



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/11.20.17.43-TDI

**PREVISÃO SUB-SAZONAL COM O MODELO GLOBAL
ATMOSFÉRICO DO CPTEC/INPE: CONFIGURAÇÃO,
AVALIAÇÃO E INVESTIGAÇÃO DAS FONTES DE
PREVISIBILIDADE PARA A AMÉRICA DO SUL**

Bruno dos Santos Guimarães

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Meteorologia,
orientada pelo Dr. Caio Augusto
dos Santos Coelho, aprovada em 14
de dezembro de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/43KQ468>>

INPE
São José dos Campos
2020

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
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 - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/11.20.17.43-TDI

**PREVISÃO SUB-SAZONAL COM O MODELO GLOBAL
ATMOSFÉRICO DO CPTEC/INPE: CONFIGURAÇÃO,
AVALIAÇÃO E INVESTIGAÇÃO DAS FONTES DE
PREVISIBILIDADE PARA A AMÉRICA DO SUL**

Bruno dos Santos Guimarães

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Meteorologia,
orientada pelo Dr. Caio Augusto
dos Santos Coelho, aprovada em 14
de dezembro de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/43KQ468>>

INPE
São José dos Campos
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Guimarães, Bruno dos Santos.

G947p Previsão sub-sazonal com o modelo global atmosférico do CPTEC/INPE: Configuração, avaliação e investigação das fontes de previsibilidade para a América do Sul / Bruno dos Santos Guimarães. – São José dos Campos : INPE, 2020.

xxii + 177 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/11.20.17.43-TDI)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

Orientador : Dr. Caio Augusto dos Santos Coelho.

1. Oscilação de Madden-Julian. 2. BAM-1.2. 3. Fontes de previsibilidade. I.Título.

CDU 551.509.313.4



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 INOVAÇÕES



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Serviço de Pós-Graduação - SEPGR
Pós Graduação em Meteorologia

ATA DE REUNIÃO

DEFESA FINAL DE TESE : BRUNO DOS SANTOS GUIMARÃES

No dia 14 de dezembro de 2020, às 09h, por videoconferência, o aluno mencionado acima defendeu seu trabalho final, intitulado “ PREVISÃO SUB-SAZONAL COM O MODELO GLOBAL ATMOSFÉRICO DO CPTEC/INPE: CONFIGURAÇÃO, AVALIAÇÃO E INVESTIGAÇÃO DAS FONTES DE PREVISIBILIDADE PARA AMÉRICA DO SUL.” (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O aluno foi **APROVADO** pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutor em Meteorologia. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo orientador.

Eu, José Paulo Bonatti, como Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA em nome de todos os membros.

Membros da Banca

Dr. José Paulo Bonatti – Presidente – INPE
Dr. Caio Augusto dos Santos Coelho – Orientador – INPE
Dr. Nelson Jesuz Ferreira – Membro – INPE
Dr. Pedro Leite da Silva Dias – Convidado – USP
Dr. Felipe Marques de Andrade – Convidado - UR



Documento assinado eletronicamente por **José Paulo Bonatti, Pesquisador**, em 17/12/2020, às 15:31 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **6256538** e o código CRC **5204561A**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a algumas pessoas que me incentivaram e contribuíram para o desenvolvimento da presente tese:

Ao Caio Coelho pela excelente orientação do trabalho e confiança em mim depositada em todos os momentos;

Ao Paulo Kubota e Carlos Bartarz pelo enorme suporte durante a pesquisa. Esse trabalho não seria possível sem a ajuda e paciência de vocês;

Ao Steve Woolnough e Nicholas Klingaman pela excelente recepção na Universidade de Reading durante o período do doutorado sanduíche;

Ao Felipe de Andrade e Fernanda Batista por toda a ajuda e companheirismo durante o período em que eu estive com vocês na Inglaterra;

Ao Nelson Ferreira que, embora você não tenha participado de maneira direta do presente trabalho, a sua orientação no período de mestrado construiu todo o alicerce para que eu conseguisse chegar até aqui;

À minha família por todo o suporte, confiança e incentivo;

À minha namorada, Alice, que também foi muito importante durante todo o período do doutorado. Obrigado por estar comigo em todos os momentos;

Aos meus amigos Layrson, Fabíola, Joao, Dayana, Hallan, Carol, Denyson, Domingo, Diogo, Vívian, Bruna, Thamiris, Rayonil, Julliana, José Paulo, Lina, Francisco e Romero pelo grande apoio e incentivo durante essa fase;

Ao pessoal do programa de pós-graduação por todo auxílio e suporte em todas as etapas do doutorado;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pela bolsa de estudo;

À CAPES pela concessão da bolsa para a realização do doutorado sanduíche no exterior.

RESUMO

Este estudo teve como objetivo determinar a habilidade preditiva do modelo atmosférico global do CPTEC (BAM-1.2) na escala sub-sazonal e investigar as principais fontes de previsibilidade associadas sobre a América do Sul, durante 12 verões estendidos (novembro – março, 1999/2000 – 2010/2011). Sete configurações do BAM-1.2 foram avaliadas em termos de resolução vertical, parametrizações de convecção profunda e camada limite planetária, e inicializações da componente atmosférica (condição inicial) e umidade do solo. Através da avaliação dessas sete configurações foi possível determinar a configuração mais adequada do BAM-1.2 para as previsões das anomalias semanais de precipitação e temperatura do ar a 2 metros de altura (T2M) e evolução diária da Oscilação de Madden e Julian (OMJ). Com a configuração do BAM-1.2 determinada, a habilidade preditiva do modelo do CPTEC, a partir de um conjunto de previsões retrospectivas, composto por 11 membros, foi avaliada e comparada com a habilidade preditiva dos modelos do Japan Meteorological Agency (JMA), Environmental and Climate Change Canada (ECCC), European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) e Australian Bureau of Meteorology (BoM), os quais participam do projeto internacional Sub-seasonal-to-Seasonal (S2S) do programa mundial de pesquisa em tempo e clima da Organização Meteorológica Mundial (OMM). Por último, os modos de variabilidade espaço-temporal das anomalias semanais de precipitação foram determinados. Tais modos foram associados a fenômenos atmosféricos/oceânicos para definir as principais fontes de previsibilidade na escala sub-sazonal sobre a América do Sul durante o verão estendido. Os resultados mostraram que o BAM-1.2 se mostrou competitivo em relação aos modelos do projeto S2S avaliados. Entretanto, os superiores índices de destreza alcançados pelo modelo do ECMWF indicam que a habilidade preditiva das previsões sub-sazonais do CPTEC pode ser aprimorada possivelmente com o incremento na resolução espacial do BAM-1.2, acoplamento com o componente oceânico e melhorias nos esquemas de parametrizações físicas e de geração dos membros para inicialização do modelo. Com relação às principais fontes de previsibilidade sobre a América do Sul, o padrão de dipolo meridional sobre o leste da América do Sul foi encontrado como sendo o modo de variabilidade espaço-temporal dominante. Foi identificado que esse padrão é fortemente influenciado por oscilações dentro das escalas de variabilidade intrassazonal e interanual. Esta constatação indica que vários fenômenos influenciam a formação do padrão de dipolo e, dessa forma, atuam como fontes de previsibilidade sobre a América do Sul [e.g., teleconexões trópico-extratropical, El-Niño Oscilação Sul (ENOS) e OMJ]. Além disso, o segundo modo de variabilidade espaço-temporal também mostrou relevante contribuição para a habilidade preditiva sobre a região equatorial da América do Sul. Esse padrão apresenta uma forte relação com a atividade convectiva sobre a região equatorial do Oceano Pacífico Oeste, influenciado principalmente pelo ENOS.

Palavras-chave: Oscilação de Madden-Julian. BAM-1.2. Fontes de previsibilidade.

**SUB-SEASONAL PREDICTION WITH THE GLOBAL ATMOSPHERIC
MODEL OF CPTEC/INPE: CONFIGURATION, EVALUATION AND
INVESTIGATION OF SOURCES OF PREDICTABILITY FOR SOUTH
AMERICA**

ABSTRACT

The aim of this work was to study the predictive ability of the Brazilian Global Atmospheric Model version 1.2 (BAM-1.2) at sub-seasonal time-scale and the associated sources of predictability over South America during the 12 extended austral summers (November – March, 1999/2000 – 2010/2011). Seven BAM-1.2 configurations were tested in terms of vertical resolution, deep convection and boundary layer parameterizations, as well as atmospheric component and soil moisture initializations, in order to identify the configuration with best performance when predicting weekly precipitation anomalies, weekly mean 2-meter temperature (T2M) and the Madden and Julian Oscillation (MJO) daily evolution. With BAM-1.2 configuration determined, an inter-comparison performance assessment of 11 member ensemble hindcasts produced with BAM-1.2 against four Sub-seasonal to Seasonal (S2S) prediction project models from Japan Meteorological Agency (JMA), Environmental and Climate Change Canada (ECCC), European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) and Australian Bureau of Meteorology (BoM) was performed. Lastly, the main spatio-temporal variability modes of weekly precipitation anomalies were determined. These modes were associated with atmospheric/oceanic phenomena to define the main sources of predictability at sub-seasonal time-scale over South America during the extended summer. The performed inter comparison revealed that for prediction of precipitation anomalies and MJO BAM-1.2 showed competitive performance compared to the investigated S2S models, but with respect to ECMWF there is scope for improvements, possibly by a combination of including coupling to an interactive ocean and improving resolution, physical parameterization schemes and the ensemble generation approach for initialization. Regarding the main sources of predictability over South America, the South American seesaw pattern has been found to be the dominant mode of variability. This pattern is strongly influenced by oscillations within the intraseasonal and interannual variability time scales. This suggests that several phenomena can influence the formation of this pattern, acting as sources of predictability [e.g., tropical-extratropical interaction, El-Niño South Oscillation (ENSO), and MJO]. Besides, the second mode of variability contributes to the predictive ability over the equatorial South American region. This mode has a strong relationship with the convective activity over the Equatorial West Pacific Ocean, influenced mainly by ENSO

Keywords: Madden-Julian Oscillation. BAM-1.2. Source of predictability.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Diagrama esquemático da construção dos prazos de validade das previsões avaliadas.	18
Figura 3.1 - Correlação entre as anomalias semanais de precipitação das previsões retrospectivas e observação (GPCP).	34
Figura 3.2 - Valores de REQM das previsões retrospectivas das anomalias semanais de precipitação.	37
Figura 3.3 – Médias espaciais dos valores de correlação (a) e REQM (b).	40
Figura 3.4 - Correlação entre as anomalias semanais de T2M das previsões retrospectivas e das reanálise ERA-Interim.	42
Figura 3.5 - Valores de REQM das previsões retrospectivas das anomalias semanais de T2M.	44
Figura 3.6 - Como a Figura 3.3. Porém para as anomalias de T2M.	46
Figura 3.7- Correlação bivariada (a) e EQMB (b) dos índices RMMs.	48
Figura 4.1 – Correlação dos 5 modelos avaliados e o GPCP.	59
Figura 4. 2 - Como a Figura 4.1. Porém, para a média do conjunto calculada com o número de membros disponíveis para cada modelo.	60
Figura 4. 3 - REQM dos 5 modelos avaliados com relação as anomalias semanais do GPCP.	62
Figura 4.4 - Médias espaciais dos valores de correlação e REQM.	64
Figura 4.5 - Mapa dos valores da AROC para os modelos do CPTEC, ECMWF e BoM.	66
Figura 4. 6 - AROC sobre a região tropical (a) e sobre parte da América do Sul (b). ...	67
Figura 4. 7 – Diagramas de confiabilidade dos modelos do CPTEC, ECMWF e BoM.	69
Figura 4. 8 – Como a Figura 4.7. Porém para a região da América do Sul (0-30°S e 55°W-35°W).	70
Figura 4. 9 - Correlação dos modelos do CPTEC e ECMWF com relação às anomalias quinzenais e mensais do GPCP.	72
Figura 4.10 - Como a Figura 4.9. Porém para os valores de REQM.	73

Figura 4. 11 – Valores de PH para os modelos do CPTEC e ECMWF para os prazos de validade semanal, quinzenal e mensal.	74
Figura 4.12 - Valores de correlação bivariada, EQMB, EQMBa e EQMBf para os modelos avaliados.....	77
Figura 5. 1 - Padrão de dipolo sobre a América do Sul.	86
Figura 5.2 - Padrões espaciais dos três primeiros modos da análise de FOEs.	91
Figura 5.3 - Diagrama de disposição das datas das semanas com relação às datas de inicialização do BAM-1.2.....	93
Figura 5.4 - Correlação temporal entre a série temporal do modo-1 e as anomalias semanais de TSM.....	96
Figura 5.5 - Correlação temporal entre a série temporal do modo-1 e as anomalias semanais de ROL.....	98
Figura 5.6 - Correlação temporal entre a série temporal do modo-1 e as anomalias semanais de função de corrente em 200 hPa.	100
Figura 5.7 – Diagrama de fase da OMJ para os eventos de ZCAS.	103
Figura 5.8 – Padrão espacial das FOE1 10-30, FOE1 30-90 e FOE1 120.	105
Figura 5.9: Séries temporais do FOE1 total, FOE1 10-30, FOE1 30-90 e FOE1 120 e da média semanal do RMM1.....	107
Figura 5.10 - Diagrama de fase da OMJ para os evento de dipolo sobre a América do Sul.	117
Figura 5. 11 - Correlação temporal entre a série temporal do modo-2 e as anomalias semanais de TSM.....	119
Figura 5.12 - Correlação temporal entre a série temporal do modo-2 e as anomalias semanais de ROL.....	121
Figura 5.13 - Correlação temporal entre a série temporal do modo-2 e as anomalias semanais da função de corrente em 200 hPa.	123
Figura 5.14 - Compostos de ROL e circulação para os eventos intensos associados à FOE2.....	126
Figura 5.15 – Série temporal associada ao padrão FOE2.....	128
Figura 5. 16 – Diagrama de fase da OMJ para os eventos de FOE2 sem relação com o ENOS.....	130

Figura 5.17 - Padrões espaciais dos três primeiros modos encontrados para o dado do GPCP e para as previsões retrospectivas dos modelos do CPTEC e ECMWF.....	134
Figura 5.18 - Séries temporais dos três primeiros modos das FOEs para os dados do GPCP e para as previsões do CPTEC ECMWF nas quatro semanas de previsão.	136
Figura 5.19 – Diagrama de dispersão.	139
Figura 5.20 – Diagrama de confiabilidade do modelo do CPTEC para as previsões retrospectivas do índice representativo do padrão de dipolo.	142
Figura B.1 - Correlação entre as anomalias semanais de T2M das previsões retrospectivas e a reanálise do ERA-Interim para a média do conjunto (11 membros) do BAM-1.2.....	167
Figura B.2 – REQM das previsões retrospectivas de T2M do conjunto do BAM-1.2.	168
Figura C.1 – Diferenças entre os valores de correlação do modelo do CPTEC e os valores de correlação de cada modelo do S2S avaliado.	169
Figura C.2 - Diferenças entre os valores de REQM do modelo do CPTEC e os valores de REQM de cada modelo do S2S avaliado.	170
Figura D.1 - REQM das previsões retrospectivas dos modelos avaliados.	171
Figura E.1 - Diagrama de confiabilidade dos modelos do CPTEC, ECMWF e BoM para as anomalias de precipitação quinzenais e mensais sobre a região tropical.	173
Figura E.2 - Diagrama de confiabilidade dos modelos do CPTEC, ECMWF e BoM para as anomalias de precipitação quinzenais e mensais sobre a região leste da América do Sul.	174
Figura F.1 – Regressão linear das séries temporais FOE1 10-30 e FOE1 30-90 com os compos das anomalias semanais de ROL.....	175
Figura F.2 - Regressão linear das séries temporais FOE1 10-30 e FOE1 30-90 com os compos das anomalias semanais de função de corrente em 200 hPa.	176

