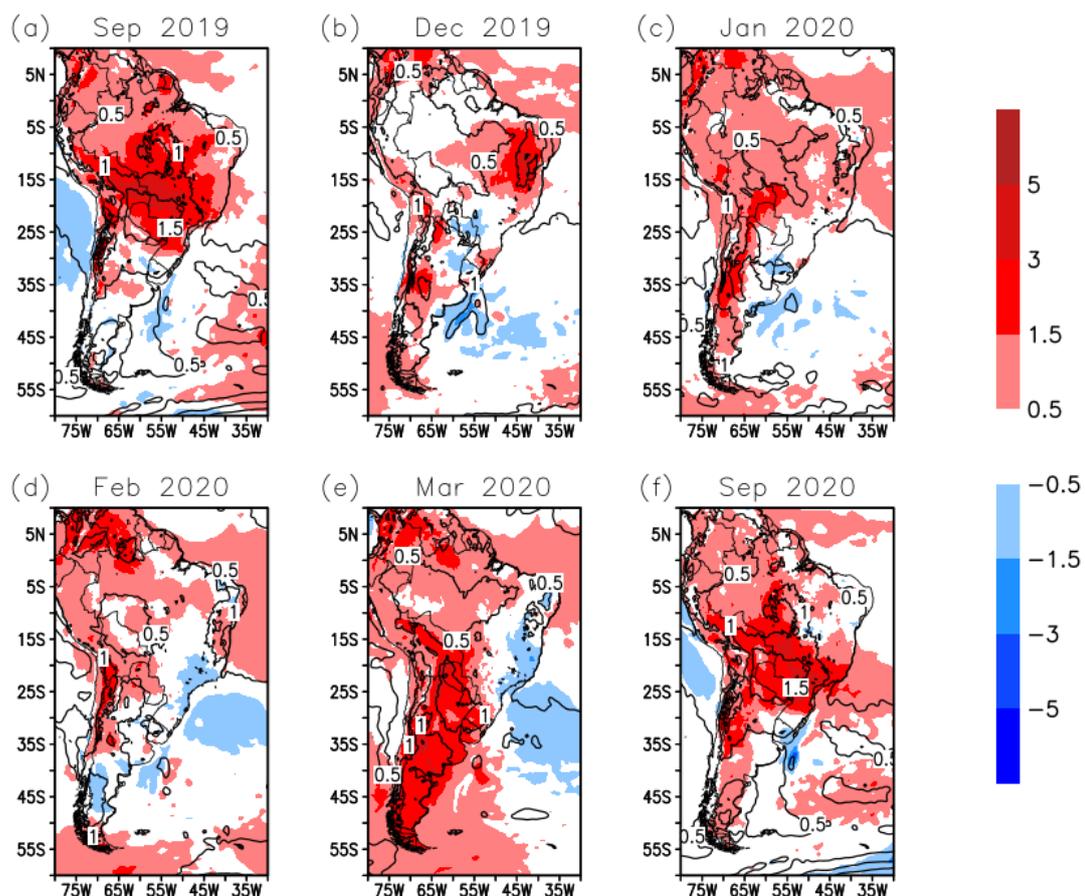


Durante o período analisado, os meses de setembro (2019, 2020) e março de 2020 registraram uma grande extensão de altas anomalias positivas de temperatura em 2 m, acima do desvio padrão em muitas áreas (Figura 11.2a,e,f). As altas temperaturas e a falta de precipitação contribuíram para a incidência de queimadas ocorrida durante 2019-2020 em várias áreas da AS, no Brasil (ARAGÃO et al., 2020) e Argentina (SNMF, 2020; MAGyP, 2020). Deve-se notar também que 2020 foi o segundo mais quente desde 1961 na

Argentina (SMN, 2021), o que pode ter potencializado consideravelmente os efeitos da seca que afetou a região.

Figura 11.2 Anomalias de temperatura em 2 metros ($^{\circ}\text{C}$) e desvio padrão para (a) SET 2019, (b) DEZ 2019, (c) JAN 2020, (d) FEV 2020, (e) MAR 2020 e (f) SET 2020.

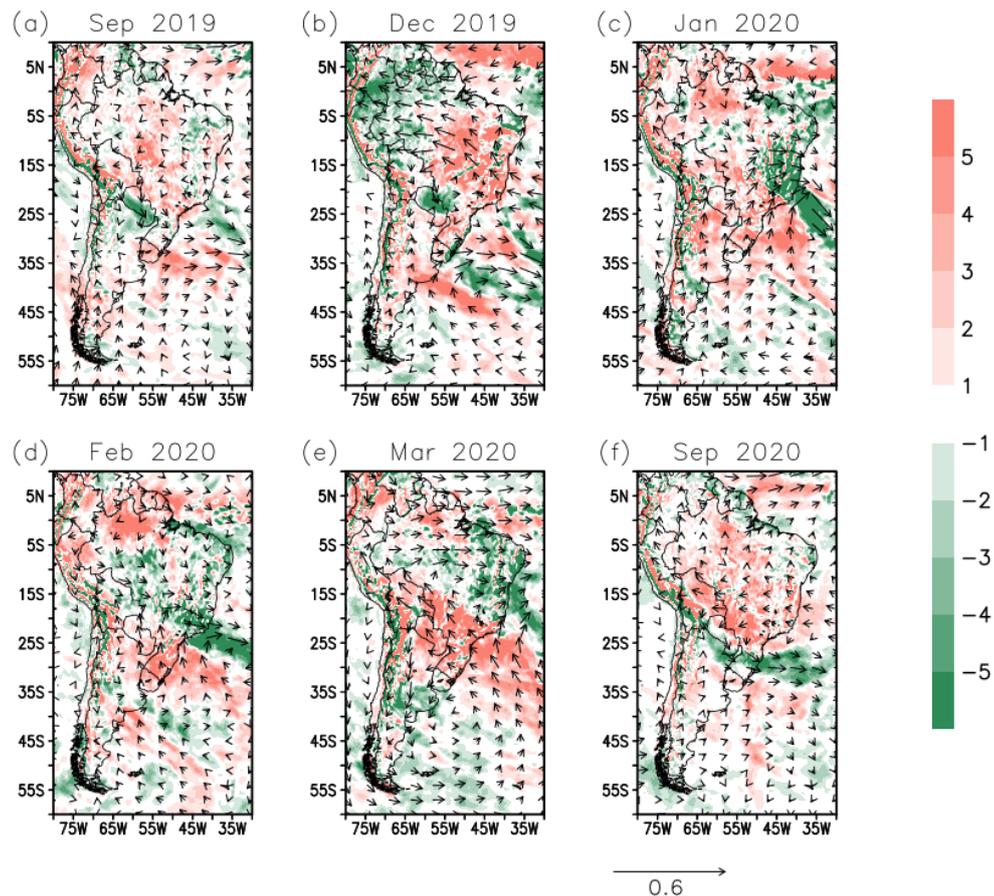
Temperature Anomaly at 2m ($^{\circ}\text{C}$) and Standard Deviation



As condições anômalas de precipitação durante os meses de verão foram associadas ao fluxo de umidade vertical integrada anômala (Figura 11.3), que mostrou redução no sudeste do Brasil em dezembro (Figura 11.3b), e anomalias direcionadas para o SE e para o oceano em janeiro (Figura 11.3c) e fevereiro (Figura 11.3d), consistentes com a faixa de precipitação estendida sobre o oceano nestes meses. Há divergência de umidade sobre as áreas secas e convergência sobre o SE e a ZCAS oceânica.

Figura 11.3 Anomalias de fluxo de umidade integrado verticalmente (kg/ m s) e sua divergência (a) SET 2019, (b) DEZ 2019, (c) JAN 2020, (d) FEV 2020, (e) MAR 2020 e (f) SET 2020.

Integrated Moisture Flux ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$) and Divergence (10^4 mm day^{-1}) Anomalies



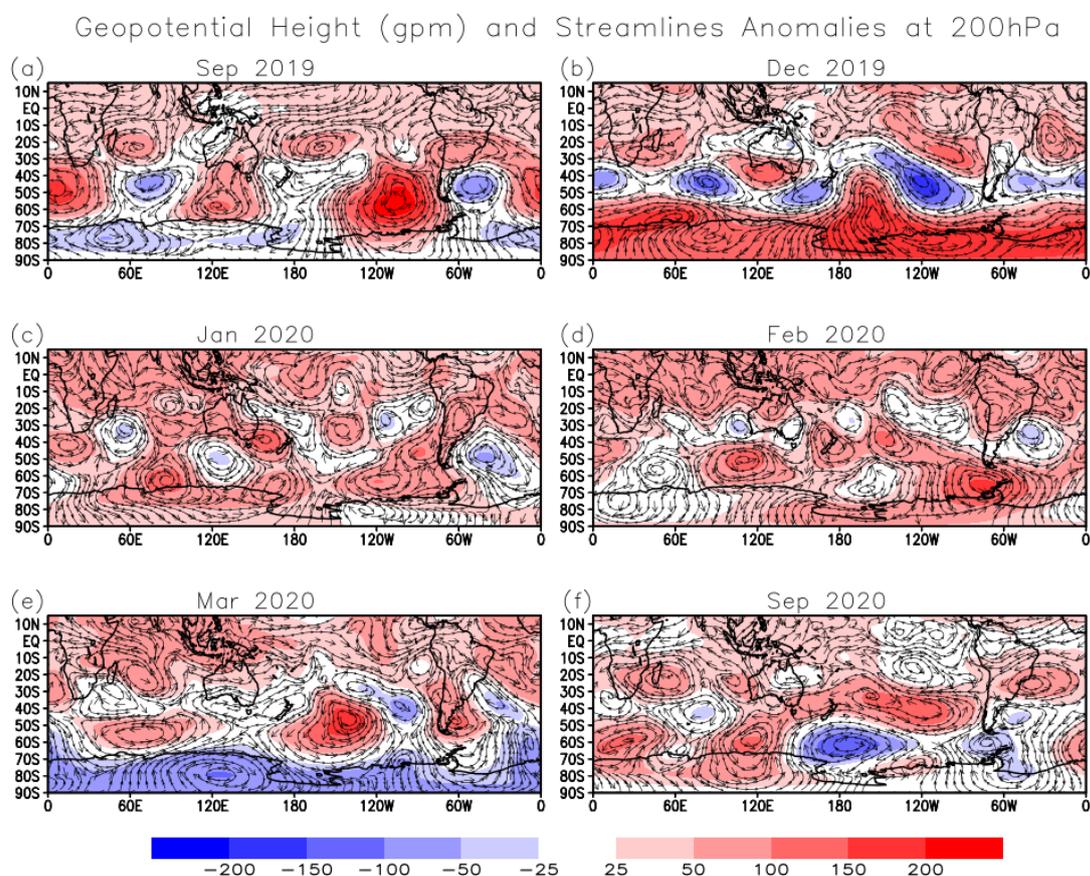
As condições normais durante estes meses apresentam fluxo de umidade direcionada da Região Amazônica para o Sudeste do Brasil ou para a Bacia do Prata (ARRAUT et al., 2012; MARTINEZ e DOMINGUEZ, 2014), muitas vezes associada à ocorrência do Jato de Baixo Nível (JBN) (MARENGO et al., 2004). Em todos os meses houve uma redução do fluxo de umidade nas áreas afetadas. Em consonância com as condições de seca, houve divergência anômala de umidade em grandes áreas da AS.

11.3 Aspectos de larga escala

As anomalias de circulação atmosférica do Hemisfério Sul (HS) durante esses meses são exibidas nas anomalias geopotenciais em 200 hPa (Figura 11.4).