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Datas das inicializações das previsões retrospectivas do BAM-1.2.	7
Tabela 2.2 - Resumo das sete configurações do BAM-1.2 investigadas para previsões sub-sazonais.	14
Tabela 5.1 - Sumário dos valores de correlação temporal.	109
Tabela 5.2 - Sumário dos eventos de dipolo com sinal positivo e relação desses eventos com as séries temporais FOE1 10-30 dias, FOE1 30-90 dias, FOE1 120, RMM1 e ZCAS.	113
Tabela 5.3 - Como a Tabela 5.2. Porém, para os eventos de dipolo com sinal negativo. ..	115

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AROC	- Área sob a curva ROC
BAM-1.2	- Versão 1.2 do modelo atmosférico global do CPTEC
BoM	- Australian Bureau of Meteorology
CAPE	- <i>convective available potential energy</i>
CE	- Correlação Espacial
CMA	- <i>China Meteorological Administration</i>
CNR-ISAC	- <i>Institute of Atmospheric Sciences and Climate of the National Research Council</i>
CNRM	- <i>Météo-France/Centre National de Recherche Meteorologiques</i>
CPTEC	- Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CT	- Correlação Temporal
ECCC	- <i>Environment and Climate Change Canada</i>
ECMWF	- <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENOS	- El-Niño Oscilação Sul
EQMB	- Erro quadrático médio bivariado
EQMBa	- Componente da amplitude do EQMB
EQMBf	- Componente da fase do EQMB
FOE1	- Série temporal do padrão de dipolo
FOE1 10-30	- Série temporal do padrão de dipolo na banda de 10-30 dias
FOE1 120	- Série temporal do padrão de dipolo na variabilidade interanual
FOE1 30-90	- Série temporal do padrão de dipolo na banda de 30-90 dias
FOEs	- Funções Ortogonais Empíricas
GLDAS	- <i>Global Land Data Assimilation System</i>
GPCP	- <i>Global Precipitation Climatology Project</i>
HMCR	- <i>Hydrometeorological Centre of Russia</i>
IBIS-2.6-CPTEC	- Modelo de superfície terrestre do CPTEC
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JMA	- <i>Japan Meteorological Agency</i>
KMA	- <i>Korea Meteorological Administration</i>
MCGA	- Modelo de circulação geral da atmosfera
NCEP	- <i>National Center for Environmental Prediction dos Estados Unidos</i>
OAN	- <i>Oscilação do Atlântico Norte</i>

OMJ	- Oscilação de Madden-Julian
OMM	- Organização Mundial de Meteorologia
PH	- Pontuação de Habilidade
PSA	- <i>Pacific South America</i>
RMM	- <i>Real-time Multivariate Madden-Julian Oscillation</i>
ROC	- <i>Relative Operating Characteristics</i>
ROL	- Radiação de Onda Longa Emergente
RQM	- Raiz Erro quadrático médio bivariado
S2S	- <i>Subseasonal-to-Seasonal Prediction</i>
SubX	- <i>Subseasonal Experiment</i>
TSM	- Temperatura da superfície do Mar
UKMO	- <i>Met Office</i>
VCAN	- Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZCAS	- Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	- Zona de Convergência Intertropical
ZCPS	- Zona de convergência do Pacífico Sul

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	4
1.2 Estrutura do documento.....	5
2 DADOS E METODOLOGIA	7
2.1 Dados.....	7
2.2 Metodologia.....	10
2.2.1 Descrição do Modelo do CPTEC.....	10
2.2.2 Configurações experimentais do modelo do CPTEC	11
2.2.3 Abordagem de previsão por conjunto	15
2.2.4 Métricas de Avaliação.....	16
2.2.5 Determinação e representação das fontes de previsibilidade na escala sub-sazonal sobre a América do Sul.....	21
3 CONFIGURAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA BRASILEIRO GLOBAL DE PREVISÃO SUB-SAZONAL COM FOCO NA AMÉRICA DO SUL	25
3.1 Introdução	25
3.2 Fundamentação teórica	25
3.3 Resultados.....	31
3.3.1 Avaliação das previsões sub-sazonais determinísticas de precipitação e T2M das sete configurações do BAM-1.2	31
3.3.2 Avaliação das previsões retrospectivas determinísticas das sete configurações do BAM-1.2 para a OMJ	46
3.4 Sumário.....	49
4 AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO DO CPTEC COM OS MODELOS DO PROJETO S2S NA ESCALA SUB-SAZONAL... 53	
4.1 Introdução	53
4.2 Fundamentação teórica	53
4.3 Resultados.....	57

4.3.1	Avaliação das previsões semanais determinísticas das anomalias de precipitação	57
4.3.2	Avaliação das previsões probabilísticas das anomalias semanais de precipitação	65
4.3.3	Avaliação das previsões em outros prazos de validade dentro da escala sub-sazonal	70
4.3.4	Avaliação das previsões determinísticas diárias da OMJ	75
4.4	Sumário	79
5	IMPACTO DOS MODOS DOMINANTES DE VARIABILIDADE SOBRE A AMÉRICA DO SUL NA HABILIDADE PREDITIVA DOS MODELOS DO CPTEC E DO ECMWF PARA AS PREVISÕES SUB-SAZONAIS DA PRECIPITAÇÃO	81
5.1	Introdução	81
5.2	Fundamentação teórica	81
5.3	Resultados	90
5.3.1	Modos dominantes de variabilidade espaço-temporal de precipitação sobre a América do Sul	90
5.3.1.1	Modo-1	93
5.3.1.2	Modo-2	117
5.3.1.3	Modo-3	130
5.3.2	Avaliação da representação espaço-temporal das variabilidades sub-sazonais sobre a América do Sul pelos modelos do CPTEC e ECMWF	131
5.3.3	Novo produto de previsão sub-sazonal para a América do Sul	140
5.4	Sumário	143
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	147
6.1	Conclusões	147
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	151
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
	APÊNDICE A - INFORMAÇÕES SOBRE OS SISTEMAS DE PREVISÃO SUB-SAZONAL E DAS PREVISÕES RETROSPECTIVAS DOS MODELOS DO PROJETO S2S AVALIADOS	165
	APÊNDICE B – ÍNDICES DE DESTREZA PARA AS PREVISÕES DA T2M EMITIDAS COM MÉDIA DO CONJUNTO FORMADA POR 11 MEMBROS	167

APÊNDICE C – DIFERENÇA ENTRE OS ÍNDICES DE DESTREZA DO MODELO DO CPTEC E CADA MODELO DO S2S AVALIADO.....	169
APÊNDICE D – REQM DAS PREVISÕES DAS ANOMALIAS SEMANAIS DE PRECIPITAÇÃO COMPUTADOS PARA O NÚMERO MÁXIMO DE MEMBROS DE CADA CONJUNTO AVALIADO	171
APÊNDICE E – MÉTRICAS PROBABILÍSTICAS COMPUTADAS PARA AS PREVISÕES DAS ANOMALIAS QUINZENAIS E MENSAIS.....	173
APÊNDICE F – MAPAS DE REGRESSÃO LINEAR.....	175

1 INTRODUÇÃO

O prognóstico na escala de tempo entre duas semanas e dois meses é definido como previsão sub-sazonal (VITART; ROBERTSON, 2019). A realização desse prognóstico é uma tarefa desafiadora uma vez que as contribuições das condições inicial da atmosfera e de contorno dos oceanos tropicais exercem pouca influência na habilidade preditiva dos Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGAs) quando comparadas com outras escalas temporais (KUMAR et al., 2011; LIN et al., 2016). A Oscilação de Madden-Julian (OMJ) (MADDEN; JULIAN, 1972), a qual é caracterizada por uma célula de circulação zonal de grande escala que se propaga para leste com um período de 30 a 60 dias sobre a região tropical, tem sido identificada como a principal fonte de variabilidade e previsibilidade na escala sub-sazonal (WOOLNOUGH, 2019). Por essa razão, é importante que os MCGAs apresentem desempenho satisfatório no prognóstico da OMJ.

Contudo, os MCGAs ainda apresentam limitações na simulação da OMJ e de seus impactos na atmosfera global (GREEN et al., 2017; VITART et al., 2017; WANG et al., 2018; LIM et al., 2018). Além da influência direta da OMJ sobre o clima da região tropical, as anomalias de convecção na região equatorial, geradas pela OMJ, influenciam o clima da região extratropical por meio de teleconexões trópico-extratropicais (MATTHEWS; KILADIS, 1999; SCHRECK et al., 2013). Do mesmo modo que para as regiões tropicais, os MCGAs também apresentam limitações em representar a interação da OMJ com as regiões extratropicais (VITART, 2017; DE ANDRADE et al.; 2019). As limitações destacadas acima contribuem para que os MCGAs apresentem menor habilidade preditiva na escala sub-sazonal do que nas escalas de tempo de curto/médio prazo (períodos menores do que 15 dias) e sazonal (ZHU et al., 2014; WHITE et al., 2017), onde os efeitos das condições iniciais e de contorno são dominantes, respectivamente. Por exemplo, de Andrade et al. (2019) mostraram o quão limitada é a habilidade preditiva dos MCGAs para a previsão da precipitação sub-sazonal para prazos de validade além de 15 dias. Em geral, os MCGAs apresentam desempenho moderado em regiões específicas, como por exemplo, sobre as regiões equatoriais dos oceanos Pacífico e Atlântico e algumas áreas sobre a América do Sul nesses prazos mais longos.

Apesar das limitações destacadas acima, vários centros de meteorologia têm produzido rotineiramente previsões sub-sazonais (VITART, 2004; HUDSON et al., 2011a; MASTRANGELO et al., 2012; LIU et al., 2017; WEBER; MASS, 2017; LIANG; LIN, 2018), dada a tendência de aperfeiçoamento da habilidade preditiva dos MCGAs na escala sub-sazonal. Por exemplo, o *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) aparece em destaque entre os centros de meteorologia mundiais, com previsões sub-sazonais rotineiras desde 2004 (VITART, 2004). Além disso, trabalhos têm mostrado que o sistema de previsão sub-sazonal do ECMWF apresenta uma ligeira vantagem com respeito à habilidade preditiva quando comparado com sistemas de previsões de outros centros de meteorologia (LI; ROBERTSON, 2015; VITART, 2017; LIM et al., 2018; DE ANDRADE et al., 2019).

Além da OMJ, outros fenômenos também atuam como fonte de previsibilidade para os modelos na escala sub-sazonal, como por exemplo, o El-Niño Oscilação Sul (ENOS) (KOUSKY et al., 1984), Oscilação do Atlântico Norte (OAN) (HURRELL et al., 2003), sistemas de bloqueios em latitudes médias (TYRLIS; HOSKINS, 2008), teleconexões trópicos-extratrópicos na escala intrassazonal (STAN et al., 2017), entre outros. O interesse em determinar a influência desses fenômenos na habilidade preditiva dos MCGAs na escala sub-sazonal tem aumentado recentemente (HUDSON et al., 2011; LI; ROBERTSON, 2015; BLACK et al., 2017; VITART, 2017; RAO et al., 2019; DE ANDRADE et al., 2019; ROBERTSON et al., 2020; KLINGAMAN et al., 2020). Entretanto, a maioria desses trabalhos analisam tais aspectos de forma global (i.e., sem focar em uma região específica para uma análise mais detalhada) ou focam em regiões específicas, sobretudo do Hemisfério Norte.

O trabalho de Klingaman et al. (2020), o qual avaliou as previsões retrospectivas sub-sazonais de quatro MCGAs, incluindo o modelo global do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), é uma exceção, dado que os autores estudaram o impacto da ocorrência do ENOS e da OMJ na habilidade preditiva dos MCGAs avaliados com foco na América do Sul. Klingaman et al. (2020) mostraram que a habilidade preditiva dos MCGAs sobre a América do Sul é pouco sensível à ocorrência de eventos de ENOS e OMJ. Este fato sugere que outros fenômenos podem atuar como fontes de previsibilidade sobre a América do Sul. Por outro lado, os autores também mostraram que o modelo global do CPTEC, assim como os demais MCGAs, é capaz de

reproduzir os padrões de teleconexões do ENOS e da OMJ sobre a América do Sul com até cinco semanas de antecedência, com melhor representação nos prazos de validade de previsão mais curtos (i.e., previsões emitidas para datas mais próximas às datas condição inicial).

Em grande parte, os resultados mencionados anteriormente estão documentados graças ao esforço gerado pelo projeto *Sub-seasonal to seasonal (S2S) Prediction*. Esse projeto foi promovido em conjunto pelos programas mundiais de previsão de tempo [*World Weather Research Programme (WWRP)*] e clima [*World Climate Research Programme (WCRP)*] da Organização Meteorológica Mundial (OMM), com o objetivo de melhorar a habilidade e o entendimento das previsões sub-sazonais e promover sua implementação em centros operacionais e sua utilização em diversos setores da sociedade, tais como agricultura, geração de energia e transporte. Atualmente, o projeto S2S armazena e disponibiliza previsões em tempo real (com atraso de poucas semanas) e previsões retrospectivas de 11 centros de pesquisa e/ou operação (VITART et al., 2017).

A previsão sub-sazonal é de grande importância porque preenche a lacuna entre os prognósticos de tempo e de clima sazonal. Além disso, informações rotineiras na escala sub-sazonal (e.g., anomalias semanais, quinzenais e mensais do estado da atmosfera e; intensidade e fase da OMJ), o que por si só já é uma informação útil para vários setores socioeconômicos, provém potencial de prever eventos extremos como enchentes, secas, frequência de furacões e ondas de frio e calor. Dessa forma, observa-se uma grande demanda por previsões sub-sazonais por diversos setores como o agrícola, energético, financeiro, entre outros (WHITE et al. 2017).

Neste panorama, seguindo a tendência dos demais centros de meteorologia mundiais, o CPTEC, que tem um papel de liderança na América do Sul na temática das previsões de tempo e de clima sazonal, começou a desenvolver e avaliar previsões sub-sazonais (GUIMARÃES et al., 2020) além da representação da OMJ em simulações climáticas (COELHO et al., 2020), utilizando a versão 1.2 do MCGA do CPTEC, denominado *Brazilian atmospheric Model (BAM-1.2)*, por meio deste trabalho de tese de doutorado. O presente trabalho foi motivado pelo fato de que, assim como na escala sazonal, a América do Sul localiza-se em uma região privilegiada para as previsões sub-sazonais,

uma vez que os MCGAs apresentam habilidade preditiva mais elevada nessa região do que em outras áreas continentais do globo (LI; ROBERTSON, 2015; DE ANDRADE et al., 2019). Provavelmente, este fato está ligado à capacidade dos MCGAs em representar adequadamente os principais modos de variabilidade espaço-temporal na escala sub-sazonal que ocorrem nessa região. Entretanto, a compreensão dos fenômenos atmosféricos/oceânicos que modulam esses modos de variabilidade sobre a América do Sul na escala sub-sazonal (definidos como fontes de previsibilidade) ainda carece de investigação.

Com o que foi exposto acima, destacam-se duas questões principais que serão abordadas no presente trabalho: 1) Qual é o desempenho do modelo global do CPTEC (BAM-1.2) na escala sub-sazonal (prognósticos da OMJ, das anomalias semanais da precipitação e T2M e das anomalias quinzenais e mensais da precipitação) comparado ao desempenho dos modelos de outros centros de meteorologia (incluindo o modelo do ECMWF)? e; 2) Quais são as principais fontes de previsibilidade para a previsão sub-sazonal da precipitação sobre a América do Sul?

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta tese é estudar a habilidade preditiva sub-sazonal do BAM-1.2, explorando, em particular, as principais fontes de previsibilidade sobre a América do Sul.

Os objetivos específicos são:

- Definir qual a configuração mais adequada para o modelo global do CPTEC na escala sub-sazonal por meio de testes de sensibilidade das parametrizações de convecção e camada limite, resolução vertical e inicializações dos componentes atmosférico (condição inicial) e de umidade do solo;
- Avaliar a habilidade preditiva sub-sazonal das previsões retrospectivas do BAM-1.2 para os mapas globais de precipitação e temperatura do ar;
- Determinar o tempo de previsão hábil do BAM-1.2 para o prognóstico da OMJ;
- Classificar de forma determinística e probabilística a habilidade preditiva do BAM-1.2 e outros modelos de centros de meteorologia de referência na escala sub-sazonal;

- Identificar e analisar os modos de variabilidade espaço-temporal dominantes sobre a América do Sul das anomalias semanais de precipitação;
- Avaliar como os modelos do CPTEC e ECMWF reproduzem tais modos de variabilidade dominantes nas previsões retrospectivas produzidas com uma a quatro semanas de antecedência.