Trens de ondas extratropicais de número 3 e 4 são identificados nos padrões, e a característica comum é o centro de anomalia negativa sobre o sudoeste do Atlântico Sul, próximo ao sudeste da AS, de setembro de 2019 a março de 2020. Este centro faz parte do trem de ondas que atravessa o Oceano Pacífico, embora com configurações diferentes de setembro de 2019 a setembro de 2020. Sobre o continente persistiram anomalias de geopotencial positivas durante este período, indicando maior espessura e temperatura da atmosfera superior à climatologia, ao mesmo tempo em que o ar mais frio do cavado anômalo foi persistente sobre o sudoeste do Atlântico Sul, estendendo-se para a costa Sul e SE em dezembro e março, respectivamente (Figura 11.4). Em janeiro, fevereiro e março, o centro negativo se deslocou para o norte sobre o oceano, próximo à costa, e contribuiu para o estabelecimento da banda de precipitação sobre o sudeste e nordeste do Brasil (Figura 11.1c,d,f e Figura 11.4c,d ,f).

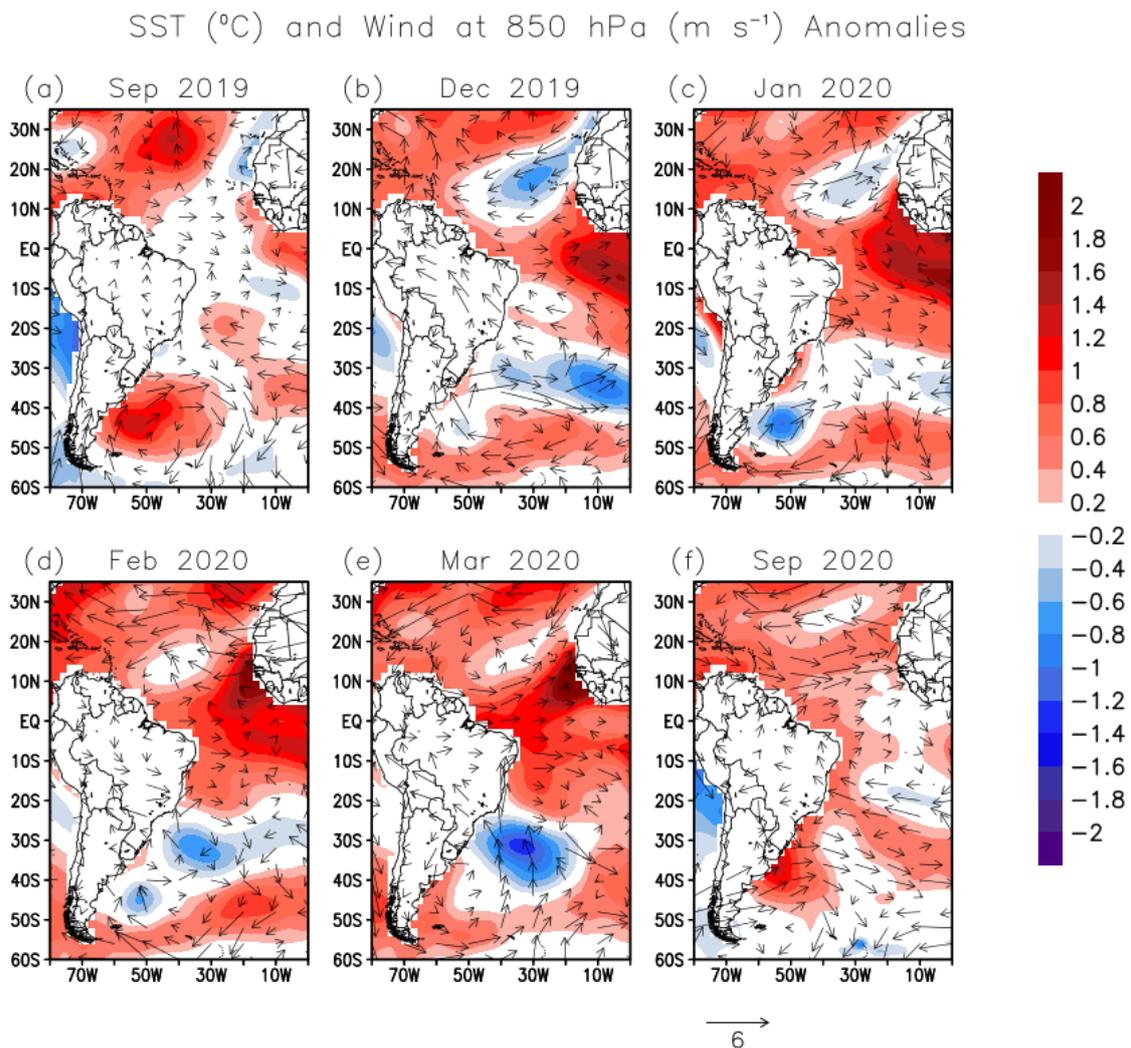
Figura 11.4 Anomalias de altura geopotencial (gpm) e linhas de corrente para (a) SET 2019, (b) DEZ 2019, (c) JAN 2020, (d) FEV 2020, (e) MAR 2020 e (f) SET 2020.



Essas anomalias sugerem que os sistemas sinóticos como frentes frias estavam intensificando a ZCAS oceânica, enquanto as demais regiões do continente estavam secas. O estabelecimento da anomalia ciclônica sobre o Oceano Atlântico Sul, ligada a um trem de ondas sobre os Oceanos Índico e Pacífico, durante o trimestre de DJF, também foi identificado em Vasconcellos e Souza (2022), associado ao excesso de precipitação sobre o Sudeste do Brasil. Além disso, foi mostrada uma influência da TSM atlântica na configuração da ZCAS oceânica, por meio de correlações entre TSM no Atlântico Sul subtropical e anomalias de precipitação sobre a América do Sul. Consistente com essas análises, de dezembro de 2019 a março de 2020 existem anomalias de TSM negativas nesta região do Oceano Atlântico e

anomalias positivas de TSM em grandes áreas do Atlântico Norte e Tropical (Figura 11.5).

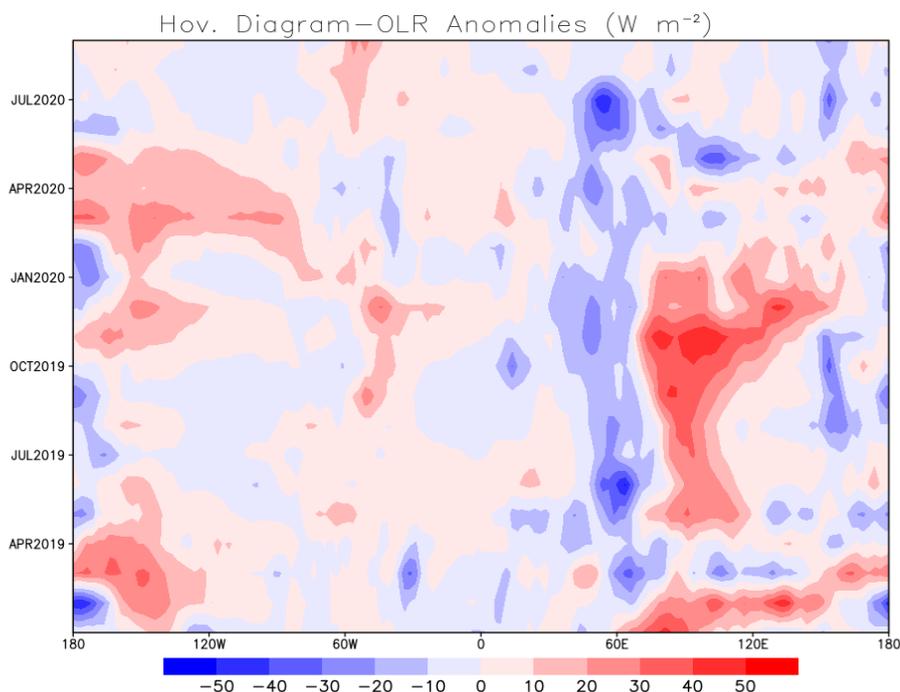
Figura 11.5 Anomalias de TSM (°C) (a) SET 2019, (b) DEZ 2019, (c), JAN 2020, (d) FEV 2020, (e) MAR 2020 e (f) SET 2020.



Para investigar por que o centro negativo anômalo sobre o sudoeste do Atlântico Sul era persistente, bem como a manutenção de anomalias geopotenciais positivas sobre o continente, foram analisadas as condições sobre o Oceano Pacífico. Sabe-se que a Oscilação Madden-Julian (OMJ) afeta a ZCAS através de interações trópicos-extratrópicos pelo trem de ondas da América do Sul do Pacífico (PSA) ou através do deslocamento zonal tropical de convecção (MO; PAEGLE, 2001; CUNNINGHAM; CAVALCANTI, 2006;

CARVALHO et al., 2011). A configuração típica de OMJ sobre o Pacífico Equatorial é um par oeste-leste de OLR negativo e positivo anômalos, significando convecção anômala, que se desloca para leste em uma escala de tempo intrasazonal (MADDEN; JULIAN, 1972). No entanto, durante 2019/2020, este par permaneceu estacionário por mais de seis meses sobre o Oceano Índico e a Indonésia e não se deslocou para leste (Figura 11.6). Isso parece afetar o desencadeamento usual dos trens de ondas de PSA que afetam SA, e pode ter colaborado para a persistência do centro ciclônico sobre o sudoeste do Oceano Atlântico Sul, que afetou áreas de SE em janeiro e fevereiro, e áreas de NE em março (Figura 11.4). Este centro ciclônico é parte de um trem de ondas observado a partir da anomalia de convecção constante sobre o Oceano Índico (Figura 11.6) durante o período.

Figura 11.6 Diagrama Hovmoller de OLR (W/m^2) com média em latitudes de $10^{\circ}S$ - $10^{\circ}N$.

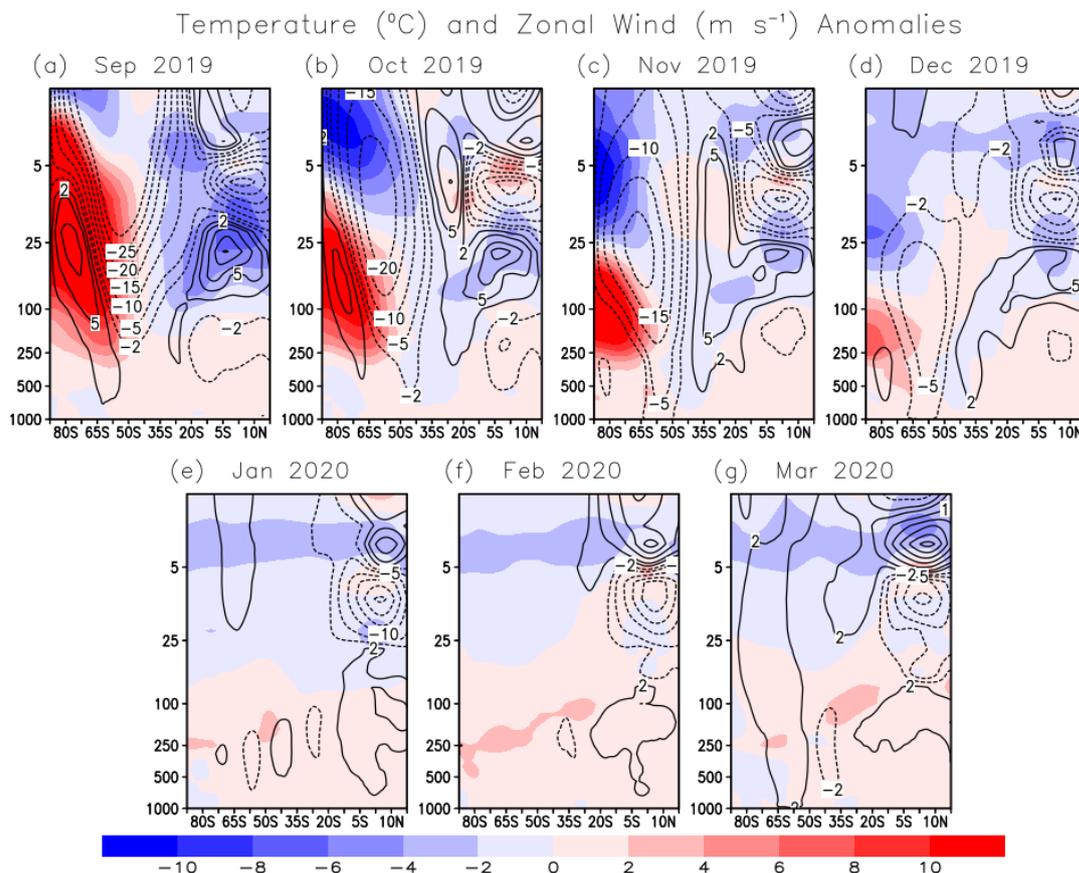


Vasconcellos e Souza (2022) relacionaram a divergência em altos níveis sobre o Oceano Índico à presença de um trem de ondas para a AS no trimestre de

JFM (2020). Consistente com essa discussão, os trens de onda são observados nas análises mensais de altura geopotencial e anomalias de linhas de corrente do Oceano Índico para AS (Figura 11.4).