1.2 Estrutura do documento

Este documento foi organizado da seguinte forma: no Capítulo-2, os dados e a metodologia utilizados nesta tese são apresentados. O Capítulo-3 mostra os resultados referentes ao trabalho de determinar a configuração do BAM-1.2 mais adequada para a produção das previsões sub-sazonais. A avaliação da habilidade preditiva do modelo do CPTEC, a partir da configuração do BAM-1.2 definida no Capítulo-3, é apresentada no Capítulo-4. Esse capítulo também documenta a comparação do desempenho do modelo do CPTEC com o desempenho de quatro modelos do projeto S2S. O Capítulo-5 apresenta os modos dominantes de variabilidade espaço-temporal das anomalias semanais de precipitação notados sobre a América do Sul e a relação desses modos com fenômenos atmosféricos/oceânicos (fontes de previsibilidade). Além disso, o Capítulo-5 mostra a capacidade dos modelos do CPTEC e ECMWF em reproduzir os modos de variabilidade encontrados com previsões válidas de uma a quatro semanas de antecedência. Por último, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo-6.

2 DADOS E METODOLOGIA

2.1 Dados

Para a realização deste trabalho, um total de 2040 previsões retrospectivas sub-sazonais foram geradas com a versão 1.2 do modelo atmosférico global do CPTEC (*Brazilian Atmospheric Model* BAM-1.2, (Guimarães et al., 2020; Coelho et al., 2020). As 2040 previsões foram produzidas através de sete experimentos com o BAM-1.2 configurado de diferentes formas (assim como será descrito nesse capítulo), e mais 10 membros do conjunto gerados a partir da configuração do modelo identificada como a mais adequada, os quais foram gerados por meio do método de perturbação da condição inicial baseado em Funções Ortogonais Empíricas (FOEs) (MENDONÇA; BONATTI, 2009). O BAM-1.2 foi integrado por 35 dias em cada execução. As previsões retrospectivas sub-sazonais foram geradas para o verão estendido, o qual compreende os meses de novembro a março, do período de 1999/2000 a 2010/2011 (período total equivalente a 12 anos). Foram realizadas duas previsões para cada mês de um determinado ano (uma inicializada em uma data próximo ao início e a outra próximo ao meio de cada mês). As datas de inicialização variam de um mês para o outro e são apresentadas na Tabela 2.1. Dessa forma, cada experimento e membro do conjunto apresenta uma amostra com 120 previsões retrospectivas (12 anos, 5 meses e 2 dias).

Tabela 2.1 - Datas das inicializações das previsões retrospectivas do BAM-1.2.

DIAS	MESES	PERÍODO
03 e 14	NOVEMBRO	1999 a 2010
01 e 15	DEZEMBRO	1999 a 2010
04 e 14	JANEIRO	2000 a 2011
01 e 15	FEVEREIRO	2000 a 2011
03 e 14	MARÇO	2000 a 2011

Fonte: Produção do autor.

Além das previsões retrospectivas do modelo do CPTEC, previsões retrospectivas sub-sazonais dos modelos do *Environment and Climate Change Canada* – (ECCC), *Japan Meteorological Agency* – (JMA), *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* – (ECMWF), e *Australian Bureau of Meteorology* – (BoM) também foram utilizadas. As previsões retrospectivas desses modelos são provenientes da base de dados do projeto S2S (Seção-3.2) (VITART et al., 2017) e estão disponíveis em: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/s2s/levtype=sfc/type=cf/>. As datas de inicialização analisadas dos quatro modelos do projeto S2S também compreendem o verão estendido, com uma inicialização próxima a data de início e a outra próxima ao meio de cada mês, durante o período de 1999/2000 a 2010/2011. Dessa maneira, todos os modelos apresentam uma amostra com 120 previsões assim como o modelo do CPTEC. Entretanto, os dias das inicializações das previsões variam de um modelo para o outro, exceto para o modelo do ECMWF, o qual apresenta as mesmas datas de inicialização do BAM-1.2 (Tabela 2.1). As datas de inicialização selecionadas foram os dias 1 e 16 para o modelo do BoM e os dias 1 e 10 para o modelo do JMA. Assim como nos modelos do CPTEC e ECMWF, as datas de inicialização do modelo do ECCC também variam com relação ao mês de inicialização do modelo. Dessa maneira, as datas de inicialização do modelo do ECCC selecionadas foram os dias 1 e 15 para os meses de novembro, fevereiro e março, os dias 6 e 20 para o mês de dezembro e os dias 4 e 18 para o mês de janeiro. Os quatro modelos do S2S foram selecionados porque estão ou estiveram recentemente em operação e porque apresentam diferentes configurações no que se compete, por exemplo, a resolução espacial, ao acoplamento atmosfera-oceano e ao tamanho do conjunto. Uma breve descrição dos sistemas de previsão sub-sazonal desses centros de meteorologia pode ser encontrada no Apêndice - A.

A reanálise ERA-Interim (DEE et al., 2011), com resolução horizontal de $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$, foi utilizada como condição inicial para as previsões retrospectivas geradas com o modelo BAM-1.2. As variáveis utilizadas para a inicialização do BAM-1.2 foram os componentes zonal e meridional do vento, umidade específica e temperatura e ozônio em 37 níveis verticais (alocados entre 1000 hPa a 1 hPa), além da pressão em superfície. Os dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) da reanálise ERA-Interim também foram utilizados como condições de contorno para as previsões retrospectivas do BAM-1.2. Além disso, as reanálises ERA-Interim também foram utilizadas como

dados de referência para avaliar a qualidade das previsões retrospectivas do BAM-1.2 e dos quatro modelos do S2S. As variáveis selecionadas para a avaliação foram: T2M e o componente zonal do vento em 850 hPa e 200 hPa com resolução horizontal de 1° x 1°. Os períodos que compreendem esses dados são os 35 dias subsequentes as datas de inicialização mostradas na (Tabela 2.1).

A umidade do solo mensal proveniente do *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) na versão-2 também foi utilizada como condição inicial da superfície para avaliar o impacto da umidade do solo na habilidade preditiva do BAM-1.2. O dado do GLDAS utilizado apresenta uma resolução horizontal de 1° x 1° em quatro camadas do solo (0-10, 10-40, 40- 100 e 100-200 cm de profundidade) (RUI; BEAUDOING, 2017) e compreendem o período de estudo.

Para avaliar as previsões retrospectivas de precipitação e determinar os padrões de anomalias sub-sazonais sobre a América do Sul, foram utilizados os dados diários do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP). O GPCP é derivado de um produto que integra dados observacionais de chuva e de estimativas de precipitação por satélites geostacionários e de órbita polar. A resolução espacial do GPCP é de 1° x 1° para o mesmo período das previsões retrospectivas geradas (verões estendidos de 1999/2000 a 2010/2011). Informações adicionais sobre o produto do GPCP podem ser encontradas em Huffman et al (2001).

Os dados diários de Radiação de Onda Longa Emergente (ROL), provenientes da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), foram utilizados para avaliar a habilidade preditiva das previsões retrospectivas com relação ao prognóstico da evolução diária da OMJ. Além disso, os dados de ROL também foram utilizados para a determinação dos padrões de teleconexão que influenciam as anomalias semanais de precipitação sobre a América do Sul. Os dados de ROL da NOAA são estimados por meio de satélites e apresentam resolução espacial de 2.5° (LIEBMANN; SMITH, 1996).

Os dados dos índices RMM1 e RMM2 (i.e., componentes do *Real-Time Multivariate OMJ index - RMM*) (WHEELER; HENDON, 2004), os quais determinam a amplitude e fase da OMJ, e do Índice de Oscilação Sul (IOS) do ENOS (KEPPENNE; GHIL, 1992) foram utilizados para analisar o impacto desses fenômenos nos padrões de anomalia semanais da precipitação sobre a América do Sul.

2.2 Metodologia

Os resultados desta tese estão divididos em três partes. Na primeira parte (Capítulo-3), a configuração mais adequada do BAM-1.2 (Seção 2.2.1) para a previsão na escala sub-sazonal foi definida a partir de sete experimentos (Seção 2.2.2) por meio de métricas de avaliação das previsões retrospectivas (Seção 2.2.4). Com a configuração definida, um conjunto de previsões retrospectivas com 11 membros foi gerado por meio do método de perturbação da condição inicial da atmosfera baseado em FOE (Seção 2.2.3). Na segunda parte (Capítulo-4), o conjunto de previsões retrospectivas do BAM-1.2 foi avaliado e comparado com 4 sistemas de previsão do projeto S2S afim de examinar a qualidade das previsões determinísticas e probabilísticas, além de verificar as similaridades e diferenças entre os modelos avaliados (Seção 2.2.4). Na terceira parte (Capítulo-5), os padrões de habilidade preditiva dos modelos do CPTEC e ECMWF para a previsão sub-sazonal de precipitação sobre a América do Sul foram associados aos modos dominantes de variabilidade espaço-temporal das anomalias semanais de precipitação sobre a América do Sul. Em seguida, esses modos foram relacionados a fenômenos atmosféricos/oceânicos para determinar as principais fontes de previsibilidade para a América do Sul na escala sub-sazonal (Seção 2.2.5).

2.2.1 Descrição do Modelo do CPTEC

O presente trabalho utilizou o modelo global BAM-1.2, o qual é um modelo espectral hidrostático com difusão horizontal semi-implícita e coordenada vertical sigma (FIGUEROA et al., 2016), para a composição de 2040 previsões retrospectivas. Atualmente, o BAM-1.2 está em operação para previsões de curto e médio prazo (até 15 dias), e, recentemente, foi incorporado operacionalmente para a previsão climática sazonal. O BAM-1.2 apresenta diferentes opções de configurações, tanto para o componente dinâmico como para as parametrizações físicas. O esquema de advecção Euleriano com um esquema Semi-Lagrangiano para o transporte de umidade e variáveis microfísicas prognósticas foi utilizado nesse trabalho com truncamento triangular em 126 ondas (TQ126, correspondente a uma grade horizontal de aproximadamente $1.0^\circ \times 1.0^\circ$). O BAM-1.2 é acoplado ao modelo de superfície terrestre IBIS-2.6-CPTEC (KUBOTA, 2012). O BAM-1.2 não apresenta acoplamento atmosfera-oceano. Dessa maneira, as condições da TSM são mantidas constantes em relação às condições de

inicialização durante o tempo de integração do modelo (35 dias). Os processos físicos são representados pelos esquemas de microfísica de Morrison et al. (2009), radiação de onda longa desenvolvido por Chou et al. (2001) (conhecido como CLIRAD-LW) e radiação de onda curta desenvolvido por Chou e Suarez (1999) e modificado por Tarasova e Fomin (2000) (CLIRAD-SW).

Os processos físicos mencionados acima não foram alterados nos testes de sensibilidade descritos na Seção 2.2.2. Os testes de sensibilidade foram realizados com relação às parametrizações físicas de convecção profunda e de camada limite planetária. As parametrizações físicas de convecção profunda, que podem ser usadas no BAM-1.2, são representadas pelos esquemas de Arakawa-Schubert simplificado, o qual foi revisado por Han e Pan (2011) (referido a partir de agora apenas como Arakawa-Shubert), e Grell e Dévényi (2002) (referido a partir de agora como Grell-Dévényi). As parametrizações de camada limite incluem os esquemas de difusão úmida de Bretherton e Park (2009) (referido a partir de agora como Bretherton-Park) e de difusão seca modificada, baseado em Mellor e Yamada (1982) (referido a partir de agora como Mellor-Yamada).

2.2.2 Configurações experimentais do modelo do CPTEC

Sete experimentos com configurações diferentes foram definidos para determinar a configuração mais adequada para o BAM-1.2 na escala sub-sazonal. Os parâmetros avaliados foram: parametrizações de convecção profunda e camada limite; resolução vertical, e; inicializações da umidade do solo e do componente atmosférico (condição inicial). Cinco das sete configurações (Tabela 2.2) foram definidas com as combinações das duas parametrizações de convecção profunda (Arakawa-Shubert e Grell-Dévényi), das duas parametrizações de camada limite (Bretherton-Park e Mellor-Yamada) e do aumento da resolução vertical de 42 para 64 níveis sigma. Esses processos físicos e a resolução vertical foram avaliados porque apresentam um papel importante na representação da OMJ nos MCGAs (VITART, 2014; BOYLE et al., 2015; WANG; CHEN, 2017) e, portanto, podem influenciar na qualidade das previsões sub-sazonais. É importante destacar que outros processos (e.g., parametrizações de radiação e de microfísica) também são importantes para uma representação satisfatória da OMJ

(ZHANG, 2005; VITART, 2014; WANG et al., 2018). Entretanto, essas características não foram avaliadas.

As parametrizações de Arakawa-Shubert e Grell-Dévényi são derivadas de Grell (1993), onde o espectro de nuvens do esquema original de Arakawa e Schubert (1974) é reduzido a uma única nuvem usando um único fechamento de fluxo de massa. As diferenças entre Arakawa-Shubert e Grell-Dévényi estão na formulação da taxa de entranhamento na base da nuvem e do disparo da convecção. No esquema Grell-Dévényi, a taxa de entranhamento é calculada em função do diâmetro da nuvem, e o disparo da convecção é relacionado com um determinado limiar de CAPE (*convective available potential energy*) (FIGUEROA et al., 2016). Na parametrização Arakawa-Shubert, além do diâmetro da nuvem, a taxa de entranhamento é calculada em função da umidade relativa do ambiente, e o disparo da convecção é determinado a partir de um limiar de energia estática úmida (HAN; PAN, 2011). Como mencionado acima, a parametrização Arakawa-Shubert foi revisada por Han e Pan (2011). Esse processo foi realizado para reduzir sinais de precipitação inadequados produzidos por ruídos provocados por instabilidades incessantes na coluna atmosférica do MCGA do NCEP. Han e Pan (2011) modificaram o esquema Arakawa-Shubert para intensificar a convecção parametrizada a partir de mudanças no fluxo de massa na base da nuvem e do aumento na altura do topo da nuvem. Com respeito às duas parametrizações de camada limite, o esquema de Bretherton-Park utiliza variáveis conservadas para o ar úmido, enquanto que a parametrização de Mellor-Yamada adota um esquema de difusão que considera o tratamento da temperatura e umidade de forma independente. Dessa maneira, a parametrização Bretherton-Park consegue realizar o tratamento mais realístico das nuvens no topo da camada limite, melhorando a estrutura da camada limite estável noturna (COHEN et al., 2015).

Duas das sete configurações (Tabela 2.2) foram criadas para avaliar o impacto das inicializações da umidade do solo e das condições iniciais da atmosfera. A umidade do solo é considerada uma fonte de previsibilidade na escala sub-sazonal (KOSTER et al., 2011; DIRMEYER et al., 2019). Atualmente, as previsões sazonais do CPTEC são inicializadas com a climatologia mensal da umidade do solo definidas em Willmott et al., (1985). Desse modo, um dos experimentos avaliados foi configurado com a análise da umidade do solo do GLDAS (RUI; BEAUDOING, 2017). Para isso, as previsões

retrospectivas foram inicializadas com umidade do solo do mês anterior correspondente a data de inicialização do modelo, o que possibilita manter uma condição de previsão em tempo real. Por exemplo, para as previsões inicializadas nos dias 3 e 14 de novembro de 2005, foi utilizada a umidade do solo mensal do mês de outubro de 2005. Por último, um experimento inicializado com a análise FNL do NCEP, ao invés da reanálise ERA-Interim, foi gerado para avaliar o impacto da mudança da condição inicial da atmosfera. Essa característica foi avaliada porque a análise FNL do NCEP é disponibilizada em tempo real, enquanto que a reanálise ERA-Interim [atualmente ERA-5 (HERSBACH et al., 2020)] é disponibilizada com alguns dias de atraso, e, portanto, esta última não poderia ser utilizada para a produção de previsões em tempo real. Dessa forma, é importante avaliar o impacto de diferentes condições iniciais na habilidade preditiva do BAM-1.2.