Outra característica que pode estar relacionada à estiagem no período, foi a ocorrência do Aquecimento Estratosférico Súbito (SSW). Lima et al. (2019) relacionaram o enfraquecimento do vórtice polar do HS às secas na Austrália, mostrando que nesses períodos houve fortes anomalias positivas de temperatura e redução da precipitação sobre a Austrália. O evento SSW de 2019 foi discutido em Lim et al. (2021), onde mostram que o enfraquecimento do vórtice polar estratosférico induziu a fase negativa do Modo Anular Sul (MAS), que contribuiu para a seca australiana. Shen et al. (2020) discutiram as relações deste evento em setembro de 2019 com uma situação de bloqueio entre 120° W e 90° W que poderia aumentar a amplitude das ondas planetárias e contribuir para sua propagação na estratosfera. Sabe-se que essa propagação tem influência no vórtice polar estratosférico, reduzindo sua intensidade ao mesmo tempo em que ocorre um aquecimento estratosférico (BALDWIN et al., 2021). Na Figura 11.4a (SEP, 2019), o centro de anomalia geopotencial positiva sobre o sudeste do Oceano Pacífico, provavelmente relacionado a um bloqueio, é consistente com Shen et al. (2020). Em dezembro de 2019 observa-se a fase negativa do MAS (Figura 12.4b), coerente com os resultados de Rao et al. (2020) que encontraram o impacto na troposfera alguns meses após a ocorrência de SSW. A Figura 11.7 mostra a estrutura vertical das anomalias de temperatura e vento zonal, média em longitudes de 120° W– 360° W, de setembro de 2019 a março de 2020. O forte aquecimento na estratosfera do polo até 50° S é observado em setembro de 2019, ao mesmo tempo em que há fortes anomalias negativas de vento zonal, indicando o enfraquecimento do vórtice polar estratosférico. Em outubro, novembro e dezembro de 2019, o enfraquecimento de oeste se estende para a troposfera, resultando na fase negativa do MAS em dezembro de 2019.

Figura 11.7 Estrutura vertical de anomalia de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e anomalia de vento zonal (m/s) média em longitudes de 120°O - 360°O para (a) SET 2019, (b) OUT 2019, (c) NOV 2019, (d) DEZ 2019, (e) JAN 2020, (f) FEV 2020 e (g) MAR 2020.

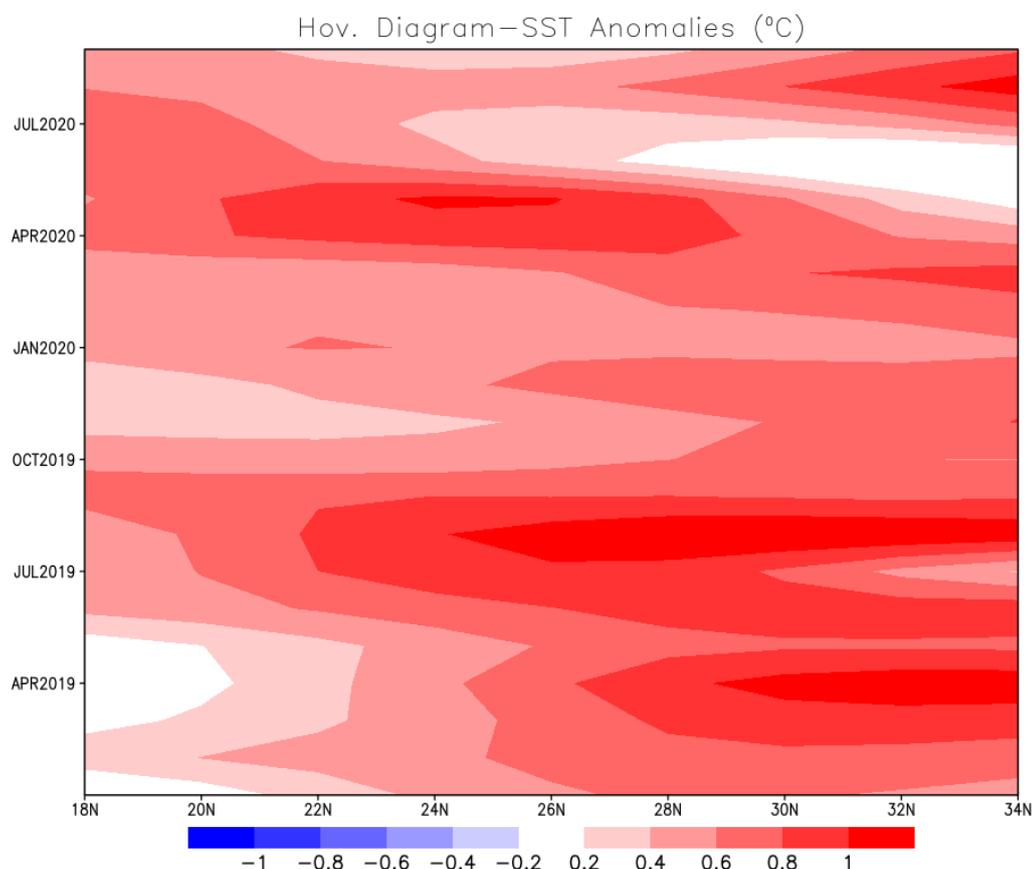


O aquecimento anômalo se desloca da estratosfera para a troposfera de setembro a dezembro e se espalha sobre a AS nos meses seguintes. A fase negativa do MAS enfraqueceu em janeiro e se tornou positiva em março. A fase positiva indicada pela média geopotencial de JFM (2020) em Vasconcellos e Souza (2022) foi relacionada à precipitação anômala na ZCAS oceânica. As influências do MAS na precipitação da AS foram discutidas em Silvestre e Vera (2003), Reboita et al. (2009), Vasconcellos e Cavalcanti (2010), Rosso et al. (2018). Esses estudos mostram que durante o verão e fase positiva, há aumento da precipitação sobre o SE do Brasil associado à ZCAS e precipitação negativa no sul. Durante a fase negativa do MAS há anomalia negativa de precipitação no Centro-Oeste e Sudeste do Brasil e anomalias positivas no sul.

Os mecanismos ligados às anomalias do sul estão relacionados com o deslocamento para norte das trilhas de tempestade e a intensificação do jato subtropical ou a contribuição para a intensificação dos trens de ondas do PSA. No entanto, durante dezembro de 2019, como outros fatores estavam atuando, as anomalias negativas de precipitação se estenderam para o sul, e o setor sul do Centro-Oeste do Brasil apresentou anomalias positivas (Figura 11.1b). As anomalias positivas de precipitação sobre o oceano sugerem que as trilhas de tempestade foram mais ativas sobre o Oceano Atlântico. A ocorrência do Modo Anular Sul negativo, gerando subsidência sobre áreas subtropicais, também foi discutida como o principal fator de condições extremas de seca e calor na Austrália durante a primavera de 2019 (LIM et al. 2019, 2021). Portanto, a fase negativa do MAS observada em dezembro de 2019 pode ser outro contribuinte para as condições de seca nas áreas observadas. Em março de 2020 foi observada a fase positiva da MAS (Figura 11.4e), o que favorece condições secas sobre o SESA.

Outros fatores influenciaram a seca na AS durante o período analisado. TSMs acima do normal foram observadas em todos os oceanos, principalmente no Oceano Atlântico Norte, durante todo o período da seca da AS. A Figura 11.8 mostra a média das anomalias de TSM nas longitudes de 70° W–35° W para cada latitude entre 18° N–34° N de janeiro de 2019 a setembro de 2020, indicando TSM mais quente que o normal durante o período de seca. A influência do aquecimento da TSM do Oceano Atlântico Norte nas secas do sul da Amazônia foi discutida em diversos estudos, como Zeng et al. (2008), Zou et al. (2016), Erfanian et al. (2017). O mecanismo é o estabelecimento de uma célula de Hadley local, com movimento ascendente sobre o Oceano Atlântico Norte mais quente que o normal e subsidência sobre a Amazônia. A TSM mais quente que o normal no Atlântico Norte também influencia a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que se desloca para o norte nesta condição (NOBRE; SHUKLA, 1996; HASTENRATH, 2006).

Figura 11.8 Diagrama Hovmoller de anomalias TSM (°C) em média nas longitudes de 70°O - 35°O para cada latitude entre 18° N - 34 ° N de janeiro de 2019 a setembro de 2020.



Séries temporais de anomalias de precipitação médias na área Centro-Oeste (65° W–50° W; 12° S–25° S) e área Sul (65° W–50° W; 25° S–35° S) são mostradas na Figura 41 para setembro e na Figura 42 para março. São meses em que a seca de 2019/2020 se alastrou pelo continente (Figura 12.1). As Figuras 11.9 e 11.10 também mostram as séries temporais dos índices DMI, PDO, AMO e El Niño 3.4. Embora PDO e AMO tenham uma variabilidade decadal, os índices também apresentam menor variabilidade de escala de tempo.

Durante o período analisado, a Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) indicou a fase positiva para setembro de 2019, setembro de 2020 e março de 2020. Verifica-se que setembro de 2019 e setembro de 2020 são anos dentro

dos cinco anos mais secos (1988, 2004, 2007, 2019, 2020) na região Centro-Oeste e nos quatro anos mais secos (1987, 2016, 2019, 2020) na região Sul. Março de 2020 está dentro dos seis anos mais secos da região Centro-Oeste (1990, 2002, 2004, 2007, 2012, 2020) e também nos seis anos mais secos (1982, 1997, 2004, 2008, 2012, 2020) na região Sul.

Figura 11.9 Séries temporais SET de DMI, PDO, EN_3.4, AMO e anomalias de precipitação em (a) área Centro-Oeste (65°O - 50°O, 12°S - 25°S), (b) área Sul (65°W - 50°W, 25°S - 35°S).

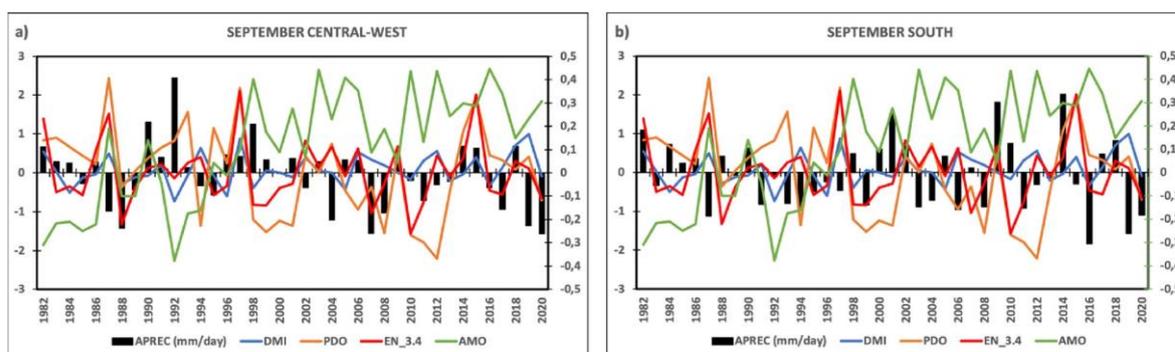
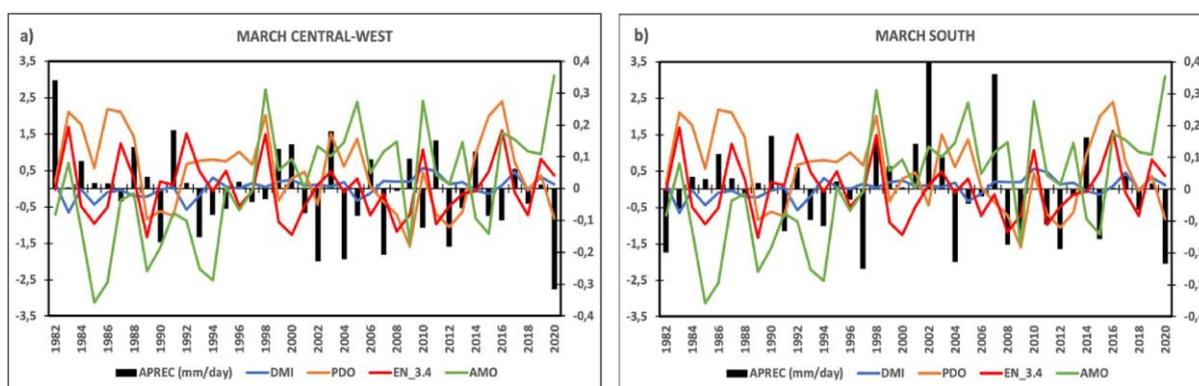


Figura 11.10 Séries temporais MAR de DMI, PDO, EN_3.4, AMO e anomalias de precipitação em (a) área Centro-Oeste (65°O - 50°O, 12°S - 25°S), (b) área Sul (65°O - 50°O, 25°S-35°S).



No Centro-Oeste a maioria dos anos com anomalias negativas de precipitação ocorreu com DOP negativo, exceto março de 2004 e setembro de 2019. No

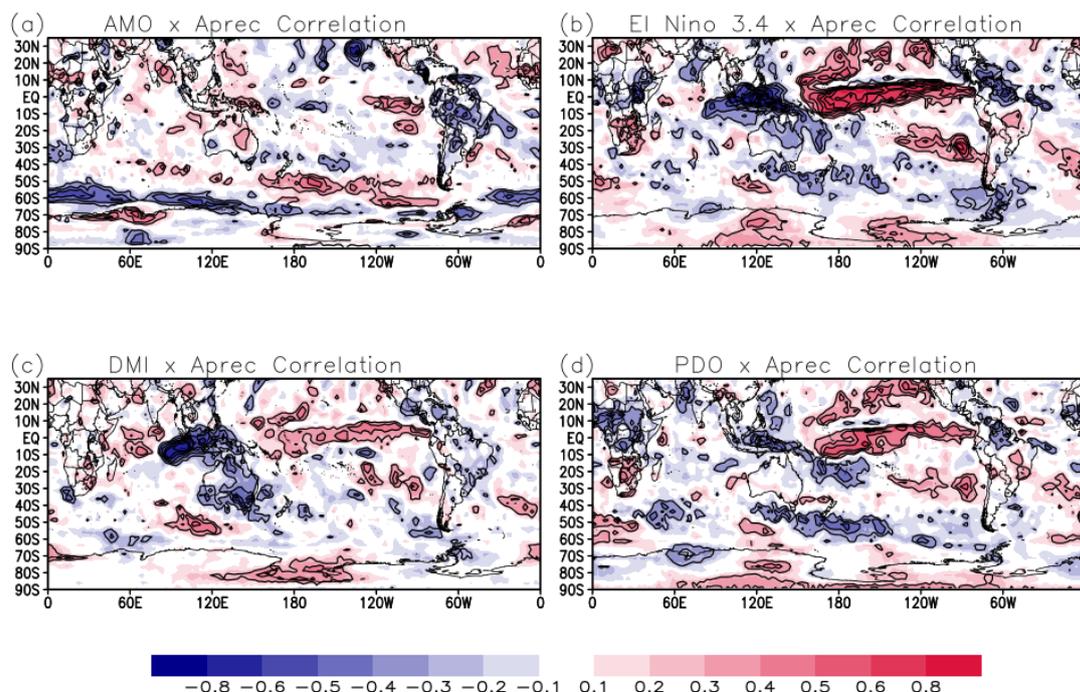
Sul, houve DOP positivo ou negativo em casos de anomalias negativas de precipitação em setembro e março, mas em 2020 foi negativo nos dois meses.

O Índice Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) foi negativo em março e setembro de 2020 e o AMO foi positivo em março de 2020, setembro 2019 e de 2020. A ocorrência de fase positiva do AMO e negativa do PDO pode ter intensificado a seca sobre as áreas SESA e Brasil Central. Essas regiões também apresentaram condições secas durante esta combinação mostrada em Kayano et al. (2019). O Índice do Modo Dipolo (DMI), que representa o Dipolo do Oceano Índico (IOD), foi positivo e alto em setembro de 2019 e março de 2020, e pode ter contribuído para o estabelecimento de um trem de ondas sobre os oceanos Índico e Pacífico que atingiu a América do Sul. A influência do IOD sobre o clima sul-americano foi discutida por Saji et al. (2005), que mostraram correlações positivas entre o IOD e a temperatura da superfície terrestre sobre a AS subtropical, e por Chan et al. (2008), que encontraram precipitação reduzida sobre a região central do Brasil associada a IOD positivo.

As correlações desses índices com anomalias de precipitação são mostradas na Figura 11.11 (setembro) e Figura. 11.12 (março). As correlações negativas entre o índice AMO e anomalias de precipitação sobre a Amazônia, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (Figura 11.11a) ilustram a relação entre anomalias positivas de TSM do Atlântico Norte e condições secas sobre a AS em setembro. Correlações positivas do índice EN-3.4 ou PDO com anomalias de precipitação na região Centro-Oeste (Centro e Sudeste) em setembro indicam condições de seca nessas áreas em eventos La Niña e PDO negativo (Figura 11.11 b, d). Correlações negativas em áreas da AS entre DMI e anomalias de precipitação são consistentes com condições secas na fase positiva (Figura 11.11 c). Em março, existem correlações negativas em algumas áreas com DMI e AMO, e positivas com EN 3.4 e PDO no sul, mas apenas pequenas áreas com correlações significativas (Figura 11.12).

Figura 11.11 Correlações entre índices e anomalias de precipitação em SET (a) AMO, (b) El Niño 3.4, (c) DMI, (d) PDO. Os contornos indicam as áreas com nível de significância inferior a 0,1 (calculada utilizando a correlação).

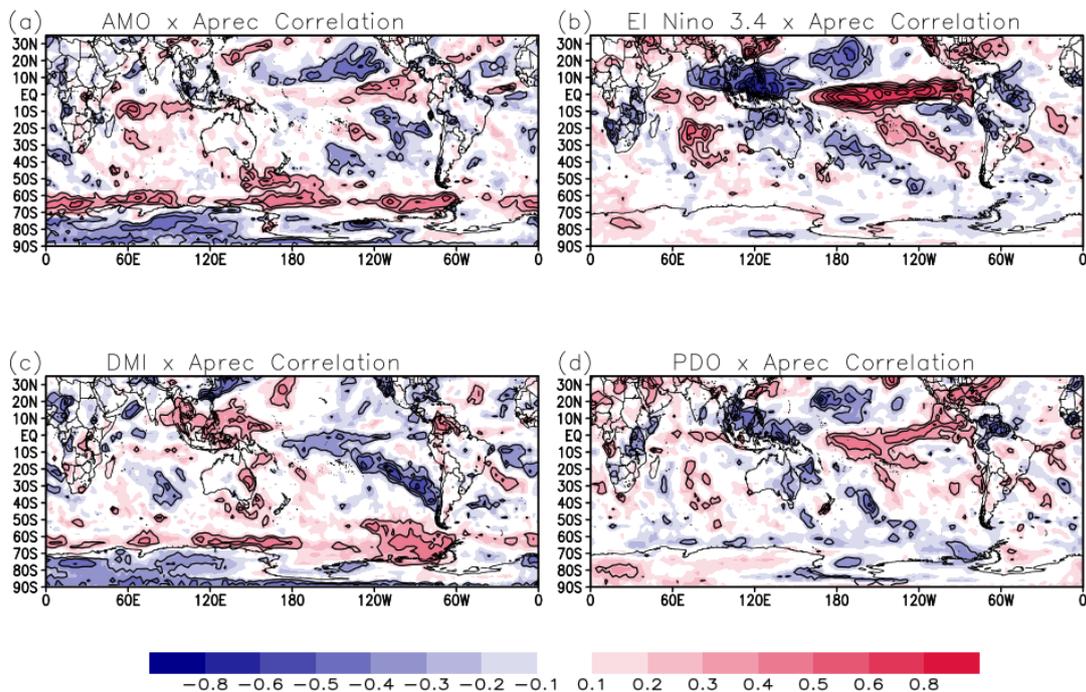
September



A ocorrência de um evento canônico La Niña no segundo semestre de 2020 (negativo EN_3.4 em setembro, 2020), que persistiu até o início de 2021 contribuiu para a continuidade da seca da AS, principalmente no sul do Brasil, ilustrada pelas anomalias de precipitação em setembro de 2020 (Figura 11.1f). A influência dos eventos ENOS no sul do Brasil foi discutida por Grimm et al. (2000), e vários estudos mostraram a relação entre a ocorrência canônica de La Niña e anomalias negativas de precipitação no Sul do Brasil (TEDESCHI et al., 2013). A típica anomalia de circulação ciclônica em altos níveis sobre o leste do Oceano Pacífico Tropical durante eventos La Niña é vista na Figura 11.4f. Esta anomalia induz o trem de ondas em direção ao sul da AS, que então se volta para o norte, estabelecendo uma circulação anticiclônica e anomalias geopotenciais positivas sobre as regiões onde há anomalias negativas de precipitação (Figuras 11.4f e 11.1f).

Figura 11.12 Correlações entre índices de precipitação em MAR (a) AMO, (b) El Niño 3.4, (c) DMI, (d) PDO. Os contornos indicam as áreas com nível de significância inferior a 0,1 (calculada utilizando a correlação).

March



12 CONCLUSÃO

Através da utilização de métodos estatísticos multivariados aplicados aos dados de SPI1, foram determinadas as áreas homogêneas quanto à variabilidade de precipitação na América do Sul em cada estação do ano, refletindo na caracterização das principais regiões climáticas do continente. Embora um número maior de regiões tenha sido identificado através das técnicas aplicadas, somente aquelas consideradas mais vulneráveis, tendo em vista seus aspectos socioeconômicos e ambientais, foram analisadas neste estudo. Desta forma, foram analisadas 3 áreas no verão (DJF) e 4 áreas nas demais estações do ano (MAM, JJA e SON).

A maior parte dos eventos de seca identificados durante o período analisado foram classificados como moderados, enquanto que os eventos mais intensos – classificados como severos e extremos – foram menos frequentes. Além disso, as secas foram mais recorrentes em áreas homogêneas localizadas sobre regiões tropicais, sendo as de maior severidade registradas no norte do continente, sobre o norte da Amazônia. Outro aspecto importante identificado neste trabalho, foi uma tendência de aumento nos últimos anos de casos de seca nas regiões tropicais da América do Sul, principalmente durante o inverno (JJA), embora no setor norte do continente o mesmo tenha sido verificado no verão (DJF). O observado pode indicar uma mudança no padrão de chuvas nos trópicos, (caracterizado pelo regime de monções, em que há um período chuvoso e outro seco, bem definidos), e que agora apresenta estações secas mais prolongadas ou ainda mais severas.

A análise dos compostos de anomalias permitiu concluir que os mecanismos associados às secas, em cada área homogênea, independem do período do ano, não diferem de estação para estação. Além disso, em todas as regiões identificou-se a influência de padrões tanto em escala regional como em grande escala, o que permite inferir que um conjunto de aspectos anômalos, de diferentes escalas, é responsável pela ocorrência de secas.