As sete configurações do BAM-1.2 são definidas na Tabela 2.2 e são sumarizadas abaixo:

- 42ABCE: BAM-1.2 com 42 níveis na vertical, parametrização de convecção profunda Arakawa-Shubert, parametrização de camada limite Bretherton-Park, umidade do solo inicializada com a climatologia e condição inicial ERA-Interim;
- 64ABCE: BAM-1.2 com 64 níveis na vertical, parametrização de convecção profunda Arakawa-Shubert, parametrização de camada limite Bretherton-Park, umidade do solo inicializada com a climatologia e condição inicial ERA-Interim;
- 42ABGE: BAM-1.2 com 42 níveis na vertical, parametrização de convecção profunda Arakawa-Shubert, parametrização de camada limite Bretherton-Park, umidade do solo inicializada com a análise GLDAS e condição inicial ERA-Interim;
- 42ABCF: BAM-1.2 com 42 níveis na vertical, parametrização de convecção profunda Arakawa-Shubert, parametrização de camada limite Bretherton-Park, umidade do solo inicializada com a climatologia e condição inicial FNL;

- 42GBCE: BAM-1.2 com 42 níveis na vertical, parametrização de convecção profunda Grell-Dévényi, parametrização de camada limite Bretherton-Park, umidade do solo inicializada com a climatologia e condição inicial ERA-Interim;
- 64GBCE: BAM-1.2 com 64 níveis na vertical, parametrização de convecção profunda Grell-Dévényi, parametrização de camada limite Bretherton-Park, umidade do solo inicializada com a climatologia e condição inicial ERA-Interim;
- 42AMCE: BAM-1.2 com 42 níveis na vertical, parametrização de convecção profunda Arakawa-Shubert, parametrização de camada limite Mellor-Yamada, umidade do solo inicializada com a climatologia e condição inicial ERA-Interim.

Tabela 2.2 - Resumo das sete configurações do BAM-1.2 investigadas para previsões sub-sazonais.

configurações	Resolução vertical		Convecção profunda		Camada limite planetária		Umidade do solo		Condição inicial	
	42	64	Arakawa-Schubert	Grell-Dévényi	Bretherton-Park	Mellor-Yamada	Climatológica	GLDAS	ERA-Interim	FNL
42ABCE										
64ABCE										
42ABGE										
42ABCF										
42GBCE										
64GBCE										
42AMCE										

Fonte: Produção do autor.

É importante destacar que os nomes dos experimentos foram formados para classificar as configurações de forma intuitiva. Os números 42 e 64 representam a resolução

vertical do modelo (42 ou 64 níveis). A primeira letra representa a parametrização de convecção profunda (A para Arakawa-Shubert e G para Grell-Dévényi), enquanto o esquema de camada limite é definido pela segunda letra (B para Bretherton-Park e M para Mellor-Yamada). A terceira letra representa a inicialização da umidade do solo (C para a umidade do solo climatológica e G para a análise GLDAS). A última letra representa a condição inicial da atmosfera (E para ERA-Interim e F para FNL). Como mencionado anteriormente, os demais parâmetros do BAM-1.2 não foram alterados (Seção 2.2.1). Como o BAM-1.2 não possui acoplamento atmosfera-oceano, os campos de TSM total (i.e., não o campo de anomalia) e gelo marinho do ERA-Interim de cada condição inicial foram mantidos constantes durante os 35 dias de previsão (i.e., TSM persistida). É importante destacar que todas as configurações foram inicializadas com a TSM do ERA-Interim até mesmo o experimento inicializado com a análise FNL (configuração 42ABCF).

2.2.3 Abordagem de previsão por conjunto

A partir da configuração selecionada no capítulo-3, um conjunto de previsões sub-sazonais com 11 membros foi gerado com o método de perturbação da condição inicial baseado em FOEs. Esse método foi inicialmente proposto por Zhang e Krishnamurti (1999) para o desenvolvimento de um conjunto voltado para a previsão de ciclones tropicais. Em seguida, o método foi aperfeiçoado para o modelo global do CPTEC por Coutinho (1999) e Mendonça (2008). Atualmente, o método de perturbação da condição inicial baseado em FOEs está em operação no CPTEC para a formação do conjunto voltado para previsões estendidas (previsões com prazos de validade de até 15 dias).

O método de perturbação baseado em FOEs do CPTEC (MENDONÇA; BONATTI, 2009) produz análises perturbadas de forma otimizada a partir da aplicação das FOEs em n séries temporais formadas pelas diferenças entre uma execução de 48h do modelo inicializado com uma condição inicial controle e n execuções de 48h do modelo inicializado com condições iniciais perturbadas de forma aleatória. As perturbações aleatórias são extraídas de uma distribuição gaussiana com média igual a zero e desvio padrão comparável ao erro de uma previsão de curta duração. Os valores dos desvios padrões são iguais a 3 ms^{-1} para o vento horizontal, 0.6° K para o campo de temperatura, 1 hPa para o campo de pressão na superfície, e um perfil vertical para a

umidade específica derivada da matriz de covariância do erro do modelo do ECMWF (DERBER; BOUTIER, 1999). A análise de FOE é realizada sobre cinco domínios de forma separada: Hemisfério Norte, Hemisfério Sul, Trópicos, norte da América do Sul e sul da América do Sul. As perturbações são associadas aos modos de crescimento rápido. Para serem usados com perturbações ótimas, esses modos de crescimento rápido são redimensionados para ter um desvio padrão da mesma ordem e magnitude das perturbações iniciais. Por último, a perturbação ótima é adicionada e subtraída da análise controle, e um conjunto de $2n$ condições iniciais perturbadas é gerado. Mais detalhes sobre a metodologia de conjunto baseado em FOEs usado no CPTEC podem ser encontrados em Cunningham et al. (2015).

2.2.4 Métricas de Avaliação

A avaliação da qualidade das previsões sub-sazonais determinísticas e probabilísticas foi realizada por meio de um conjunto de medidas de verificação. Na abordagem determinística, as previsões sub-sazonais de precipitação e de T2M foram avaliadas por meio da correlação linear (Equação 2.1), a qual é uma medida de associação entre a previsão e o dado observacional (ou referência), e pela Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) (Equação 2.2), a qual é uma medida de acurácia da previsão. As avaliações foram realizadas para o membro controle de cada configuração do BAM-1.2 (Capítulo-3) e para a média do conjunto do BAM-1.2 e dos modelos do S2S (Capítulo-4). As previsões retrospectivas foram confrontadas com os dados do GPCP (precipitação) e do ERA-Interim (T2M).

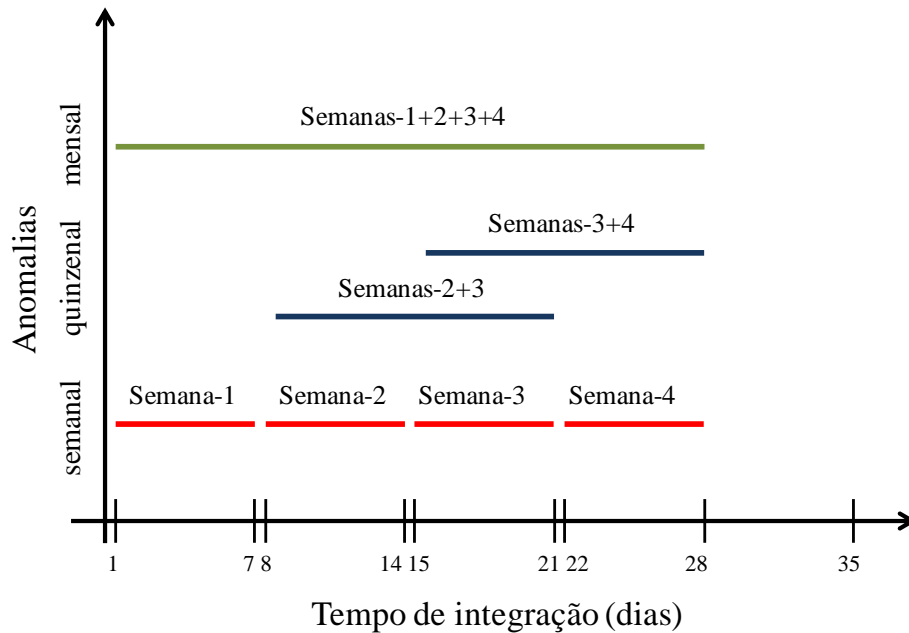
$$COR(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i)(p_{i,\tau})/n}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i)^2/n \sum_{i=1}^n (p_{i,\tau})^2/n}} \quad (2.1)$$

$$REQM(\tau) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{i,\tau} - r_i)^2} \quad (2.2)$$

onde p_i é a previsão retrospectiva, r_i é o valor de referência (ou valor observado) e n é o número de previsões, o qual é igual a 120, para um dado prazo de validade de previsão (τ). O valor da correlação varia entre -1 e 1. Entretanto, quanto maior (menor) a associação linear da previsão com o dado de referência, mais próximo de 1 (0) é o valor da correlação. Quanto menor a diferença entre a previsão e o dado de referência, menor será o erro da previsão. Assim, o REQM igual a 0 representa previsões perfeitas.

As métricas mencionadas acima foram calculadas com relação às anomalias semanais de precipitação e T2M, levando em conta o período de integração de cada data de inicialização conforme mostrado na Figura 2.1 (linhas vermelhas). As anomalias semanais foram calculadas para as previsões retrospectivas, a partir das climatologias semanais do modelo, e para os dados de referência (GPCP e ERA-Interim), a partir das climatologias semanais do GPCP e das reanálises ERA-interim. As climatologias foram geradas de forma cruzada (i.e., para uma determinada previsão, o dado referente à data do cálculo da anomalia não é levado em conta no cálculo da climatologia. Dessa forma, a climatologia é determinada com 11 valores ao invés dos valores dos 12 verões estendidos do período do estudo). Como será mostrado no Capítulo-4, a habilidade preditiva dos MCGAs para as previsões das anomalias semanais é limitada nas semanas-3 e 4, principalmente para os prognósticos de precipitação. Por conta disso, as previsões sub-sazonais foram avaliadas para as anomalias quinzenais (linhas azuis na Figura 2.1) e mensais (linha verde na Figura 2.2) de precipitação, além das anomalias semanais. As previsões sub-sazonais das anomalias semanais, quinzenais e mensais foram avaliadas para diferentes prazos de validade (i.e., período de tempo entre a emissão de uma previsão e a ocorrência da anomalia de precipitação/T2M). Dessa maneira, as previsões das anomalias semanais foram avaliadas para quatro prazos de validade: semana-1 (média entre os dias 1-7 de integração do modelo), semana-2 (média entre os dias 8-14 de integração do modelo), semana-3 (média entre os dias 15-21 de integração do modelo) e semana-4 (média entre os dias 22-28 de integração do modelo) (linhas vermelhas na Figura 2. 1). As anomalias quinzenais foram calculadas para dois prazos de validade, os quais foram formados pela combinação das semanas-2 e 3 e pela combinação das semanas-3 e 4 (linhas azuis Figura 2.1). As anomalias mensais foram obtidas pela combinação das semanas-1, 2, 3 e 4 (Linha verde na Figura 2.1).

Figura 2.1 – Diagrama esquemático da construção dos prazos de validade das previsões avaliadas.



As previsões foram avaliadas de acordo com as anomalias semanais (linhas vermelhas), quinzenais (linhas azuis) e mensais (linha verde) no eixo y e construídas a partir do tempo de inicialização do modelo no eixo x.

Fonte: Produção do autor.

Além das métricas apresentadas, a Pontuação de Habilidade (PH) (Equação 2.3) também foi calculada. A PH é baseada no REQM (Equação 2.2) do modelo avaliado e no REQM gerado a partir de uma previsão de referência (climatologia - REQM_c). Dessa forma, o PH fornece uma comparação entre o desempenho do modelo avaliado e o desempenho da previsão climatológica. Como as previsões sub-sazonais foram avaliadas para os prognósticos das anomalias semanais, quinzenais e mensais, o REQM_c é dado pela Equação 2.2, considerando o valor de p_i igual a zero (o valor da anomalia correspondente a previsão climatológica). Dessa maneira, o REQM_c é igual ao desvio padrão das anomalias de precipitação do GPCP. Ou seja, para que o modelo avaliado apresente um desempenho melhor do que a previsão climatológica, o valor da REQM deve ser menor que o desvio padrão das anomalias do GPCP. Nesse caso, o valor de PH encontra-se entre 0 e 1. Por outro lado, quando a previsão climatológica apresenta erro menor do que a previsão do modelo avaliado, o valor da PH é negativo.

$$PH(\tau) = 1 - \frac{REQM}{REQM_c} \quad (2.3)$$

Além da abordagem determinística, as previsões retrospectivas sub-sazonais das anomalias de precipitação foram avaliadas a partir de uma abordagem probabilística no Capítulo-4. Nesta parte do trabalho, apenas os modelos do CPTEC (BAM-1.2), do ECMWF e do BoM foram avaliados. As previsões probabilísticas dos modelos do ECCO e JMA não foram avaliadas porque o conjunto desses dois modelos apresenta um número limitado de membros. As métricas de verificação foram computadas para as probabilidades de ocorrência do evento anomalia semanal/quinzenal/mensal positiva de precipitação em cada ponto de grade. Em outras palavras, as métricas empregadas para examinar a qualidade das previsões probabilísticas foram calculadas para eventos dicotômicos (i.e., indica a ocorrência ou não ocorrência de anomalia positiva) determinados pelos conjuntos dos modelos do CPTEC, do ECMWF e do BoM. As métricas selecionadas foram área sob a curva ROC (*Relative Operating Characteristics*) (AROC) e o diagrama de confiabilidade. A AROC é uma medida da qualidade de uma previsão probabilística que relaciona a taxa de acerto com a taxa de alarme falso (e.g., AROC é uma medida de discriminação). Essa relação é dada por uma tabela de contingência, a qual é formada pela taxa de acerto (relação entre todos os eventos observados que foram previstos corretamente) e pela taxa de alarme falso (relação entre todos os eventos e os eventos previstos incorretamente como eventos) para diferentes limiares de probabilidade. Um conjunto com previsões perfeitas apresenta área ROC igual a 1, enquanto que AROC igual a 0.5 indica um conjunto que não é capaz de emitir previsões probabilísticas que possam distinguir entre a ocorrência e não ocorrência do evento analisado, com capacidade de discriminar a ocorrência do evento equivalente à capacidade de uma escolha aleatória (i.e., 50%).

O diagrama de confiabilidade é uma ferramenta útil para a avaliação das previsões probabilísticas porque fornece informação sobre três atributos da qualidade das previsões probabilísticas (confiabilidade, resolução e nitidez). A confiabilidade é uma medida da capacidade do conjunto representar a incerteza associada à previsão de um dado evento. A resolução e a nitidez mostram a capacidade do conjunto emitir previsões probabilísticas que diferem da frequência climatológica de ocorrência do evento. O diagrama de confiabilidade é construído a partir das probabilidades de ocorrência do evento selecionado (anomalias semanais/quinzenais/mensal positivas de precipitação) em função das correspondentes frequências relativas observadas. Seguindo Coelho et al.

(2018), os intervalos de probabilidade selecionados foram 0-10%, 10-20%, 20-30%, 30-40%, 40-50%, 50-60%, 60-70%, 70-80%, 80-90% e 90-100%. Informações detalhadas sobre a AROC e o diagrama de confiabilidade podem ser encontradas em Coelho et al. (2019).

As previsões retrospectivas da OMJ do modelo do CPTEC e dos quatro modelos do S2S são avaliadas nos Capítulos-3 e 4. A OMJ foi representada por meio dos índices RMM1 e RMM2 (WHEELER; HENDON, 2004). A partir desses dois índices é possível determinar a amplitude (intensidade) e a fase (localização) da OMJ. O RMM1 e RMM2 são obtidos pela projeção da média meridional entre 15°N-15°S das anomalias de ROL e do vento zonal em 200 hPa e 850 hPa nos dois primeiros modos das FOEs combinadas definidas em Wheeler e Hendon (2004). Os índices RMM1 e RMM2 para os dados de referência (ROL da NOAA e vento meridional do ERA-Interim) e previsões retrospectivas foram calculados seguindo as seis etapas definidas em Gottschalck et al. (2010).

Com os índices RMM1 e RMM2 calculados para as previsões retrospectivas e para os dados de referência, a habilidade preditiva para as previsões da OMJ do modelo do CPTEC e dos modelos do projeto S2S avaliados foi determinada a partir da correlação bivariada (Equação 2.4) e do Erro Quadrático Médio Bivariado (EQMB) (Equação 2.5).

$$CB(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^n [\alpha_1(i) b_1(i, \tau) - \alpha_2(i) b_2(i, \tau)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [\alpha_1^2(i) - \alpha_2^2(i)] \sum_{\tau=i}^n [b_1^2(i, \tau) - b_2^2(i, \tau)]}} \quad (2.4)$$

$$EQMB(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{[\alpha_1(i) - b_1(i, \tau)]^2 + [\alpha_2(i) - b_2(i, \tau)]^2\} \quad (2.5)$$

onde a_1 e a_2 são os índices RMM1 e RMM2, respectivamente, calculados com os dados de referência, e $b_1(\tau)$ e $b_2(\tau)$ são as respectivas previsões dos índices RMM1 e RMM2 para um dado prazo de validade de previsão (τ).

Como destacado em Lim et al. (2018), a previsão climatológica da OMJ (i.e., previsões emitidas com valores de RMM1 e RMM2 iguais a 0) apresenta EQMB (Equação 2.5) igual a 2 (EQMBc), dado que os índices RMM1 e RMM2 apresentam desvio padrão igual a 1. Dessa forma, o prazo de validade com previsões úteis (i.e., período de validade de previsão em que um dado MCGA apresenta EQMB menor que o EQMBc) pode ser definido pelo limiar de 2 do EQMB. Além disso, Lim et al (2018) mostraram

que os índices de destreza correlação bivariada e o EQMB apresentam uma relação linear, e que o limiar de 0.5 para o valor de correlação bivariada é equivalente ao limiar de 0.5 do EQMB.

Conforme Lim et al. (2018), o EQMB foi decomposto em dois componentes, o erro associado com a amplitude da OMJ (EQMBa) e o erro associado com a fase da OMJ (EQMBf), definidos na Eq. 2.6 e na Eq. 2.7, respectivamente.

$$EQMBa(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{ [\sqrt{b_1^2(i, \tau) + b_2^2(i, \tau)}] - [\sqrt{a_1^2(i) + a_2^2(i)}] \}^2 \quad (2.6)$$

$$EQMBf(\tau) = EQMB(\tau) - EQMBa(\tau) \quad (2.7)$$

Todas as métricas de avaliação utilizadas aqui foram selecionadas porque são frequentemente usadas para a avaliação da qualidade das previsões sub-sazonais (HUDSON et al., 2011a; LIU et al., 2014; LI; ROBERTSON, 2015; VITART, 2017; LIM et al., 2018; COELHO et al., 2018, COELHO et al., 2019; DE ANDRADE et al., 2019; KLINGAMAN et al., 2020).

2.2.5 Determinação e representação das fontes de previsibilidade na escala sub-sazonal sobre a América do Sul

No Capítulo-5, os modos dominantes de variabilidade espaço-temporal das anomalias semanais de precipitação sobre a América do Sul foram determinados por meio da análise de FOEs (WILKS, 1995; HANNACHI et al., 2007). Esses modos estão associados a fenômenos atmosféricos/oceânicos, os quais estão ligados a oscilações na escala intrassazonal (e.g., OMJ) e interanual (e.g., ENOS). Para estudar a relação dos modos dominante sobre a América do Sul com os fenômenos/oscilações nas escalas intrassazonal e interanual foram utilizados métodos como correlação (simultânea e defasada), compostos e filtros temporais.

A análise das FOEs foi realizada para as anomalias semanais de precipitação sobre América do Sul (23°N-30°S e 260°W-340°W). As FOEs foram calculadas para as previsões retrospectivas do CPTEC e do ECMWF, e para os dados do GPCP, referentes às datas de inicialização do BAM-1.2 (Tabela 2.1), para as quatro semanas de previsão (linhas vermelhas na Figura 2.1) de forma separada. Com os modos dominantes de variabilidade espaço-temporal definidos, as componentes principais (também conhecidas como séries temporais) dos dois primeiros modos, determinados para as

anomalias semanais de precipitação do GPCP da semana-1, foram correlacionadas com os campos globais das anomalias semanais da ROL, TSM e função de corrente em 200 hPa de forma simultânea e defasada temporalmente. As correlações defasadas foram realizadas com os campos das anomalias de ROL, TSM e função de corrente adiantados 1, 2 e 3 semanas em relação à série temporal. A análise de correlação foi realizada para identificar possíveis influências de fenômenos atmosféricos/oceânicos na formação desses modos dominantes de precipitação sobre a América do Sul.

Em grande parte, os padrões de correlação entre as séries temporais das anomalias semanais de precipitação (GPCP) referentes à semana-1 e os campos das anomalias semanais de ROL, TSM e função corrente em 200 hPa apresentam uma estrutura ligada com a variabilidade interanual (Capítulo-5). Isso ocorre porque os padrões de teleconexão associados com a variabilidade intrassazonal são cancelados devido a interações entre diferentes oscilações que ocorrem nessa variabilidade temporal (PAEGLE; MO, 2000). Dessa maneira, o filtro de Lanczos (DUCHON, 1979) foi aplicado nos dados diários de precipitação do GPCP para separar as variabilidades entre 10-30 dias, 30-90 dias (essas duas dentro da variabilidade intrassazonal) e a variabilidade de baixa frequência, ou interanual, (obtida ao utilizar um filtro passa baixa de 120 dias). Com os dados diários do GPCP filtrados, as anomalias semanais e as FOEs foram recalculadas. No Capítulo-5, será mostrado que o padrão de dipolo meridional da anomalia de precipitação/convecção sobre o leste da América do Sul tropical (CASARIN; KOUSKY, 1986) é o modo dominante de variabilidade espaço-temporal sobre a América do Sul para as anomalias semanais de precipitação. Além disso, esse padrão de dipolo é notado também como o primeiro modo nas anomalias semanais não filtradas e na variabilidade interanual. Dessa maneira, o padrão de dipolo sobre a América do Sul foi associado a essas três variabilidades temporais. Além disso, o padrão de dipolo sobre a América do Sul foi associado com a OMJ nas fases 8/1 e 4/5 (WHEELER; HENDON, 2004), com eventos de ZCAS e com as fases do ENOS (El-Niño e La-Niña). Essas associações foram feitas por meio de compostos e de correlação linear. O segundo modo da análise de FOEs, apesar de não ser o padrão dominante sobre a América do Sul, aparentemente apresenta um forte impacto na habilidade preditiva sub-sazonal da precipitação sobre a região equatorial da América do Sul. Dessa forma, além da análise de correlação destacada acima, buscou-se encontrar a

relação do segundo modo FOE mais dominante com fenômenos atmosférico/oceânicos por meio de compostos das anomalias de circulação em 200 hPa e de ROL durante a fase ativa desse modo.

A estrutura espaço-temporal dos modos dominantes (definidos pela análise das FOEs) das anomalias semanais de precipitação do GPCP e das previsões retrospectivas dos modelos do CPTEC (BAM-1.2) e do ECMWF foram comparadas seguindo Lee et al. (2011). Dessa forma, a avaliação da representação das estruturas espaciais é definida pela correlação espacial (CE) entre o padrão espacial um determinado modo (μ) das anomalias do GPCP e das previsões retrospectivas para os 4 prazos de validade de previsão (τ). Do mesmo modo, a avaliação da representação da variabilidade temporal de um determinado modo (μ) em um determinado tempo de validade de previsão (τ) foi realizada pela correlação temporal (CT) entre as séries temporais do GPCP e das previsões retrospectivas do CPTEC e ECMWF. CE e CT foram calculados como mostrado na Equação 2.1. Para o CE, p_i e r_i são os valores adimensionais em cada ponto de grade do padrão espacial do modo de variabilidade (μ) encontrado na análise de FOEs nos dados da previsão retrospectiva e do GPCP (referência), respectivamente. Para o CT, p_i e r_i são os valores das séries temporais do modo (μ) da previsão retrospectiva e do GPCP, respectivamente. Dessa maneira o CT pode ser interpretado como a habilidade dos modelos do CPTEC e ECMWF em prever o modo de variabilidade (μ) em um dado prazo de validade da previsão (τ). As correlações espaciais e temporais foram calculadas para os três primeiros modos (definidos na análise de FOEs para os dados do GPCP) e para as quatro semanas de previsão (linhas vermelhas na Figura 2.1).

Por último, Lee et al (2011) destacaram que um determinado modo de variabilidade espaço-temporal pode ser considerado previsível se atender a dois critérios. No primeiro, o determinado modo de variabilidade (μ) deve representar uma grande parte da variabilidade total dos dados. No segundo, um determinado MCGA deve ser capaz de representar a estrutura espaço-temporal do modo de variabilidade (μ). O segundo critério é dado pela Equação 2.8.

$$RCET(\tau, \mu) = \sqrt{CE(\tau, \mu) * CT(\tau, \mu)} \quad (2.8)$$

A Equação 2.8 foi aplicada para os quatro primeiros modos para determinar se os modos de variabilidade espaço-temporal dominantes sobre a América do Sul podem ser previstos pelos modelos do CPTEC e ECMWF.

3 CONFIGURAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA BRASILEIRO GLOBAL DE PREVISÃO SUB-SAZONAL COM FOCO NA AMÉRICA DO SUL

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados referentes ao trabalho desenvolvido para examinar diferentes configurações do modelo global do CPTEC (BAM-1.2), com o objetivo de determinar a configuração mais adequada para a produção de previsões sub-sazonais. Diversos testes de sensibilidade foram realizados, resultando em um conjunto de sete experimentos construídos a partir da combinação de diferentes parâmetros de configuração do BAM-1.2. Como destacado na Seção 2.2.2, os parâmetros de configuração avaliados foram: resolução vertical (42 e 64 níveis); parametrização de convecção (Arakawa-Schubert e Grell-Dévényi), parametrização de camada limite (Bretherton-Park e Mellor-Yamada), inicialização da umidade do solo (climatologia e GLDAS - atualizada com as condições observadas próximo à data de inicialização), e condição inicial (ERA-Interim e FNL). Todos esses parâmetros foram analisados de forma determinística a partir de previsões retrospectivas das anomalias semanais de precipitação e de T2M, e da evolução diária da OMJ. Partes dos resultados apresentados neste capítulo foram publicados na revista *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* no trabalho intitulado “*Configuration and Hindcast Quality Assessment of a Brazilian Global Sub-Seasonal Prediction System*” (GUIMARÃES et al. 2020).

3.2 Fundamentação teórica

Nos anos de 1980, houve interesse de alguns centros operacionais de meteorologia na emissão de prognósticos na escala sub-sazonal [e.g., Miyakoda et al (1983)]. Contudo, os resultados encontrados inicialmente não foram satisfatórios (VITART, 2014). Entretanto, a partir de novas iniciativas realizadas no começo dos anos 2000, o interesse no prognóstico sub-sazonal, tanto pela comunidade acadêmica quanto pelos centros operacionais de meteorologia, foi impulsionado por conta dos resultados promissores evidenciados desde então. Assim, o projeto S2S foi implementado no ano de 2013 com o objetivo avançar no conhecimento sobre as variações sub-sazonais da atmosfera e o potencial de previsibilidade nessa escala de tempo, buscando fornecer previsões sub-sazonais mais confiáveis para diferentes atividades sócio-econômicas.

Para atingir esses objetivos, foi criado o banco de dados do projeto S2S que contém previsões sub-sazonais (até 60 dias) quase em tempo real e previsões sub-sazonais retrospectivas de 11 centros operacionais e de pesquisa em meteorologia, os quais são: *Australian Bureau of Meteorology (BoM)*, *China Meteorological Administration (CMA)*, *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*, *Environment and Climate Change Canada (ECCC)*, *Institute of Atmospheric Sciences and Climate of the National Research Council (CNR-ISAC)*, *Hydrometeorological Centre of Russia (HMCR)*, *Japan Meteorological Agency (JMA)*, *Korea Meteorological Administration (KMA)*, *Météo-France/Centre National de Recherche Meteorologiques (CNRM)*, *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* e *United Kingdom's Met Office (UKMO)* (VITART et al., 2017).

O projeto S2S tem um papel importante no incentivo a inclusão dos prognósticos sub-sazonais nas atividades rotineiras de centros operacionais e também na produção de conhecimento científico com o objetivo de aperfeiçoar a qualidade dessas previsões. Além disso, o projeto S2S aborda várias questões com respeito à variabilidade, fontes de previsibilidade e modelagem na escala sub-sazonal, tais como:

- Qual é o benefício de uma previsão composta por um conjunto de vários modelos para previsões sub-sazonais e como esse conjunto pode ser construído e implementado?
- Qual é a habilidade preditiva de eventos extremos e como identificar “janelas de oportunidade” para previsões sub-sazonais?
- Como fazer a inicialização da melhor forma para um sistema de previsão que inclui oceano, condições de superfície e criosfera?
- Qual é o método mais apropriado de geração de previsões sub-sazonais por conjunto?
- Qual é o impacto da resolução horizontal e vertical dos modelos atmosféricos e oceânicos no prognóstico sub-sazonal?
- Quais são as fontes dos erros sistemáticos que afetam as previsões sub-sazonais?
- Quão bem os modelos de última geração representam teleconexões tropicais - extratropicais?

- Qual é a capacidade atual das previsões dos modelos que estão na base de dados do S2S em representar características meteorológicas diárias relevantes para diferentes setores sócio-econômicos, tais como: agricultura, gerenciamento de recursos hídricos e saúde pública?
- Qual é o atual nível de conhecimento das fontes de previsibilidade e dos processos dinâmicos da variabilidade sub-sazonal?

Recentemente, o projeto denominado *Subseasonal Experiment* (SubX) também foi implementado para permitir a exploração de questões relevantes sobre as variações sub-sazonais da atmosfera e a habilidade preditiva dos MCGAs nessa escala temporal (PEGION et al., 2019). Assim como o projeto S2S, o projeto SubX apresenta um conjunto de dados com previsões retrospectivas e também previsões experimentais em tempo real de 7 MCGAs de centros de operação e/ou de pesquisas da América do Norte, incluindo os modelos do NCEP e ECCO que participam também do projeto S2S.

Após o estabelecimento desses dois projetos (S2S e SubX), trabalhos que avaliam a habilidade preditiva dos MCGAs, estudam o papel de fenômenos atmosféricos/ocêânicos e exploram outros fatores sobre a escala sub-sazonal têm se tornado cada vez mais frequentes. Tais trabalhos costumam abordar essas problemáticas separando o tempo de integração dos MCGAs (que geralmente é em torno de 30-40 dias) em médias ou acumulados semanais. Atualmente, o desempenho dos MCGAs apresenta algumas limitações a partir da terceira semana de previsão, principalmente em relação aos prognósticos das anomalias semanais de precipitação. Os índices de destreza mostram que a habilidade preditiva dos MCGAs na escala sub-sazonal é limitada geograficamente, com resultados pronunciados na região tropical (VITART, 2004; MASTRANGELO et al., 2012; LI; ROBERTSON, 2015; LIANG; LI, 2017; COELHO et al., 2018; DE ANDRADE et al., 2019). Com respeito às fontes de previsibilidade na escala sub-sazonal, vários trabalhos destacam, principalmente, o papel da OMJ e do ENOS, os quais determinam o padrão espacial da habilidade preditiva dos MCGAs, dado que esses padrões correspondem com os padrões de teleconexões do ENOS e da OMJ (LI; ROBERTSON, 2015; ANDRADE et al., 2019).