A fase positiva do ENOS é evidenciada como um dos padrões associados a episódios de seca sobre as regiões homogêneas localizadas no norte do

continente. O aquecimento anormal do Pacífico Tropical provoca alteração na Circulação de Walker, intensificando a subsidência no norte do continente, e inibindo a convecção. Tal configuração é coerente com os compostos de anomalias de ROL e omega, que demonstram tal influência de sinal oposto entre o Pacífico Leste e o Norte da AS. Além disso, as elevadas temperaturas observadas sobre o ATN também favorecem o deslocamento para norte da ZCIT, alterando a Circulação de Hadley no norte do continente. As anomalias positivas de temperatura sobre a região norte do continente estão associadas à inibição dos processos convectivos identificados nos compostos de ROL e também ao movimento vertical subsidente, que diminui a cobertura de nuvens e provoca maior aquecimento superficial. Em uma escala regional, observa-se que as anomalias positivas de divergência de umidade são um fator comum a todas as áreas homogêneas afetadas pelas secas, contribuindo para a estabilidade nas referidas regiões. Em especial sobre as áreas localizadas no centro do continente, a ocorrência das secas pode ser atribuída principalmente a este fator.

A configuração em altos níveis, identificada nos compostos de geopotencial e linhas de corrente, indicam uma relação entre as secas sobre as áreas homogêneas localizadas na bacia do Prata e SE do Brasil e a propagação de trens de ondas do Pacífico ao continente. O padrão identificado sugere a existência de um dipolo entre as áreas mencionadas, e que reflete a ocorrência de extremos opostos de chuva nas mesmas, simultaneamente, identificada nos compostos de precipitação. A influência desse fenômeno se dá através da advecção de vortacidade anticiclônica verificada em períodos secos devido à presença de anomalias positivas de geopotencial a oeste das áreas afetadas. Isso favorece movimentos subsidentes e a estabilidade, ou seja, redução ou ausência de chuva. O resfriamento anômalo do Atlântico Sudoeste especialmente no inverno (JJA), intensifica a ASAS e afeta o deslocamento de sistemas frontais, também contribuindo para a ocorrência de secas.

O modelo HadGEM3 reproduziu as configurações de anomalias de precipitação observadas nos compostos das secas e também as características regionais, como a pressão mais alta sobre as regiões extratropicais e a divergência de

umidade sobre as áreas das secas. Os aspectos de grande escala associados aos trens de onda sobre o Pacífico Sul e que demonstraram influência sobre algumas áreas em períodos secos também foi representada, ainda que algumas diferenças sutis no posicionamento dos centros anômalos de geopotencial tenham sido verificados. As anomalias de TSM foram consistentes com o observado nos compostos da área no norte da Amazônia, mas não foram bem reproduzidas nos compostos das outras áreas; destacou-se o aquecimento generalizado dos oceanos simulado pelo modelo no caso de A2 em DJF, que difere do verificado nos dados observacionais do ICOADS. A convecção associada à OMJ também não foi bem simulada nos compostos de algumas áreas.

As projeções futuras do mesmo modelo não demonstraram grandes diferenças em relação ao número de eventos de seca contabilizados, quando comparados aos identificados no presente. No entanto, é importante salientar que os casos foram identificados a partir do clima futuro, ou seja, considerando uma climatologia diferente da atual. A análise das climatologias para os dois períodos simulados pelo modelo, mostrou que o clima do futuro difere do período histórico, com aumento de temperatura sobre o continente e nos oceanos, e diferenças na climatologia de precipitação. Assim, as anomalias de precipitação utilizadas para a identificação das secas são referentes à climatologia de cada período. Além disso, o padrão espacial de anomalias de precipitação associadas a tais eventos não difere muito daquele verificado nas simulações do período histórico.

Os resultados apresentados neste trabalho contribuem com o entendimento dos aspectos de escala regional e grande escala, os quais foram identificados como atuando de forma simultânea, favorecendo a ocorrência de períodos secos em áreas da América do Sul. Além disso, também concluiu-se que não há fatores distintos atuando sobre cada região em cada período do ano, mesmo considerando a sazonalidade natural do clima nas diferentes áreas do continente.

Sugestões para estudos futuros incluem a utilização de mais membros do CMIP6 do período histórico e das projeções, para o cálculo de um conjunto na obtenção dos compostos, o que pode resultar em uma melhor discussão sobre os campos das projeções. Outro estudo é a análise dos índices multidecenais e suas influências nas secas, como foi feito no capítulo 11, para outras áreas e outros meses. Nesse sentido, o estudo também poderia ser realizado para outras regiões diferentes da América do Sul, bem como outras escalas de SPI podem ser utilizadas e calculadas, a fim de se examinar secas de natureza distinta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, R. et al. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly analysis (new version 2.3) and a review of 2017 global precipitation. **Atmosphere**, v. 9, n. 4, p. 138, 2018.

ALLEY, W. M. The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 23, n. 7, p. 1100-1109, 1984.

AP NEWS. **Drought depletes Paraguay River, a country's lifeline**. 2020. Disponível em: <https://apnews.com/article/droughts-caribbean-brazil-paraguay-latin-america-f7538b9e0d499a4d27961a2fae3f18ce>. Acesso em: 30 ago. 2021.

ARAGÃO, L. E. O. C.; JUNIOR, C. H. L. S.; ANDERSON, L. O. **Brazil's challenge to restrain deforestation and fires in the Amazon during COVID-19 pandemic in 2020: environmental, social implications and their governance**. São José dos Campos: INPE, 2020.

ARAÚJO, A. G. J.; TEIXEIRA, D. L. S.; GRILLO, L. M.; DA SILVA, L. T.; DE OLIVEIRA, G. S.; MONTEIRO, A. M. V.; PÁRRAGA, G. O. O.; SOUZA, M. T. Dinâmica hidrológica e mobilidade rural: considerações sobre o trânsito de bovinos no Pantanal Sul em anos de eventos hidrológicos extremos: a seca de 2010 e a inundação de 2014. **Raega – O Espaço Geográfico em Análise**, v. 46, n. 3, p. 140 – 154, 2019.

ARRAUT, J. M.; NOBRE, C.; BARBOSA, H. M. J.; OBREGON, G.; MARENGO, J. Aerial rivers and lakes: looking at large-scale moisture transport and its relation to Amazonia and to subtropical rainfall in South America. **Journal of Climate**, v. 25, n. 2, p. 543-556, 2012.

BALDWIN, M. P.; AYARZAGUENA, B.; BIRNER, T.; BUTCHART, B.; BUTLER, A. H.; CHARLTON-PEREZ, A. J.; DOMEISEN, D. I. V.; GARFINKEL, C. I.; GERBER, E. P.; HEGGLIN, M. I.; LANGEMATZ, U.; PEDATELLA, N.M. Sudden stratospheric warmings. **Reviews of Geophysics**, v. 59, n. 1, e2020RG000708, 2021.

BARRETO, N. J. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; MESQUITA, M. S.; PEDRA, G. U. Multivariate intraseasonal rainfall index applied to South America. **Meteorological Applications**, v. 26, n. 4, p. 521-527, 2019.

BARROS, V.; GONZALEZ, M.; LIEBMANN, B.; CAMILLONI, I. Influence of the South Atlantic convergence zone and South Atlantic Sea surface temperature on interannual summerrainfall variability in Southeastern South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 67, n. 3, p. 123-133, 2000.

BARROS, V. R.; BONINSEGNA, J. A.; CAMILLONI, I. A.; CHIDIAC, M.; MAGRÍN, G. O.; RUSTICUCCI, M. Climate change in Argentina: trends, projections, impacts and adaptation. **Climate Change**, v. 6, n. 2, p. 151-169, 2015.

BENITEZ, J. B.; DOMECCQ, R. M. Analysis of meteorological drought episodes in Paraguay. **Climatic Change**, v. 127, n. 1, p. 15-25, 2014.

BERT, F.; ESTRADA, M.; NAUMANN, G.; NEGRI, R.; PODESTÁ, G.; SKANSI, M. M.; SPENNEMANN, P.; QUESADA, P. **The 2017-18 drought in the Argentine Pampas: impacts on agriculture**. [S.l.]: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021.

BERRI, G. J.; BERTOSSA, G. I. The influence of the tropical and subtropical Atlantic and Pacific Oceans on precipitation variability over Southern Central South America on seasonal time scales. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 24, n. 4, p. 415-435, 2004.

BOLSA DE COMERCIO DE ROSARIO (BCR). **Río Paraná: la bajante más severa en los últimos 50 años representa un costo de US\$ 244 millones para el complejo agroexportador**. 2020. Disponible en: <https://bcr.com.ar/es/sobre-bcr/medios/noticias/rio-parana-la-bajante-mas-severa-en-los-ultimos-50-anos-representa-un>.

BORDI, I.; SUTERA, A. Fifty years of precipitation: some spatially remote teleconnections. **Water Resources Management**, v. 15, n. 4, p. 247-280, 2001.

BRANKOVIC, C.; PALMER, T. N.; FERRANTI, L. Predictability of seasonal atmospheric variations. **Journal of Climate**, v. 7, n. 2, p. 217-237, 1994.

BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 517-529, 2018.

BYUN, H. R.; WILHITE, D. A. Objective quantification of drought severity and duration. **Journal of Climate**, v. 12, n. 9, p. 2747-2756, 1999.

CAI, W.; MCPHADEN, M. J.; GRIMM, A. M.; RODRIGUES R. R.; TASCHETTO, A. S.; GARREAU, R. D.; DEWITTE, B.; POVEDA, G.; HAM, Y-G.; SANTOSO, A.; NG, B.; ANDERSON, W.; WANG, G.; GENG, T.; JO, H-S. J.; MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; OSMAN, M.; LI, S.; WU, L.; KARAMPERIDOU, C.; TAKAHASHI, K.; VERA, C. Climate impacts of the El Niño–southern oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 215-231, 2020.

CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T. Anticiclone subtropical do Atlântico Sul associado ao modo anular sul e impactos climáticos no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 605-613, 2020.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377-2394, 2002.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: persistence, intensity, form, extreme precipitation and relationships with intraseasonal activity. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88-108, 2004.

CARVALHO, L. M. V.; SILVA, A. E.; JONES, C.; LIEBMANN, B.; DIAS, P. L. S.; ROCHA, H. R. Moisture transport and intraseasonal variability in the South America monsoon system. **Climate Dynamics**, v. 36, n. 9, p. 1865-1880, 2011.

CARVALHO, L. M. V.; CAVALCANTI, I. F. A. The South American Monsoon System (SAMS). **The Monsoons and Climate Change**, p. 121-148, 2016.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Drought in Brazil during Summer and Fall 2001 and associated atmospheric circulation features. **Revista Climanálise**, v. 2, n. 01, 2004.

CAVALCANTI, I. F. A. Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: a review and case studies for the first decade of the 21st century. **Atmospheric Research**, v. 118, p. 27-40, 2012.

CAVALCANTI, I. F. A. Variabilidade interanual da precipitação no sudeste do Brasil no período 1985-2014 e configurações de extremos. **Revista Climanálise**, p. 13-18, 2014.

CAVALCANTI, I. F. C.; SILVEIRA, V. P. Changes in precipitation over the La Plata Basin, projected by CLARIS-LPB regional models. **Climate Research**, v. 68, n. 2/3, p. 169-182, 2016.

CAVALCANTI, I. F. A.; MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; COSTA, D. F. On the opposite relation between extreme precipitation over west Amazon and southeastern Brazil: observations and model simulations. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 9, p. 3606-3618, 2017.

CAVALCANTI, I. F. A.; BARRETO, N. J.; ALVAREZ, M. S.; OSMAN, M.; COELHO, C. A. S. Teleconnection patterns in the Southern Hemisphere represented by ECMWF and NCEP S2S project models and influences on South America precipitation. **Meteorological Applications**, v. 28, n. 4, e2011, 2021.