Li e Robertson (2015) mostraram que, em certas regiões, as previsões sub-sazonais das anomalias semanais de precipitação apresentam um melhor desempenho quando

inicializadas durante eventos de ENOS intensos. Por exemplo, os autores mostraram que, no geral, a habilidade preditiva dos MCGAs aumenta para previsões inicializadas durante ambas as fases do ENOS (El-Niño e La-Niña), principalmente sobre a região tropical do Oceano Pacífico. Entretanto, também foi verificado que a habilidade preditiva dos MCGAs diminui durante a manifestação desses eventos em determinadas regiões, incluindo algumas regiões da América do Sul.

Resultados semelhantes foram encontrados por Liang e Lin (2017), os quais mostraram que as previsões sub-sazonais de T2M e altura geopotencial em 500 hPa do modelo do ECCO apresentam índices de destrezas mais satisfatórios sobre a região do leste da Ásia quando inicializadas durante episódios fortes de ENOS e/ou de OMJ. Adicionalmente, a influência das ondas de Rossby sobre Oceano Atlântico Norte foi destacada como uma possível fonte de previsibilidade sub-sazonal para as anomalias de T2M sobre o leste da Ásia. Dado esses fatores, os autores destacaram que o sistema de previsão sub-sazonal do ECCO é capaz de representar satisfatoriamente as variações na escala intrassazonal que ocorrem no sistema de monção do leste da Ásia.

Entretanto, Klingaman et al. (2020) destacaram que, sobre a América do Sul, as previsões das anomalias semanais de precipitação inicializadas durante eventos de ENOS e/ou OMJ apresentam índices de destreza semelhantes aos das previsões inicializadas nas fases neutras dessas duas oscilações. Segundo os autores, essa característica pode estar ligada a limitações dos MCGAs em representar os padrões de teleconexões do ENOS e da OMJ sobre a América do Sul.

Hudson et al. (2011a) mostraram que a habilidade preditiva do modelo do BoM para previsões sub-sazonais de precipitação sobre a Austrália aumenta durante eventos de ENOS, Dipolo do Oceano Índico e do Modo Anular Sul. Entretanto, os autores não encontraram influência da OMJ para o aumento da habilidade preditiva no modelo do BoM sobre a Austrália. Assim como Klingaman et al. (2020), Hudson et al (2011a) destacaram que isso pode estar ligado a limitações do modelo do BoM em simular a relação entre a OMJ e a precipitação sobre a Austrália.

Em uma perspectiva global, Schreck et al (2020) mostraram que a habilidade preditiva sub-sazonal de precipitação do modelo do NCEP, para prazos de validade a partir de terceira semana de previsão, é similar a habilidade preditiva quando apenas anomalias

semanais de precipitação de baixa frequência são avaliadas (i.e., variações relacionadas a fenômenos na escala de tempo interanual). Em outras palavras, Schreck et al (2020) mostraram que o modelo do NCEP não é capaz de prever variações de precipitação semanal ligadas a variabilidade intrassazonal para previsões com prazos de validade mais longos. Características similares também foram destacadas por Pegion et al (2019) com relação aos modelos que participam do projeto SubX.

Os resultados dos trabalhos citados acima mostram o desafio de se obter índices de destreza satisfatórios na escala sub-sazonal e que, no geral, a maior parte da habilidade preditiva dos MCGAs é relacionada a fenômenos de baixa frequência (e.g., ENOS). Esse desafio é ainda maior sobre as regiões extratropicais, dado as limitações dos MCGAs em representar os padrões de teleconexões trópicos-extratrópicos de forma satisfatória, particularmente após a segunda semana de previsão (DE ANDRADE et al., 2019). Por exemplo, Vitart (2017) mostrou que os modelos do projeto S2S não exploram de forma completa a previsibilidade proveniente da OMJ sobre as regiões extratropicais do Hemisfério Norte (i.e., interações trópicos-extratrópicos). Segundo Vitart (2017), o refinamento da resolução espacial dos MCGAs é uma condição importante para representar de forma mais fiel às interações trópicos-extratrópicos, dado que os modelos do projeto S2S que apresentam baixa resolução espacial tendem a representar os padrões de teleconexão trópicos-extratrópicos de forma menos intensa.

Além de melhorias na representação dos padrões de teleconexões, trabalhos destacam que a habilidade preditiva dos MCGAs na escala sub-sazonal pode ser aprimorada por meio da utilização de inicializações de umidade do solo mais realísticas (e.g., KOSTER et al., 2010). Todavia, trabalhos que abordam esse tema, costumam quantificar o impacto da inicialização da umidade do solo na habilidade preditiva dos MCGAs a partir de simulações e não por meio de previsões retrospectivas (i.e., as condições avaliadas não podem ser reproduzidas em condições de previsões em tempo real). Por exemplo, Drewitt et al. (2012) estudaram o impacto da inicialização da umidade do solo na previsão sub-sazonal de T2M e precipitação, utilizando o modelo de previsão sazonal do ECCO, a partir de duas simulações distintas. A primeira simulação foi inicializada com valores aleatórios de umidade do solo, enquanto que a segunda simulação foi inicializada com valores realísticos de umidade do solo, gerados a partir de simulações do modelo de superfície terrestre *offline*. Nesse sentido, Drewitt et al. (2012) mostram

que a habilidade preditiva do ECCO aumentou na simulação inicializada com a umidade do solo realística. Entretanto, o aumento na habilidade preditiva é notado em regiões específicas (e.g., sobre a América do Norte). Além disso, o aumento na habilidade preditiva é mais intenso para a previsão de T2M do que para a previsão da precipitação. Resultados semelhantes foram encontrados por Koster et al. (2010) e Koster et al., (2011).

Determinados fenômenos que ocorrem na estratosfera (e.g., oscilação quase-bianual e vórtice polar) também podem contribuir para a habilidade preditiva dos MCGAs na escala sub-sazonal. Domeisen et al (2020) mostraram que durante a ocorrência de eventos de vórtice polar, os índices de destreza aumentam em certos modelos do projeto S2S para o prognóstico sub-sazonal de T2M sobre determinadas regiões do Hemisfério Norte (e.g., América do Norte), principalmente nos modelos que apresentam resolução vertical mais refinada na estratosfera.

A literatura também apresenta trabalhos que examinam o papel das condições iniciais em modular a qualidade das previsões sub-sazonais em relação ao efeito das condições de contorno proveniente da TSM (PHELPS et al., 2004; REICHLER; ROADS, 2005; CHEN et al., 2010; KUMAR et al., 2011). Essa é uma questão importante, visto que a previsão sub-sazonal se encontra entre a previsão de tempo, fortemente dependente das condições iniciais da atmosfera, e a previsão de clima sazonal, a qual é dominada pelas forçantes de contorno superficiais. Por meio de simulações, Reichler e Roads (2005) mostraram que as condições iniciais da atmosfera dominam a habilidade das previsões sub-sazonais até a terceira semana de previsão na região tropical para os prognósticos de circulação, temperatura e precipitação. Os autores destacaram que o papel das condições iniciais é maior no Hemisfério Leste e durante eventos inativos de ENOS. Kumar et. al. (2011) mostraram que as condições iniciais da atmosfera são mais importantes nas regiões extratropicais do que nas regiões tropicais e que após uma duração de aproximadamente 30-40 dias de integração do modelo, a habilidade dos MCGAs para o prognóstico da média mensal de precipitação e circulação em 200 hPa é essencialmente dependente das condições de contorno de TSM.

Com relação às previsões retrospectivas dos modelos do projeto S2S, de Andrade et al. (2019) mostraram que, no geral, os maiores índices de destreza para o prognóstico sub-

sazonal das anomalias semanais de precipitação são notados nos modelos que apresentam acoplamento atmosfera-oceano. Além disso, os autores destacaram que modelos que não apresentam acoplamento atmosfera-oceano também mostram desempenho satisfatório, os quais foram notados para os modelos do JMA e do ECCC. Dos 11 modelos disponibilizados no projeto S2S, sete deles apresentam acoplamento atmosfera-oceano (ECMWF, BoM, NCEP, CMA, UKMO, CNRM e KMA), 3 não apresentam acoplamento com o componente oceânico (JMA, ECCC e HMCR) e apenas 1 utiliza um modelo oceânico simplificado (ISAC) (VITART et al., 2017). Recentemente, previsões retrospectivas do modelo do ECCC com acoplamento atmosfera-oceano foram disponibilizadas no conjunto de dados do projeto S2S.

Com relação ao impacto do acoplamento para a destreza de previsão da OMJ, Vitart (2017) mostrou que, embora os dois melhores modelos do projeto S2S apresentem o componente de acoplamento atmosfera-oceano, os modelos que são forçados com TSM persistida (e.g., não apresentam acoplamento atmosfera-oceano) apresentam índices de destreza equivalente aos sistemas que apresentam acoplamento atmosfera-oceano. Esses resultados foram corroborados por Lim et al., (2019). Adicionalmente, Pegion et al. (2019) mostraram que, entre os dois melhores modelos do projeto SubX para a previsão da OMJ, apenas um dos modelos apresenta acoplamento atmosfera-oceano. Entretanto, o conjunto do sistema que apresenta o componente atmosfera-oceano é composto por apenas 4 membros, enquanto que o modelo que não apresenta acoplamento atmosfera-oceano é composto por um conjunto com 11 membros. Isso sugere que uma possível desvantagem apresentada pelos modelos que não apresentam acoplamento atmosfera-oceano pode ser balanceada com o aumento do tamanho do conjunto de previsões.

3.3 Resultados

3.3.1 Avaliação das previsões sub-sazonais determinísticas de precipitação e T2M das sete configurações do BAM-1.2

Nesta Seção, as previsões retrospectivas das anomalias semanais de precipitação e T2M das sete configurações do modelo BAM-1.2 (Tabela 2.2) são avaliadas. Cada configuração é composta por apenas o membro controle, dado que o conjunto de previsões sub-sazonais foi gerado apenas para a configuração do BAM-1.2 mais adequada para a previsão sub-sazonal definida neste capítulo. Desse modo, as sete

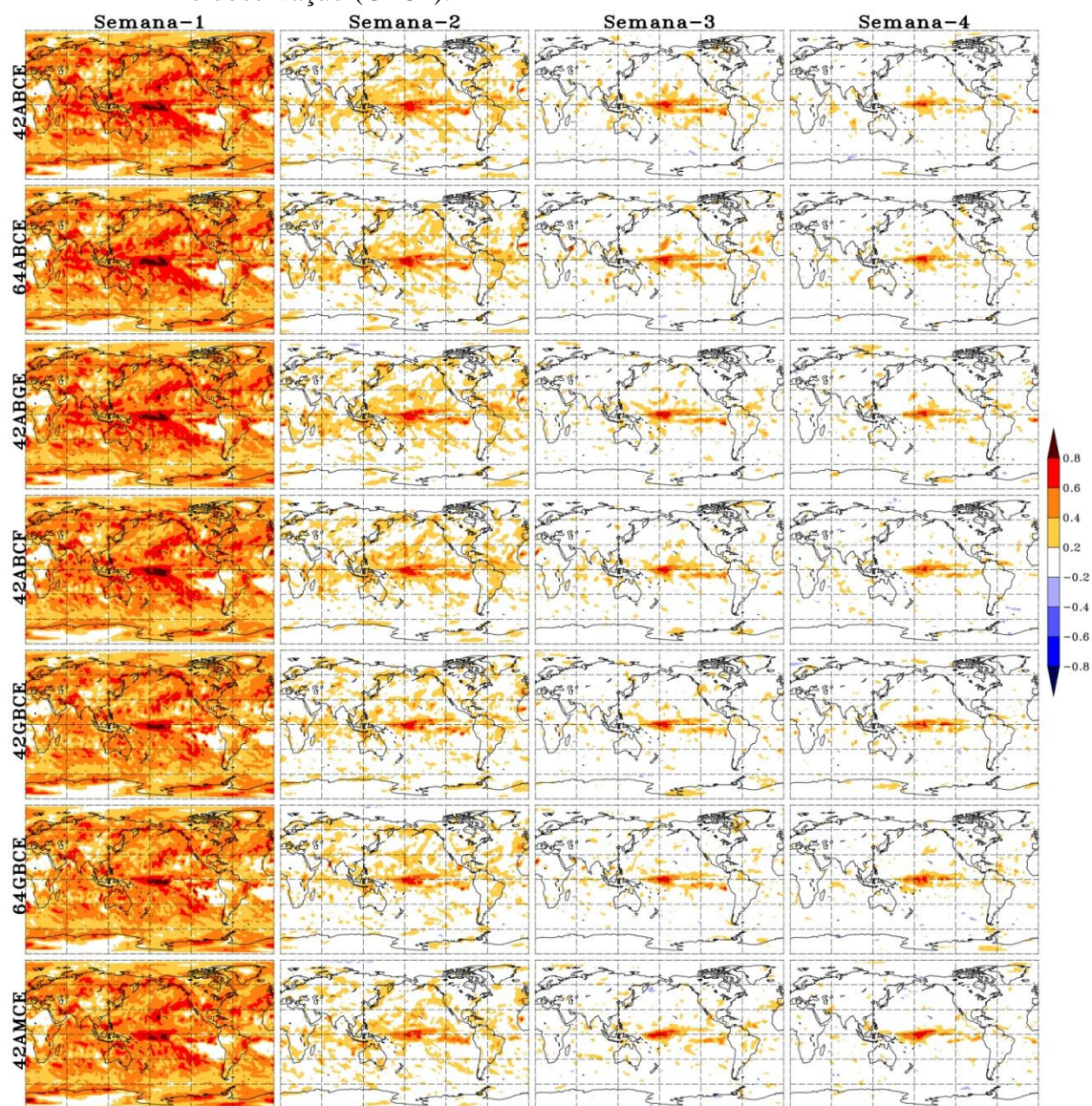
configurações foram avaliadas em uma perspectiva determinística. Os índices de destrezas foram comparados entre as sete configurações com o objetivo de determinar quais dos parâmetros de configuração contribuem para a habilidade preditiva sub-sazonal do BAM-1.2.

A Figura 3.1 mostra o padrão espacial dos coeficientes de correlação entre as anomalias de precipitação das previsões retrospectivas e das observações (GPCP). As previsões retrospectivas foram analisadas para as sete configurações do BAM-1.2 (linhas) e para as quatro semanas de prazo de validade das previsões (colunas). As previsões retrospectivas apresentam uma amostra de 120 previsões, com 2 inicializações em cada um dos 5 meses do verão estendido (uma próxima ao primeiro dia e outra próxima ao dia 15 do mês) dos 12 anos avaliados (1999/2000 – 2010/2011), como mostrado na Tabela 2.1. Com o teste t de Student para a hipótese nula de correlação zero, o valor de correlação de 0.2 é estatisticamente significativo ao nível de 5%.