- CAVALCANTI, I. F.; SOUZA, D. C.; KUBOTA, P. Y.; COELHO, C. A.; FIGUEROA, S. N.; BAKER, J. C. The global monsoon system representation in BAM-v1. 2 and HadGEM3 climate simulations. **International Journal of Climatology**, v. 42, p. 8089-8111, 2022.
- CHAN, S. C.; BEHERA, S. K.; YAMAGATA, T. Indian Ocean dipole influence on South American rainfall. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 14, 2008.
- CHANG, T. J. Effect of drought on stream flow characteristics. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 116, n. 3, p. 332-341, 1990.
- CHAVES, R. R. Padrões da temperatura da superfície do Oceano Atlântico Norte e a convecção de verão sobre a América do Sul: análise observacional. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, p. 27-38, 2005.
- CHAVES, R. R. Associação entre a TSM do Atlântico Norte e convecção de verão sobre a América do Sul: simulações numéricas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 243-250, 2006.
- CHAVES, R. R. Conexões entre a TSM do Atlântico Sul e a convecção de verão sobre a América do Sul: análise observacional. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, p. 5-20, 2011.
- CHAVES, R. R.; AMBRIZZI, T. Atmospheric response for two convection schemes in sensitivity experiments using SST anomalies over the South Atlantic Ocean. **Clivar Newsletter Exchanges**, v. 33, p. 25-27, 2005.
- CHAVES, R. R.; NOBRE, P. Interactions between sea surface temperature over the South Atlantic Ocean and the South Atlantic Convergence Zone. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 3, 2004.
- CHENG, X.; WALLACE, J. M. Cluster analysis of the Northern Hemisphere wintertime 500-hPa height field: spatial patterns. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 50, n. 16, p. 2674-2696, 1993.
- COELHO, C. A. S.; GODDARD, L. El Niño: induced tropical droughts in climate change projections. **Journal of Climate**, v. 22, n. 23, p. 6456-6476, 2009.
- COELHO, C. A. S.; CAVALCANTI, I. F. A.; COSTA, S. M.; FREITAS, S. R.; ITO, E. R.; LUZ, G.; SANTOS, A. F.; NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; PEZZA, A. B. Climate diagnostics of three major drought events in the Amazon and illustrations of their seasonal precipitation predictions. **Meteorological Applications**, v. 19, n. 2, p. 237-255, 2012.
- COELHO, C. A. S.; OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. S.; DUTRA, L. M. M.; ROCHA, R. P. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11-12, p. 3737-3752, 2016.

COELHO, C. A. S.; SOUZA, D. C.; KUBOTA, P. Y.; CAVALCANTI, I. F. A.; BACKER, J. C. A.; Assessing the representation of South American monsoon features in Brazil and UK climate model simulations. **Climate Resilience and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. e27, 2022.

COLEMAN, J. S. M; ROGERS, J. C. A synoptic climatology of the central United States and associations with Pacific teleconnection pattern frequency. **Journal of Climate**, v. 20, n. 14, p. 3485-3497, 2007.

COMPAGNUCCI, R. H.; ARANEO, D.; CANZIANI, P. O. Principal sequence pattern analysis: a new approach to classifying the evolution of atmospheric systems. **International Journal of Climatology**, v. 21, n. 2, p. 197-217, 2001.

COPERNICUS. **ERA-5 monthly averaged data on pressure levels from 1979 to present**. 2019. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels-monthly-means?tab=overview>. Acesso em: 30 jul. 2019.

CUNHA, A. P.M. A.; ZERI, M.; LEAL, K. D.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; GARCIA, J. V. C.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; RIBEIRO-NETO, G. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, p. 642, 2019.

CUNHA, R. L. A. **Definição de cenários de referência para avaliação dos impactos das secas**. 2008. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

CUNNINGHAM, C. A. C.; CAVALCANTI, I. F. A. Intraseasonal modes of variability affecting the South Atlantic Convergence Zone. **International Journal of Climatology**, v. 26, n. 9, p. 1165-1180, 2006.

DAI, A.; TRENBERTH, K. E.; QIAN, T. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. **Journal of Hydrometeorology**, v. 5, n. 6, p. 1117-1130, 2004.

DAMBERG, L.; AGHAKOUCHAK, A. Global trends and patterns of drought from space. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 117, n. 3, p. 441-448, 2014.

DE SOUZA, C. A.; REBOITA, M. S. Ferramenta para o monitoramento dos padrões de teleconexão na América do Sul. **Terræ Didática**, v. 17, e021009-e021009, 2021.

DE SOUZA, E. B.; AMBRIZZI, T. Modulation of the intraseasonal rainfall over tropical Brazil by the Madden–Julian oscillation. **International Journal of Climatology**, v. 26, n. 13, p. 1759-1776, 2006.

DENI, S. M.; JEMAIN, A. A. Mixed log series geometric distribution for sequences of dry days. **Atmospheric Research**, v. 92, n. 2, p. 236-243, 2009.

DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. D.; MECHOSO, C. R. Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Climate**, v. 11, n. 2, p. 251-271, 1998.

DUFFY, P. B.; BRANDO, P.; ASNER, G. P.; FIELD, C. B. Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 43, p. 13172-13177, 2015.

EDWARDS, D. C.; MCKEE, T. B. **Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales**. 1997. 155f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Universidade do Estado do Colorado, Fort Collins, 1997.

ELSNER, J. B. Tracking hurricanes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 84, n. 3, p. 353-356, 2003.

ELTAHIR, E. A. B. Drought frequency analysis in annual rainfall series in central and western Sudan. **Hydrological Sciences Journal**, v. 37, n. 3, p. 185-199, 1992.

ERFANIAN, A.; WANG, G.; FOMENKO, L. Unprecedented drought over tropical South America in 2016: significantly under-predicted by tropical SST. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2017.

EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G. A.; SENIOR, C. A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R. J.; TAYLOR, K. E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, LLNL-JRNL-736881, 2016.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; AMORIM, A. D. O.; CARDOSO, A. **Índices para a quantificação da seca**. [S.l]: Embrapa Arroz e Feijão, 2009.

FIGUEROA, S. N.; SATYAMURTY, P.; DA SILVA DIAS, P. L. Simulations of the summer circulation over the South American region with an eta coordinate model. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 10, p. 1573-1584, 1995.

FOLEY, J. C. Drought in Australia. **Bureau of Meteorology Bulletin**, n. 43, p. 281, 1957.

GARCÍA-FRANCO, J. L.; GRAY, L. J.; OSPREY, S. The American monsoon system in HadGEM3. 0 and UKESM1 CMIP6 simulations. **Weather and Climate Dynamics Discussions**, v. 2020, p. 1-33, 2020.

GHIL, M.; MO, K. Intraseasonal oscillations in the global atmosphere. Part II: Southern Hemisphere. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 48, n. 5, p. 780-790, 1991.

GIBBS, W. J. **Drought: its definition, delineation and effects.** [S.l]: WMO,1975.

GIBBS, W. J.; MAHER, J. V. **Rainfall deciles as drought indicators.** Australia: Bureau of Meteorology, 1967.

GIDDEN, M.; RIAHI, K.; SMITH, S.; FUJIMORI, S.; LUDERER, G.; KRIEGLER, E.; VAN VUUREN, D.P.; VAN DEN BERG, M.; FENG, L.; KLEIN, D.; CALVIN, K.; DOELMAN, J. C.; FRANK, S.; FRICKO, O.; HARMSSEN, M.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HILAIRE, J.; HOESLY, R.; HORING, J.; POPP, A.; STEHFEST, E.; TAKAHASHI, K. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 12, n. 4, p. 1443-1475, 2019.

GILLETT, N. P.; KELL, T. D.; JONES, P. D. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. L23704, 2006.

GEIRINHAS, J. L.; RUSSO, A.; LIBONATI, R.; SOUSA, P. M.; MIRALLES, D. G.; TRIGO, R. M. Recent increasing frequency of compound summer drought and heatwaves in Southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 3, e 034036, 2021.

GONG, X.; RICHMAN, M. B. On the application of cluster analysis to growing season precipitation data in North America east of the Rockies. **Journal of Climate**, v. 8, n. 4, p. 897-931, 1995.

GONZALEZ, P. L. M.; VERA, C. S. Summer precipitation variability over South America on long and short intraseasonal timescales. **Climate Dynamics**, v. 43, n. 7, p. 1993-2007, 2014.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 35-58, 2000.

GRIMM, A. M. Variabilidade interanual do clima no Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Ed.) **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 353-374.

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. ENSO and extreme rainfall events in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 7, p. 1589-1609, 2009.

GRIMM, A. M.; ZILLI, M. T. Interannual variability and seasonal evolution of summer monsoon rainfall in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 9, p. 2257-2275, 2009.

GRIMM, A. M.; ALMEIDA, A. S.; BENETI, C. A. A.; LEITE, E. A. The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, 2020.

HAYES, M. J.; SVOBODA, M. D.; WILHITE, D. A.; VANYARKHO, O. V. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, n. 3, p. 429-438, 1999.

HAYES, M.; SVOBODA, M.; WALL, N.; WIDHALM, M. The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 92, n. 4, p. 485-488, 2011.

HASTENRATH, S.; KUTZBACH, J. Late Pleistocene climate and water budget of the South American Altiplano. **Quaternary Research**, v. 24, n. 3, p. 249-256, 1985.

HASTENRATH, S. Circulation and teleconnection mechanisms of Northeast Brazil droughts. **Progress in Oceanography**, v. 70, n. 2-4, p. 407-415, 2006.

HOSKINS, B. J.; KAROLY, D. J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 38, n. 6, p. 1179-1196, 1981.

HERDIES, D. L.; DA SILVA, A.; DIAS, M. A. F. S.; FERREIRA, R. N. Moisture budget of the bimodal pattern of the summer circulation over South America. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. D20, p. 42-10, 2002.

HUNG, M-P.; LIN, J-L.; WANG, W.; KIM, D.; SHINODA, T.; WEAVER, S. J. MJO and convectively coupled equatorial waves simulated by CMIP5 climate models. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6185-6214, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA (INA). **Alerta hidrológico Cuenca del Plata: informes mensuales emitidos**. 2020. Disponível em: <https://www.ina.gov.ar/alerta/index.php?seccion=2&year=2020>. Acesso em: 20 ago. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS(INPE). **Monitoramento dos focos ativos por países**. 2020. Disponível em: https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_paises.

IRVING, D.; SIMMONDS, I. A new method for identifying the Pacific–South American pattern and its influence on regional climate variability. **Journal of Climate**, v. 29, n. 17, p. 6109-6125, 2016.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. et al. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2016.

JUNQUAS, C.; VERA, C.; LI, L.; LE TREUT, H. Summer precipitation variability over Southeastern South America in a global warming scenario. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9-10, p. 1867-1883, 2012.

KAHYA, E.; DEMIREL, M. C.; BEG, O. A. Hydrologic homogeneous regions using monthly streamflow in Turkey. **Earth Sciences Research Journal**, v. 12, n. 2, p. 181-193, 2008(a).

KALKSTEIN, L. S.; TAN, G.; SKINDLOV, J. A. An evaluation of three clustering procedures for use in synoptic climatological classification. **Journal of climate and Applied Meteorology**, v. 26, n. 6, p. 717-730, 1987.

KALNAY, E.; MO, K. C.; PAEGLE, J. Large-amplitude, short-scale stationary Rossby waves in the Southern Hemisphere: observations and mechanistic experiments to determine their origin. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 43, n. 3, p. 252-275, 1986.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F. El Niño–southern oscillation related teleconnections over South America under distinct Atlantic multidecadal oscillation and Pacific Interdecadal oscillation backgrounds: La Niña. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 3, p. 1359-1372, 2019.

KEYANTASH, J.; DRACUP, J. A. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 8, p. 1167-1180, 2002.

KEYANTASH, J. et al. **The climate data guide: Standardized Precipitation Index (SPI)**. 2018. Disponível em: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi>. Acesso em 30 ago. 2019.

KIDSON, J. W. Interannual variations in the Southern Hemisphere circulation. **Journal of Climate**, v. 1, n. 12, p. 1177-1198, 1988.

KIM, D. W.; BYUN, H. R.; CHOI, K. S. Evaluation, modification, and application of the effective drought index to 200-year drought climatology of Seoul, Korea. **Journal of Hydrology**, v. 378, n. 1/2, p. 1-12, 2009.

KINNINMONTH, W. R.; VOICE, M. E.; BEARD, G. S.; DE HOEDT, G. C.; MULLEN, C. E. Australian climate services for drought management. In: WILHITE, D. A (Ed.), **Drought: a global assessment**. New York: Donald A. Wilhite, 2000. p. 210-222.

LEE, H-T et al. **NOAA Climate Data Record (CDR) of monthly Outgoing Longwave Radiation (OLR), version 2.7**. NOAA National Centers for Environmental Information, 2018. Disponível em: <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C01561>. Acesso em: 11 jul. 2019.

LI, W.; FU, R.; DICKINSON, R. E. Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 111, n. D2, 2006.

LI, X.; HOLLAND, D. M.; GERBER, E. P.; YOO, C. Rossby waves mediate impacts of tropical oceans on West Antarctic atmospheric circulation in austral winter. **Journal of Climate**, v. 28, n. 20, p. 8151-8164, 2015.

LIBONATI, R.; GEIRINHAS, J. L.; SILVA, P. S.; RUSSO, A.; RODRIGUES, J. A.; BELÉM, L. B.; NOGUEIRA, J.; ROQUE, F. O.; DACAMARA, C. C.; NUNES, A. M. B.; MARENGO, J. A.; TRIGO, R. M. Accessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. **Environmental Research Letters**, v. 17, n.1, e 015005, 2022.

LIEBMANN, B.; MARENGO, J. A. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 14, n. 22, p. 4308-4318, 2001.

LIM, E-P.; HENDON, H. H.; BOSCHAT, G.; HUDSON, D.; THOMPSON, D. W. J.; DOWDY, A. J.; ARBLASTER, J. M. Australian hot and dry extremes induced by weakenings of the stratospheric polar vortex. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 11, p. 896-901, 2019.

LIM, E-P.; HENDON, H. H.; BUTLER, A. H.; THOMPSON, D. W. J.; LAWRENCE, Z. D.; SCAIFE, A. A.; SHEPHERD, T. G.; POLICHTCHOUK, I.; NAKAMURA, H.; KOBAYASHI, C.; COMER, R.; COY, L.; DOWDY, A.; GARREAUD, R. D.; NEWMAN, P. A.; WANG, G. The 2019 Southern hemisphere stratospheric polar vortex weakening and its impacts. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 102, n. 6, p. E1150-E1171, 2021.

LING, J.; ZHANG, C.; WANG, S.; LI, C. A new interpretation of the ability of global models to simulate the MJO. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 11, p. 5798-5806, 2017.

LYON, B. The strength of El Niño and the spatial extent of tropical drought. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 21, 2004.

MÄCHEL, H.; KAPALA, A.; FLOHN, H. Behaviour of the centres of action above the Atlantic since 1881. Part I: characteristics of seasonal and interannual variability. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 18, n. 1, p. 1-22, 1998.

MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 29, n. 6, p. 1109-1123, 1972.

MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Observations of the 40–50-day tropical oscillation: a review. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 5, p. 814-837, 1994.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESCA (MAGyP). **Informe de sequía**. 2020. Disponível em: https://www.magyp.gov.ar/sitio/areas/d_eda/sequia/_archivos//000000_Informes/200900_2020_09_SEQUIA.pdf.

MALHI, Y.; ROBERTS, J. T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 5860, p. 169-172, 2008.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP–NCAR reanalyses: characteristics and temporal variability. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, p. 2261-2280, 2004.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Clima da região Amazônica. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 198-212.

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA, V.; SILVA DIAS, P. L.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, L. M. V.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; NOGUES-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L. M. Recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 1-21, 2012.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A.; CAMARGO, H.; RIVEROS, M. P.; PABLÓ, A. D. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 26, n. 22, pág. 9137-9154, 2013.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGÓN G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31-44, 2015.

MARENGO, J. A. O.; A. P. CUNHA; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanalise**, v. 3, p. 49-54, 2016.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3, p. 1189-1200, 2017.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; CUARTAS, L. A.; LEAL, K. R. D.; BROEDEL, E.; SELUCHI, M. E.; MICHELIN, C. M.; BAIÃO, C. F. P.; ANGULO, E. C.; ALMEIDA, E. K.; KAZMIERCZAK, M. L.; MATEUS, N. P. A.; SILVA, R. C.; BENDER, F. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. **Frontiers in Water**, v. 3, e. 639204, 2021.

MARTINEZ, J. A.; DOMINGUEZ, F. Sources of atmospheric moisture for the La Plata River basin. **Journal of Climate**, v. 27, n. 17, p. 6737-6753, 2014.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8. 1993, Boston. **Proceedings...** Boston: American Meteorological Society, 1993. p. 179-184.

MET OFFICE. **HadGEM3 family**. 2019. Disponível em: <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadgem3>. Acesso em: 30 ago. 2019.

MISHRA, A. K.; DESAI, V. R.; SINGH, V. P. Drought forecasting using a hybrid stochastic and neural network model. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 6, p. 626-638, 2007.

MISHRA, A. K.; DESAI, V. R. Drought forecasting using stochastic models. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 19, n. 5, p. 326-339, 2005a.

MISHRA, A. K.; DESAI, V. R. Spatial and temporal drought analysis in the Kansabati river basin, India, **International Journal of River Basin Management**, v. 3, n. 1, p. 31-41, 2005b.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1-2, p. 202-216, 2010.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P.; DESAI, V. R. Drought characterization: a probabilistic approach. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 23, n. 1, p. 41-55, 2009.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. Analysis of drought severity- area- frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D6, 2009.

MISHRA, P.; PANDEY, C. C.; SINGH, U.; GUPTA, A.; SAHU, C.; KESHRI, A. Descriptive statistics and normality tests for statistical data. **Annals of Cardiac Anaesthesia**, v. 22, n. 1, p. 67, 2019.

MO, K.; GHIL, M. Cluster analysis of multiple planetary flow regimes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 93, n. D9, p. 10927-10952, 1988.

MO, K. C.; HIGGINS, R. W. The Pacific–South American modes and tropical convection during the Southern Hemisphere winter. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 6, p. 1581-1596, 1998.

MO, K. C.; BERBERY, E. H. Drought and persistent wet spells over South America based on observations and the US CLIVAR drought experiments. **Journal of Climate**, v. 24, n. 6, p. 1801-1820, 2011.

MO, K. C.; PAEGLE, J. N. The Pacific–South American modes and their downstream effects. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 21, n. 10, p. 1211-1229, 2001.

NASA Earth Observatory. **Severe drought in South America**. 2020a. Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/images/147480/severe-drought-in-southamerica>. Acesso em: 13 ago. 2021.

NASA Earth Observatory. **Fires Char the Pantanal**. 2020b. Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/images/147269/fires-char-the-pantanal>. Acesso em: 13 ago. 2021.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) v5**. 2019 Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/marineocean-data/extended-reconstructed-sea-surface-temperature-ersst-v5>. Acesso em: 10 jul. 2019.

NAUMANN, G.; PODESTA, G.; MARENGO, J.; LUTERBACHER, J.; BAVERA, D.; ARIAS MUÑOZ, C.; BARBOSA, P.; CAMMALLERI, C.; CHAMORRO, L.; CUARTAS, A.; DE JAGER, A.; ESCOBAR, C.; HIDALGO, C.; LEAL DE MORAES, O.; MCCORMICK N.; MAETENS, W.; MAGNI, D.; MASANTE, D.; MAZZESCHI, M.; SELUCHI, M.; SKANSI, M. M.; SPINONI, J.; TORETTI, A. **The 2019-2021 extreme drought episode in La Plata Basin**. Luxembourg: European Union, 2021 Doi:10.2760/773,JRC126508. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/rep/8JMKD3MGP3W34P/43JFFHL>. Acesso em: 21 jul. 2022.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, n. 10, p. 2464-2479, 1996.

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, L. A.; ALVES, L. M. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 2, p. 252, 2016.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 22-27, 2007.

NURY, A. H.; HASAN, K. Analysis of drought in northwestern Bangladesh using standardized precipitation index and its relation to Southern oscillation index. **Environmental Engineering Research**, v. 21, n. 1, p. 58-68, 2015.

O'NEIL, B. C.; TEBALDI, C.; VUUREN, D. P. V.; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; KNUTTI, R.; KRIEGLER, E.; LAMARQUE, J-F.; LOWE, J.; MEEHL, G. A. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461-3482, 2016.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Drought and agriculture**. Geneva, Switzerland: WMO, 1975.

PALMER, W. C. **Meteorological drought**. Washington: Weather Bureau, 1965.

PENALBA, O. C.; RIVERA, J. A. Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America: emphasis in regional drought occurrences. **Advances in Geosciences**, v. 42, p. 1-14, 2016.

PIRES, V. **Frequência e intensidade de fenômenos meteorológicos extremos associados a precipitação**. 2003. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2003.

PORTELA, M. M.; SANTOS, J. F.; SILVA, A. T.; BENITEZ, J. B. REICHERT, J. M. Drought analysis in southern Paraguay, Brazil and northern Argentina: regionalization, occurrence rate and rainfall thresholds. **Hydrology Research**, v. 46, n. 5, p. 792-810, 2015.

RABIER, F.; JÄRVINEN, H.; KLINKER, E.; MAHFOUF, J. F.; SIMMONS, A. The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation I: experimental results with simplified physics. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 126, n. 564, p. 1143-1170, 2000.

RAO, J.; GARFINKEL, C. I.; WHITE, I. P.; SCHWARTZ, C. The Southern Hemisphere minor sudden stratospheric warming in September 2019 and its predictions in S2S models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 14, e2020JD032723, 2020.

RASMUSSEN, E. M.; WALLACE, J. M. Meteorological aspects of the El Niño/southern oscillation. **Science**, v. 222, n. 4629, p. 1195-1202, 1983.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. Relationship between the southern annular mode and southern hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 48-55, 2009.

REBOITA, M. S.; SANTOS, I. Influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no norte e nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, 2015.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; SILVA, B. A.; PINHEIRO, R. F.; ROCHA, R. P. The South Atlantic subtropical anticyclone: present and future climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, p. 8, 2019.

REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T.; GOUVEIA, C. D. Trend and teleconnection patterns in the climatology of extratropical cyclones over the Southern Hemisphere. **Climate Dynamics**, v. 45, n. 7, p. 1929-1944, 2015.

RIAHI, K.; VAN VUUREN, D. P.; KREGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEIL, B. C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CUARESMA, J. C.; KC, S.; LEIMBACH, M.; JIANG, L.; KRAM, T.; RAO, S.; EMMERLING, J.; EBI, K.; KASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HUMPENÖDER, F.; DA SILVA, L. A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; BOSETTI, V.; EOM, J.; GERNAAT, D.; MASUI, T.; ROGELJ, J.; STREFLER, J.; DROUET, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BAUMSTARK, L.; DOELMAN, J. C.; KAINUMA, M.; KLIMONT, Z.; MARANGONI, G.; LOTZE-CAMPEN, H.; OBERSTEINER, M.; TABEAU, A.; TAVONI, M. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153-168, 2017.

RICHMAN, M. B.; LAMB, P. J. Climatic pattern analysis of three-and seven-day summer rainfall in the central United States: some methodological considerations and a regionalization. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 24, n. 12, p. 1325-1343, 1985.

RIVERA, J.; PENALBA, O. Trends and spatial patterns of drought affected area in Southern South America. **Climate**, v. 2, n. 4, p. 264-278, 2014.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). **Monthly Weather Review**, v. 114, n. 12, p. 2352-2362, 1986.

ROSA, E. B.; PEZZI, L. P.; QUADRO, M. F. L.; BRUNSELL, N. Automated detection algorithm for SACZ, oceanic SACZ, and their climatological features. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, p. 18, 2020.