Em geral, os valores de correlação são maiores durante a primeira semana de previsão e reduzem de forma acentuada à medida que o prazo de validade de previsão aumenta nas sete configurações (Figura 3.1). A redução nos valores de correlação é mais pronunciada entre as semanas-1 e 2 quando comparada as semanas subsequentes. As sete configurações mostram maiores valores de correlação sobre o Hemisfério Norte do que sobre o Hemisfério Sul durante as semanas-1 e 2. Isso ocorre porque os padrões de teleconexão trópico-extratropical, gerados principalmente pela OMJ, são mais intensos sobre o Hemisfério Norte do que sobre o Hemisfério Sul entre os meses de novembro-março (STAN, 2019). Além disso, os MCGAs representam de maneira mais realística os sistemas baroclínicos sobre o hemisfério de inverno por conta das condições mais favoráveis para a instabilidade baroclínica (ZHU et al., 2014). A partir da terceira semana de previsão, valores de correlação menores que 0.2 são notados em praticamente todas as regiões extratropicais. Isso ocorre porque a habilidade preditiva associada à condição inicial é substancialmente reduzida, além da própria imprevisibilidade inerente da variabilidade atmosférica extratropical para os prazos de entrega mais longos (ZHANG et al., 2019). Isso ilustra que a habilidade preditiva do BAM-1.2 sobre regiões de latitudes médias além de 15 dias é limitada para as previsões retrospectivas com o membro controle. Nas semanas-3 e 4 (duas últimas colunas na Figura 3.1), valores estatisticamente significantes de correlação são notados apenas

sobre a região tropical do Oceano Pacífico, algumas áreas no norte da América do Sul, sobre o Oceano Atlântico Equatorial e sobre o Oceano Índico Tropical. Tais valores de correlação podem ser associados à previsibilidade oriunda de fenômenos como o ENOS e a OMJ (LI; ROBERTSON, 2015; DE ANDRADE et al., 2019; SCHRECK et al., 2020). Todas as sete configurações mostram valores de correlação baixos sobre as altas subtropicais e regiões desérticas a partir da primeira semana de previsão. Este fato está ligado à baixa capacidade dos MCGAs em representar baixas taxas de precipitação que ocorrem sobre essas regiões (WHEELER et al, 2017). Essas características fazem com que as sete configurações apresentem um padrão espacial semelhante entre si.

Figura 3.1 - Correlação entre as anomalias semanais de precipitação das previsões retrospectivas e observação (GPCP).



As correlações foram computadas para as sete configurações do BAM-1.2 (42ABCE, 64ABCE, 42ABGE, 42ABCF, 42GBCE, 64GBCE e 42AMCE) (linhas) nas quatro semanas de previsão (colunas). As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011 (como na Tabela 2.1), formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada configuração.

Fonte: Produção do Autor.

Embora as sete configurações apresentem praticamente o mesmo padrão espacial nas quatro semanas de previsão, nota-se uma variação nos valores de correlação entre as configurações. De maneira geral, as quatro configurações compostas com a parametrização Arakawa-Schubert (convecção profunda) e com a parametrização

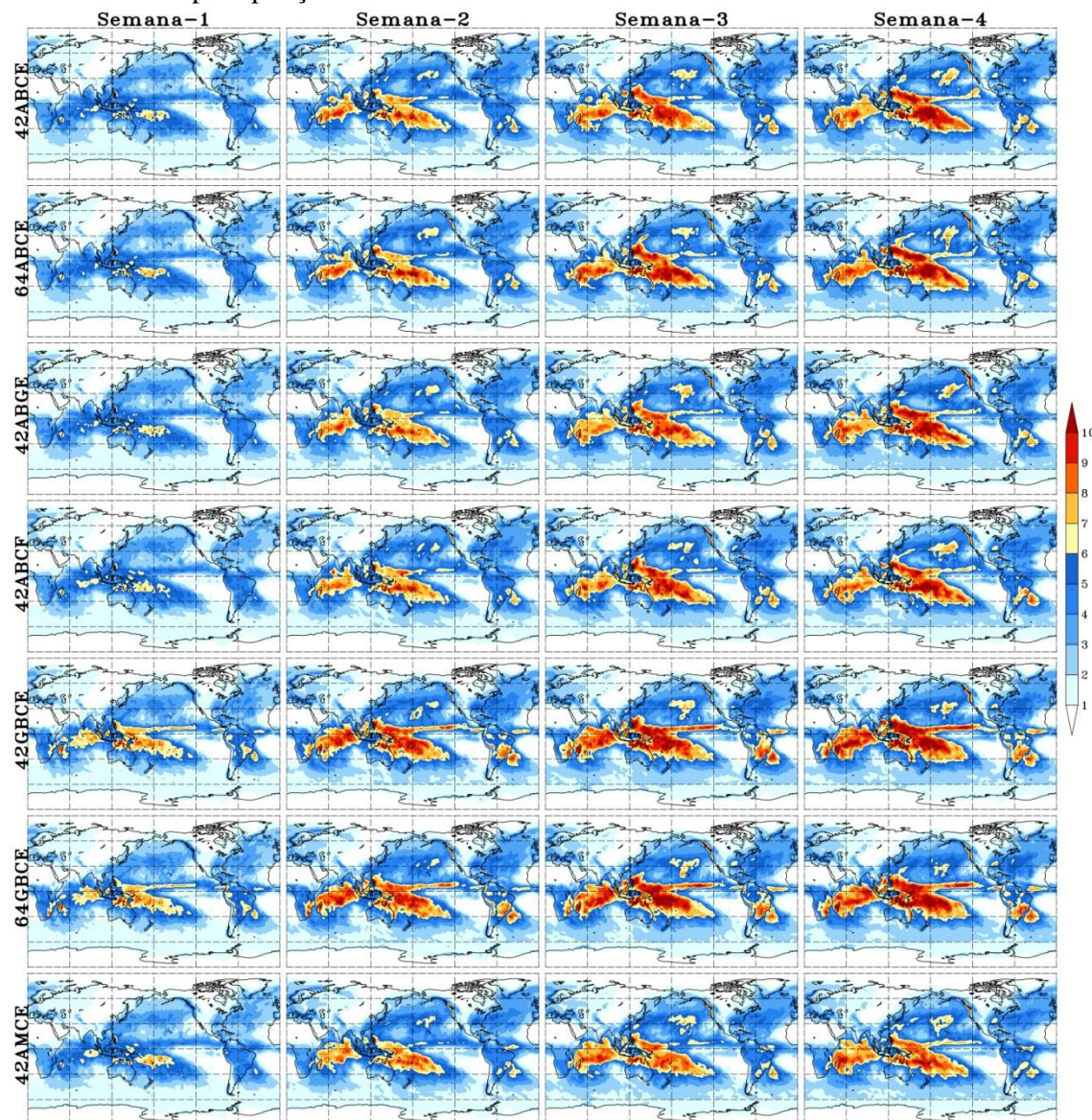
Bretherton-Park (camada limite) (linhas 42ABCE, 64ABCE, 42ABGE e 42ABCF na Figura 3.1) apresentam valores positivos de correlação ligeiramente maiores nas duas primeiras semanas de previsão do que as outras três configurações (linhas 42GBCE, 64GBCE e 42AMCE). As diferenças são mais marcantes com relação às parametrizações de convecção profunda. Ou seja, o contraste entre os valores de correlação é mais pronunciado ao comparar os experimentos 42ABCE e 64ABCE (configurados com Arakawa-Schubert) com os experimentos 42GBCE e 64GBCE (configurados com Grell-Dévényi). Tal fato pode estar ligado com a melhor representação vertical das fontes de calor diabáticas sobre a região equatorial na versão do BAM-1.2 configurado com a parametrização Arakawa-Schubert. Embora o contraste entre as configurações que apresentam diferentes parametrizações de camada limite não seja tão marcante quanto o contraste notado para a parametrização da convecção profunda, nota-se que, de modo geral, a configuração 42ABCE (Bretherton-Park) apresenta valores de correlação ligeiramente maiores do que a configuração 42AMCE (Mellor-Yamada). Sugere-se que a parametrização Bretherton-Park possa representar melhor o transporte turbulento no topo da camada limite, resultando em um impacto positivo na qualidade da previsão da precipitação do BAM-1.2. Em contrapartida, durante as semanas-3 e 4, as diferenças entre os valores de correlação das sete configurações são menos acentuadas. Curiosamente, o aumento da resolução vertical não resultou no aumento dos valores de correlação para as previsões das anomalias semanais de precipitação em todos os prazos de validade de previsão. Por exemplo, os valores de correlação das configurações 42ABCE e 64ABCE são semelhantes. Isso também é notado ao comparar as configurações 42GBCE e 64GBCE. Essa característica pode estar ligada com a baixa resolução vertical da condição inicial (reanálise ERA-Interim) que apresenta apenas 37 níveis na vertical, sendo estes interpolados para as resoluções verticais de 42 e 64 níveis verticais. Outra possível explicação para tal resultado é a compatibilidade entre as resoluções horizontal e vertical (LINDZEN; FOX-RABINOVITZ, 1989). O uso de 42 e 64 níveis verticais mostrou-se insuficiente para detectar impacto na destreza das previsões da precipitação na resolução horizontal T126. A diferença na inicialização da umidade do solo também não induziu mudanças nos valores de correlação das configurações avaliadas (42ABCE e 42ABGE). As previsões retrospectivas inicializadas com os dados mensais do GLDAS (linha

42ABGE), referente às condições de umidade do solo observadas no mês anterior ao mês da inicialização, apresentam praticamente os mesmos valores de correlação das previsões inicializadas com a umidade do solo climatológica (linha 42ABCE). A pequena contribuição da inicialização da umidade do solo para as previsões sub-sazonais de precipitação também é destacada em outros trabalhos, e.g., Koster et al. (2011) e Drewitt et al. (2012). Com relação à inicialização do componente atmosférico, as configurações 42ABCE (ERA-Interim) e 42ABCF (FNL) apresentam aproximadamente os mesmos valores de correlação. Isso sugere que as previsões inicializadas com a reanálise Era-Interim e FNL não modificam a habilidade preditiva do BAM-1.2.

A Figura 3.2 mostra o padrão espacial dos valores de REQM das sete configurações do BAM-1.2 (linhas) para as quatro semanas de previsão (colunas). Os maiores valores de REQM são encontrados sobre a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Oceano Índico, Continente Marítimo, Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), as quais são regiões com forte variabilidade sub-sazonal (LIU et al., 2014). O BAM-1.2 mostra valores de REQM elevados sobre Madagascar, Norte da Austrália e ZCPS a partir da semana-1 quando comparado com outras regiões. O erro cresce com o aumento do prazo de validade de previsão, principalmente sobre o Oceano Índico, Pacífico Oeste e ZCAS. Como notado para os valores de correlação, o erro cresce de forma mais acentuada entre as semanas-1 e 2 do que entre as semanas-2 e 3 e semanas-3 e 4. No geral, o padrão espacial e magnitude dos valores de REQM para as previsões das semanas-3 e 4 são semelhantes. As configurações com a parametrização Grell-Dévényi (linhas 42GBCE e 64GBCE na Figura 3.2) apresentam os maiores valores de REQM sobre as regiões mencionadas acima. Ou seja, a parametrização Arakawa-Shubert apresenta resultados melhores do que a parametrização Grell-Dévényi para a previsão das anomalias semanais de precipitação do BAM-1.2, dado que os índices de destreza indicam maior qualidade para os experimentos configurados com a parametrização Arakawa-Shubert. Outra característica que apresenta impacto nos valores de REQM do BAM-1.2 é a parametrização de camada limite. Nas semanas-3 e 4, nota-se que a configuração com a parametrização de camada limite Mellor-Yamada (linha 42AMCE na Figura 3.2) apresenta os menores valores de REQM, principalmente sobre a região do Oceano

Pacífico Oeste. Como destacado anteriormente, os demais parâmetros avaliados não apresentam mudanças expressivas nos valores de REQM.

Figura 3.2 - Valores de REQM das previsões retrospectivas das anomalias semanais de precipitação.



Os valores de REQM ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$) para as sete configurações do BAM-1.2 (linhas) e para as quatro semanas de previsão (colunas). As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011 (como na Tabela 2.1), formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada configuração.

Fonte: Produção do autor.

Ao analisar os resultados anteriores com foco sobre a América do Sul, nota-se que todas as configurações apresentam o mesmo padrão espacial dos valores de correlação (Figura

3.1), assim como notado no padrão global. No geral, as configurações apresentam os maiores valores de correlação sobre o leste da América do Sul, principalmente nas duas primeiras semanas de previsão sobre regiões influenciadas pelo padrão de dipolo meridional da América do Sul (CASARIN; KOUSKY, 1986). Valores de correlação acima de 0.2 podem ser notados sobre essas regiões em determinadas configurações (e.g., 42ABCE) durante a semana-3 de previsão. Entretanto, os valores de correlação são confinados em áreas restritas, dado que cada configuração é composta apenas pelo membro controle. O desempenho do conjunto de previsões sub-sazonais do BAM-1.2 com 11 membros sobre a região influenciada pelo padrão de dipolo é destacado nos Capítulos-4 e 5. Todas as configurações apresentam valores de correlação acima de 0.2 até a quarta semana de previsão sobre o norte da América do Sul. Contudo, todas as configurações apresentam valores de correlação baixos sobre a região da bacia Amazônica a partir da primeira semana de previsão.

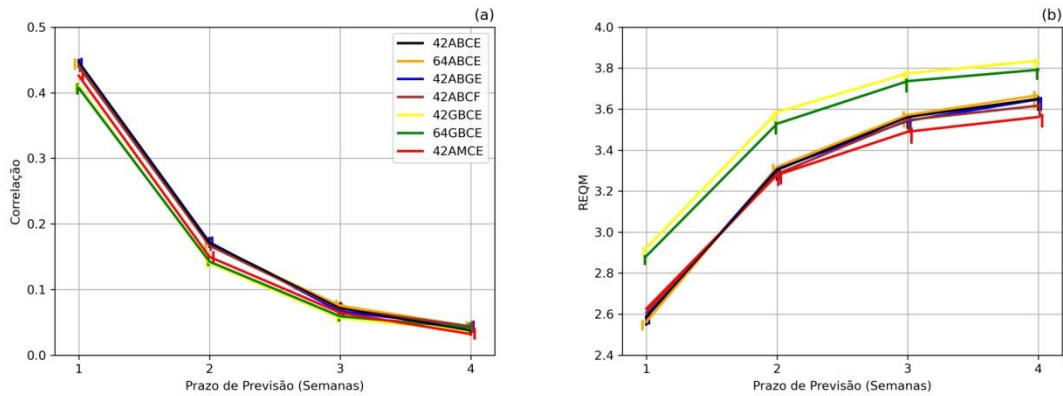
Com relação ao desempenho das sete configurações avaliadas sobre a América do Sul, nota-se que os experimentos configurados com as parametrizações Arakawa-Schubert (convecção profunda) e Bretherton-Park (camada limite) (linhas 42ABCE, 64ABCE, 42ABGE e 42ABCF nas Figuras 3.1 e 3.2) apresentam os melhores índices de destreza (correlação e REQM), assim como notado na análise global. Da mesma forma, as inicializações da umidade do solo e da atmosfera, e o aumento da resolução vertical não apresentaram impacto expressivo na habilidade preditiva do BAM-1.2 para a previsão das anomalias semanais de precipitação sobre a América do Sul.

Para notar os contrastes entre as configurações do BAM-1.2 de forma mais clara, a Figura 3.3 mostra as médias dos valores de correlação e dos valores de REQM nos painéis (a) e (b), respectivamente para a região entre 60°N e 60°S em função do prazo de validade de previsão para as sete configurações. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95% calculado por meio do método de reamostragem (bootstrap) com 1000 amostras. As sete configurações apresentam uma queda quase exponencial nos valores de correlação em função do aumento do prazo de validade da previsão. No geral, as configurações apresentam valores médios de correlação similares, principalmente nas duas últimas semanas de previsão. Entretanto, é possível notar que os experimentos configurados com as parametrizações Arakawa-Shubert (convecção profunda) e Bretherton-Park (camada limite) (42ABCE, 64ABCE, 42ABGE e 42ABCF)

apresentam valores médios de correlação ligeiramente superiores aos experimentos configurados com as parametrizações Grell-Dévényi (convecção profunda) e Mellor-Yamada (camada limite) (42GBCE, 64GBCE e 42AMCE) nas duas primeiras semanas de previsão. Por exemplo, a configuração 42ABCE (linha preta) apresenta valor médio de correlação igual a 0.45 na semana-1, o qual diminui para 0.18 na semana-2. Esses valores são iguais a 0.40 e 0.14 para a configuração 42GBCE durante as semanas-1 e 2, respectivamente. Desse modo, o intervalo de confiança de 95% para a configuração 42ABCE (barras verticais pretas) não se sobrepõe ao intervalo de confiança de 95% para a configuração 42GBCE (barras verticais amarelas). Característica similar é notada ao comparar as parametrizações de camada limite Bretherton-Park e Mellor-Yamada (linha preta vs., linha vermelha). Isso ilustra que a configuração 42ABCE é superior as configurações 42GBCE e 42AMCE nos prazos de previsão mais curtos. Como destacado na Figura 3.1, as mudanças na resolução vertical e nas inicializações da atmosfera e da umidade do solo não mostram um incremento nos valores de correlação, dado que o contraste entre essas configurações é menor do que o intervalo de confiança de 95% em todos os prazos de validade de previsão.