ROSSO, F. V.; BOIASKI, N. T.; FERRAZ, S. E. T.; ROBLES, T. C. Influence of the Antarctic oscillation on the South Atlantic convergence Zone. **Atmosphere**, v. 9, n. 11, p. 431, 2018.

SAJI, N. H.; AMBRIZZI, T.; FERRAZ, S. E. T. Indian Ocean Dipole mode events and austral surface air temperature anomalies. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 39, n. 1-2, p. 87-101, 2005.

SANTOS, M. A. Regional droughts: a stochastic characterization. **Journal of Hidrology**, v. 66, p. 183-211, 1983.

SANTOS, J. F.; PULIDO- CALVO, I.; PORTELA, M. M. Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. **Water Resources Research**, v. 46, n. 3, p. 1-13, 2010.

SCHUBERT, S. D.; SUAREZ, M. J.; PEGION, P. J.; KOSTER, R. D.; BACMEISTER, J. T. Causes of long-term drought in the US Great Plains. **Journal of Climate**, v. 17, n. 3, p. 485-503, 2004.

SEAGER, R.; HOERLING, M. Atmosphere and ocean origins of North American droughts. **Journal of Climate**, v. 27, n. 12, p. 4581-4606, 2014.

SETH, A.; FERNANDES, K.; CAMARGO, S. J. Two summers of São Paulo drought: origins in the western tropical Pacific. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 24, p. 10-816, 2015.

SGROI, L. C.; LOVINO, M. A.; BERBERY, E. H.; MÜLLER, G. V. Characteristics of droughts in Argentina's core crop region. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 5, p. 2475-2490, 2021.

SHEN, X.; WANG, L.; OSPREY, S. Tropospheric forcing of the 2019 Antarctic sudden stratospheric warming. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 20, e2020GL089343, 2020.

SILVA, G. A. M.; AMBRIZZI, T.; MARENGO, J. A. Observational evidences on the modulation of the South American Low Level Jet east of the Andes according the ENSO variability. **Annales Geophysicae**, p. 645-657, 2009.

SILVA, A.; SANTO, F.; PIRES, V. **A seca em Portugal: prevenção, monitorização e mitigação**. 2005. Disponível em: <<http://panda.igeo.pt/pancd/pdfs/seca2005/FatimaEspiritoSanto.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2019.

SILVESTRI, G. E.; VERA, C. S. Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 21, 2003.

SINCLAIR, M. R.; RENWICK, J. A.; KIDSON, J. W. Low-frequency variability of Southern Hemisphere sea level pressure and weather system activity. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 10, p. 2531-2543, 1997.

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (SMN). **Reporte – Estado del clima em Argentina 2020**. 2021. SMN y Ministerio de Defensa de Argentina. Disponível em: <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1559>. Acesso em 02 ago. 2021.

SERVICIO NACIONAL DE MANEJO DEL FUEGO (SNMF). **Reporte de incêndios**. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Argentina, 2020. Disponível em: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/31-dic-report_e_incendios_.pdf. Acesso em: 29 jul. 2021.

SLINGO, J. M.; SPERBER, K. R.; BOYLE, J. S.; CERON, J-P.; DIZ, M.; DUGAS, B.; EBISUZAKI, W.; FYFE, J.; GREGORY, D.; GUEREMY, J-F.; HACK, J.; HARZALLAH, A.; INNES, P.; KITO, A.; LAU, W. K-M.; MCAVANEY, B.; MADDEN, R.; MATTHEWS, A.; PALMER, T. N.; PARK, C-K.; RANDALL, D.; RENNO, N. Intraseasonal oscillations in 15 atmospheric general circulation models: Results from an AMIP diagnostic subproject. **Climate Dynamics**, v. 12, n. 5, p. 325-357, 1996.

SPERBER, K. R.; SLINGO, J. M.; INNESS, P. M.; LAU, W. K-M. On the maintenance and initiation of the intraseasonal oscillation in the NCEP/NCAR reanalysis and in the GLA and UKMO AMIP simulations. **Climate Dynamics**, v. 13, n. 11, p. 769-795, 1997.

SPINONI, J.; NAUMANN, G.; CARRAO, H.; BARBOSA, P.; VOGT, J. World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 8, p. 2792-2804, 2014.

STEINEMANN, A. C. HAYES, M. J.; CAVALCANTI, L. Drought indicators and triggers. In: WILHITE, D. A. (Ed.). **Drought and water crises: science, technology, and management issues**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p. 71-92.

TASCHETTO, A. S.; WAINER, I. The impact of the subtropical South Atlantic SST on South American precipitation. **Annales Geophysicae**, p. 3457-3476, 2008.

TEDESCHI, R. G.; CAVALCANTI, I. F. A.; GRIMM, A. M. Influences of two types of ENSO on South American precipitation. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 6, p. 1382-1400, 2013.

THOMPSON, D. W. J.; WALLACE, J. M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability. **Journal of Climate**, v. 13, n. 5, p. 1000-1016, 2000.

THOMPSON, D. W. J.; WALLACE, J. M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n. 9, p. 1297-1300, 1998.

TRENBERTH, K. E.; CARON, J. M. The Southern Oscillation revisited: sea level pressures, surface temperatures, and precipitation. **Journal of Climate**, v. 13, n. 24, p. 4358-4365, 2000.

UVO, C. B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation. **Journal of Climate**, v. 11, n. 4, p. 551-562, 1998.

VAN GARDEREN, L.; MINDLIN, J. A storyline attribution of the 2011/2012 drought in Southeastern South America. **Weather**, 2022.

VAN ROOY, M. P. A rainfall anomaly index independent of time and space. **Notos**, v. 14, n. 43, p. 6, 1965.

VASCONCELLOS, F. C.; CAVALCANTI, I. F. A. Extreme precipitation over Southeastern Brazil in the austral summer and relations with the Southern Hemisphere annular mode. **Atmospheric Science Letters**, v. 11, n. 1, p. 21-26, 2010.

VASCONSELLOS, F. C. **A oscilação Antártica: mecanismos físicos e a relação com características atmosféricas sobre a América do Sul/oceanos adjacentes**. 2012. 195f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

VASCONCELLOS, F. C.; SOUZA, J. N. The anomalous wet 2020 southeast Brazil austral summer: characterization and possible mechanisms. **Atmosfera**, v. 35, n. 1, p. 27-38, 2022.

VERA, C. S.; ALVAREZ, M. S.; GONZALES, P. L. A.; LIEBMANN, B.; KILADIS, G. N. Seasonal cycle of precipitation variability in South America on intraseasonal timescales. **Climate Dynamics**, v. 51, n. 5, p. 1991-2001, 2018.

WALKER, G. T.; BLISS, E. Word weather. **V. Memoirs of the Royal Meteorological Society**, v. 4, p. 53-84, 1932.

WANDERS, N.; VAN LANEN, H. A. J.; VAN LOON, A. F. **Indicators for drought characterization on a global scale**. [S.l.]: Wageningen Universiteit, 2010.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. **Water International**, v. 10, n. 3, p. 111-120, 1985.

WILHITE, D. A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In: _____ (Ed.). **Drought: a global assessment**. New York: Donald A. Wilhite, U2000. p. 3-18.

WILHITE, D. A.; SVOBODA, M. D. Drought early warning systems in the context of drought preparedness and mitigation. In: SIVAKUMAR, M. V. K.; WOOD, D. A. (Ed.). **Early warning systems for drought preparedness and drought management**. [S.l.]: WMO, 2000. p.1-21.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2.ed. San Diego, USA: Academic Press, 2011. 669p.

ZENG, N.; YOON, J-H.; MARENGO, J. A.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C. A.; MARIOTTI, A.; NEELIN, J. D. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. **Environmental Research Letters**, v. 3, n. 1, e 014002, 2008.

ZHANG, C.; DONG, M.; GUALDI, S.; HENDON, H. H.; MALONEY, E. D.; MARSHALL, A.; SPERBER, K. R.; WANG, W. Simulations of the Madden–Julian oscillation in four pairs of coupled and uncoupled global models. **Climate Dynamics**, v. 27, n. 6, p. 573-592, 2006.

ZOU, Y.; MACAU, E. E. N.; SAMPAIO, G.; RAMOS, A. M. T.; KURTHS, J. Do the recent severe droughts in the Amazonia have the same period of length?. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 9, p. 3279-3285, 2016.

YANG, M.; ZHANG, G. J.; SUN, D-Z. Precipitation and moisture in four leading CMIP5 models: biases across large-scale circulation regimes and their attribution to dynamic and thermodynamic factors. **Journal of Climate**, v. 31, n. 13, p. 5089-5106, 2018.

ANEXO A - 2019/2020 DROUGHT IMPACTS ON SOUTH AMERICA AND ATMOSPHERIC AND OCEANIC INFLUENCES

O estudo que dá nome a este anexo, é o Capítulo 11 desta tese, e foi publicado na revista *Weather and Climate Extremes*, em 2021.

Resumo: The 2019/2020 drought in South America caused many impacts on several sectors, as agriculture, water resources, and environment, which are reported here. Besides, there is a discussion about anomalies in the atmosphere and ocean during the analyzed period. In a regional scale, there was a reduction of humidity flux over the continent, and in a large scale, the occurrence of different processes could have contributed to the dry conditions. There was a persistent pattern of west-east convection anomalies in the tropical Pacific, and a reduction of kinetic energy in the atmosphere over the South Pacific that could be related to the steady conditions observed over South America and southeast South Atlantic from September 2019 to March 2020. The extreme positive phase of the Indian Ocean Dipole during 2019 austral spring was another event that could have influenced temperature and precipitation in South America through a wavetrain from the Indian Ocean to the South American continent. The Sudden Stratospheric Warming that occurred in September 2019 induced the negative phase of the Southern Annular Mode in December, which generated subsidence over the subtropics and affected the precipitation over South America. In addition, from September 2019 to March 2020, the heating observed in the stratosphere propagated to the troposphere over South America. Ocean indices from 1982 to 2020 are analyzed in the context of dry conditions in the continent and it was observed the relations with AMO, PDO, IOD and El Niño 3.4. From September 2019 to March 2020, there were positive SST anomalies in all oceans, mainly in the North Atlantic Ocean, which could have contributed also to subsidence over South America through a meridional circulation, as seen in other cases. At the end of the studied period, the development of La Niña extended the situation of reduced precipitation in South Brazil.

Referência: GOMES, M. S.; CAVALCANTI, I. F. A.; MÜLLER, G. V. 2019/2020 drought impacts on South America and atmospheric and oceanic influences. **Weather and Climate Extremes**, v. 34, p. 100404, 2021.

ANEXO B – DROUGHTS HOMOGENEOUS AREAS OF SOUTH AMERICA AND ASSOCIATED PROCESSES DURING MONTHS OF AUSTRAL SUMMER AND SPRING

Neste anexo é mostrado o resumo do paper submetido recentemente a revista *Advances in Atmospheric Sciences*, e que trata-se da parte dos resultados observacionais (referentes ao verão e primavera) obtidos na tese de Doutorado.

Resumo: Droughts in areas within homogeneous regions of South America during months of austral summer (DJF) and austral spring (SON) are identified during 1982-2019 period using SPI, and classified in three categories: moderate, severe and extreme. In DJF there are three homogeneous areas and in SON there are four homogeneous areas. Areas in Amazon had the majority of droughts in El Niño years, while droughts in other areas occurred in El Niño, La Niña and neutral years. Thus, other processes can be related to the observed droughts. The drought cases of three categories were selected for each homogeneous area and month, and composites of atmospheric and oceanic variables for the selected cases during both seasons were analyzed. Regional and large-scale fields composites were examined to identify the main processes associated with dry conditions in the different areas. Regional features were related to the influence of high pressure over south and southeast areas and divergence of humidity flux in all areas during DJF and SON months. The large-scale characteristics were SST anomalies in the equatorial Pacific Ocean, wavetrains over South Pacific Ocean with centers of action over South America that produced subsidence over the areas, and MJO and ENSO features linked to the lack of convection in the areas. Therefore, the observed droughts were associated with regional and large-scale features that produced subsidence, and with lack of humidity in the analyzed regions.