O valor médio de REQM para a região entre 60°N e 60°S (Figura 3.3b) ressalta o contraste entre os experimentos configurados com diferentes parametrizações de convecção profunda (Arakawa-Shubert e Grell-Dévényi). As configurações 42GBCE e 64GBCE (linhas amarela e verde, respectivamente) apresentam os maiores valores de REQM nas quatro semanas de previsão. As diferenças dessas duas configurações em relação às demais configurações são maiores do que o intervalo de confiança de 95%, o que mostra uma melhor representatividade da precipitação ao usar a parametrização Arakawa-Shubert. Curiosamente, o contraste entre os experimentos configurados com Bretherton-Park e com Mellor-Yamada, notado na Figura 3.3a não é encontrado na Figura 3.3b. Como destacado anteriormente, as mudanças na resolução vertical e nas inicializações da atmosfera e da umidade do solo não alteram substancialmente o erro das previsões semanais do BAM-1.2.

Figura 3.3 – Médias espaciais dos valores de correlação (a) e REQM (b).



As médias foram computadas entre as latitudes de 60°N-60°S dos valores de correlação (a) e REQM (b) entre as previsões retrospectivas das sete configurações do BAM-1.2 e a observação (GPCP) para as quatro semanas de previsão. As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada configuração. As barras verticais plotadas em torno das quatro semanas de previsão para cada modelo representam o intervalo de confiança de 95%, calculado por meio de reamostragem (bootstrap) com 1000 amostras.

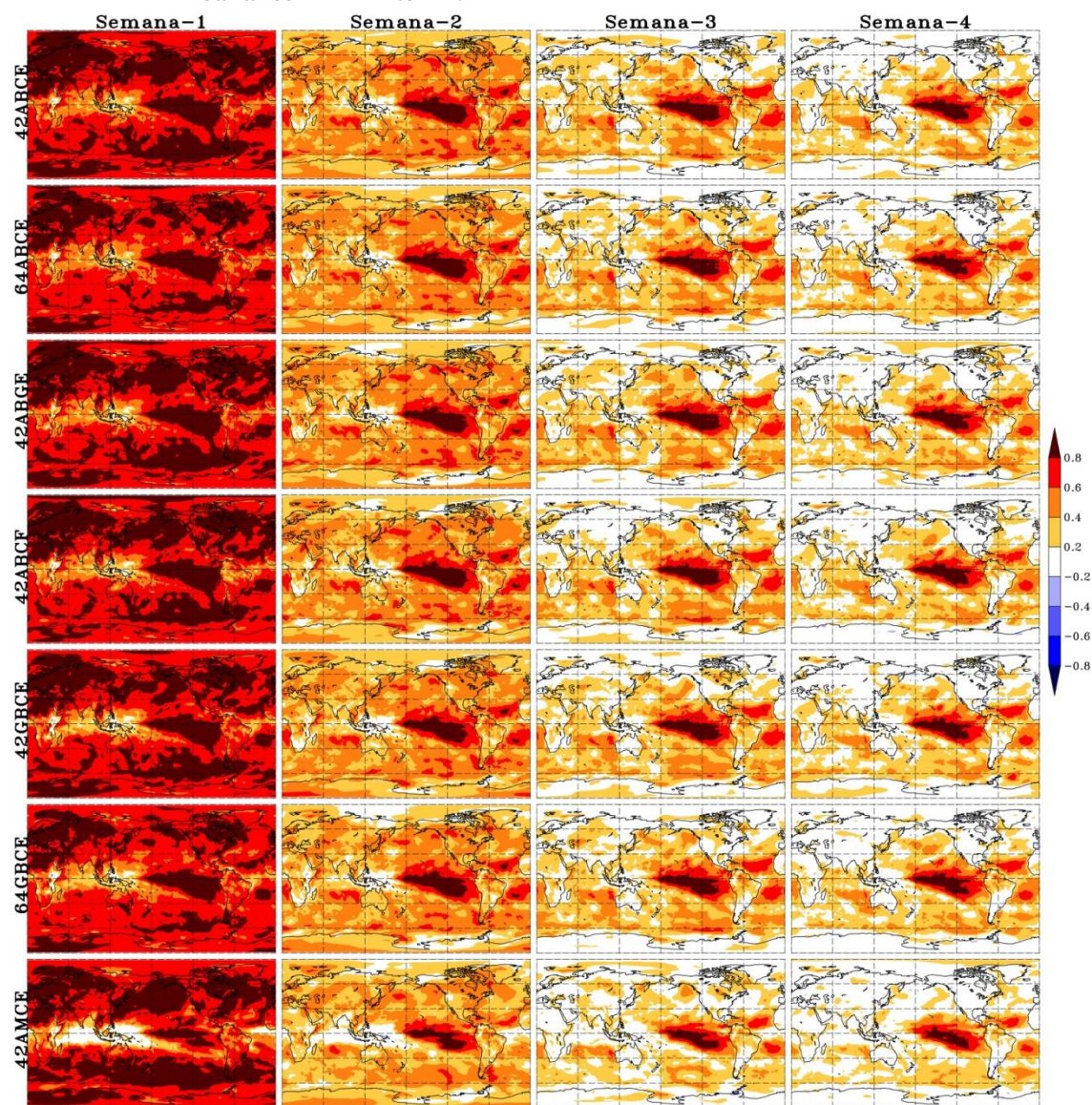
Fonte: Produção do autor.

A Figura 3.4 mostra os valores de correlação calculados entre as previsões retrospectivas das sete configurações e as reanálises ERA-Interim para as anomalias semanais de T2M, assim como realizado para as anomalias semanais de precipitação. O BAM-1.2 mostra melhor desempenho para prever as anomalias semanais de T2M do que para prever as anomalias semanais de precipitação (os valores de correlação são maiores na Figura 3.4 do que na Figura 3.1). Os valores de correlação também diminuem com o aumento do prazo de validade da previsão na Figura 3.4. Novamente, os padrões espaciais dos valores de correlação das sete configurações são similares. Os valores de correlação mais altos são notados sobre regiões oceânicas que apresentam pouca cobertura de nuvem nas quatro semanas de previsão. Entretanto, nota-se, também, que valores de correlação estatisticamente significativos em porções continentais nas quatro semanas de previsão. Sobre as regiões extratropicais, valores de correlação acima de 0.2 são notados em regiões restritas nas semanas-3 e 4, por exemplo, sobre o sudeste dos Estados Unidos. Na região tropical, os valores são mais

baixos sobre regiões que apresentam forte atividade convectiva (e.g., sobre o Continente Marítimo).

A análise comparativa do desempenho das sete configurações do BAM-1.2 para as previsões retrospectivas das anomalias semanais de T2M revela características contrastantes se comparada com a mesma análise realizada para as anomalias semanais de precipitação. Por exemplo, as diferenças mais pronunciadas foram verificadas entre as configurações que apresentam parametrizações de convecção profunda diferentes (e.g., 42ABCE vs., 42GBCE na Figura 3.1). Entretanto, este fato não é evidenciado na Figura 3.4, dado que contraste no desempenho entre os experimentos configurados com Arakawa-Shubert e Grell-Dévényi não é notado para a anomalia semanal de T2M nas quatro semanas de previsão (e.g., linhas 42ABCE vs., 42AGBCE na Figura 3.4). As maiores diferenças no desempenho do BAM-1.2 foram notadas com a mudança na parametrização de camada limite. De maneira geral, o experimento configurado com a parametrização Mellor-Yamada (linha 42AMCE) apresenta desempenho inferior quando comparado com os demais experimentos, os quais foram configurados com a parametrização Bretherton-Park. Curiosamente, o aumento da resolução vertical de 42 (linhas 42ABCE e 42GBCE) para 64 (linhas 64ABCE e 64GBCE) níveis parece reduzir ligeiramente o desempenho das previsões das anomalias semanais T2M. Isso é notado de forma mais clara sobre as regiões extratropicais nas duas primeiras semanas de previsão. Uma ligeira redução no desempenho também é notada quando o BAM-1.2 foi inicializado com análise do FNL (linha 42ABCF) ao invés das reanálises ERA-Interim (linha 42ABCE). Essa característica é notada somente sobre as regiões continentais tropicais (e.g., América do Sul). Com a umidade do solo mais próxima do estado da inicialização (linha 42ABGE), é notado um ligeiro aumento nos valores de correlação quando comparado com a configuração inicializada com a umidade do solo climatológica (linha 42ABCE). Esse aumento é notado sobre regiões continentais específicas (e.g., Austrália, Américas do Sul e do Norte e África nas semanas-2 e 3 de previsão).

Figura 3.4 - Correlação entre as anomalias semanais de T2M das previsões retrospectivas e das reanálise ERA-Interim.



Como a Figura 3.1. Porém, para as anomalias semanais de T2M.

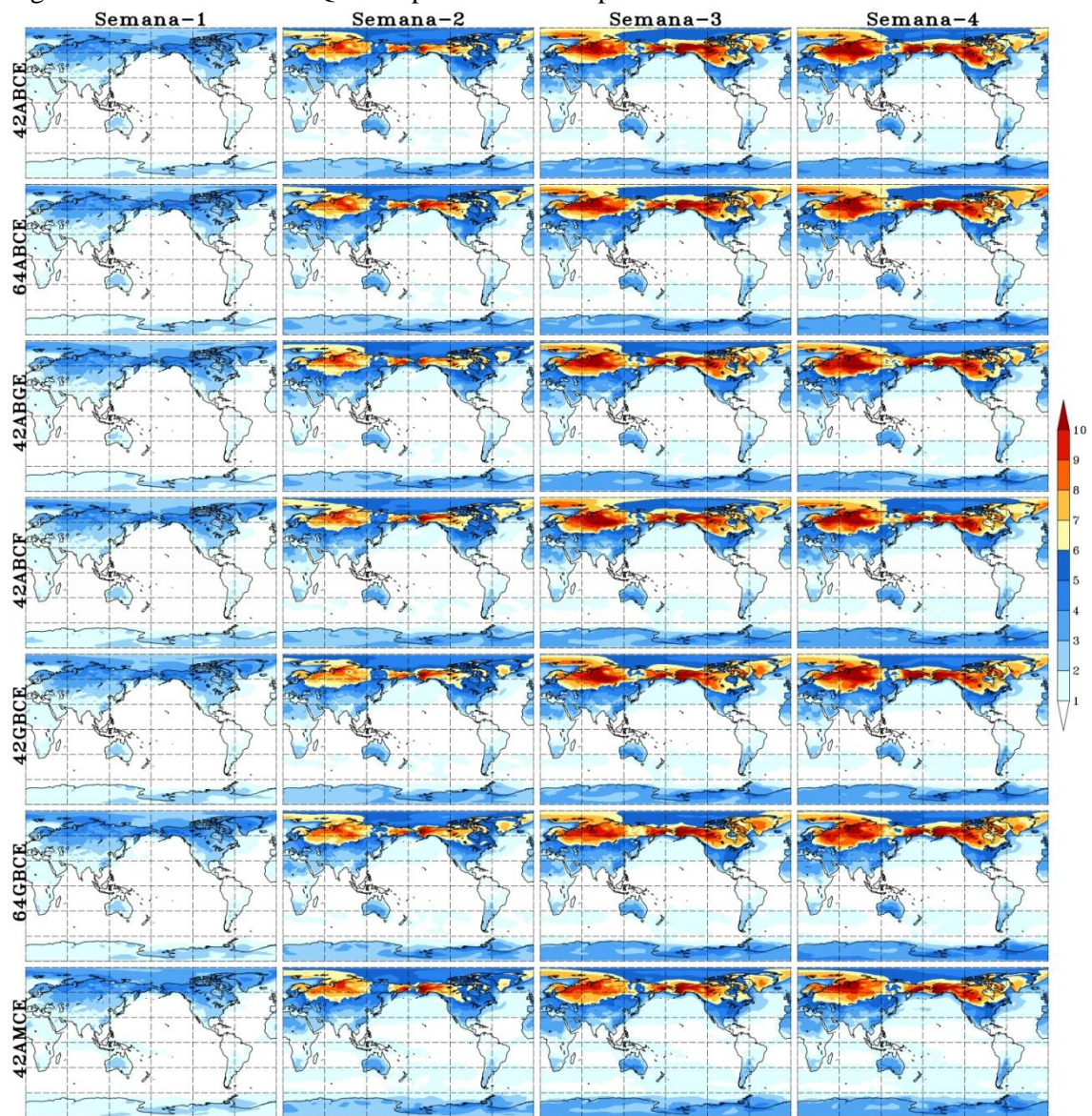
Fonte: Produção do autor.

A Figura 3.5 mostra o padrão espacial da REQM para as previsões retrospectivas das anomalias de T2M das sete configurações do BAM-1.2 (linhas) e para as quatro semanas de previsão (colunas). Em todas as configurações, os valores de REQM crescem com o aumento do prazo de previsão. Tais valores são mais baixos sobre os oceanos do que sobre as regiões continentais. Os maiores valores são notados sobre regiões continentais do Hemisfério Norte, principalmente sobre o norte da Ásia e norte da América do Norte. Essas regiões são influenciadas por interações entre os sistemas

baroclínicos de latitudes médias e anomalias da atividade convectiva sobre a região tropical, as quais são geralmente associadas com a OMJ e teleconexões de circulação por meio de ondas de Rossby (STAN et al., 2017; HU et al., 2019). Os valores de REQM são mais baixos sobre o Hemisfério Sul porque há menos porções continentais do que o Hemisfério Norte e, além disso, as condições para a instabilidade baroclínica são menos favoráveis sobre o Hemisfério Sul entre os meses de novembro-março. Esse último ponto torna menos pronunciada a interação entre as anomalias de convecção sobre a região tropical e a circulação sobre a região de latitudes médias do Hemisfério Sul do que no Hemisfério Norte. Como resultado disso, a variabilidade sub-sazonal é mais fraca durante o verão austral estendido sobre as regiões extratropicais do Hemisfério Sul.

As configurações com diferentes parametrizações de convecção profunda Arakawa-Shubert e Grell-Dévényi apresentam um padrão similar de REQM (Figura 3.5). Entretanto, algumas diferenças podem ser notadas em regiões específicas. Por exemplo, a configuração 42GBCE apresenta valores de REQM ligeiramente menores que a configuração 42ABCE sobre o sul da América do Sul na semana-3. O oposto é notado sobre a península Ibérica. Características similares são notadas com relação ao incremento da resolução vertical. Contrastes pequenos nos valores de REQM podem ser notados com relação à inicialização da umidade do solo, com ligeira melhoria para a configuração 42ABGE sobre regiões continentais, como Austrália, América do Sul, América do Norte e sul da África. Não é notado grande contraste com relação à mudança da condição inicial (42ABCE vs., 42ABCF). No geral, os contrastes de REQM entre 42ABCE e 42ABCF não diferem dos demais parâmetros mencionados anteriormente. As maiores diferenças nos valores de REQM são notadas com a comparação dos experimentos configurados com as duas parametrizações de camada limite Bretherton-Park (42ABCE) e Mellor-Yamada (42AMCE). Por exemplo, a configuração 42AMCE apresenta valores de REQM mais baixos que a configuração 42ABCE sobre a América do Norte e Ásia. Entretanto, o oposto é notado sobre as regiões tropicais e de latitudes médias.

Figura 3.5 - Valores de REQM das previsões retrospectivas das anomalias semanais de T2M.



Como a Figura 3.2. Porém, para as anomalias semanais de T2M.

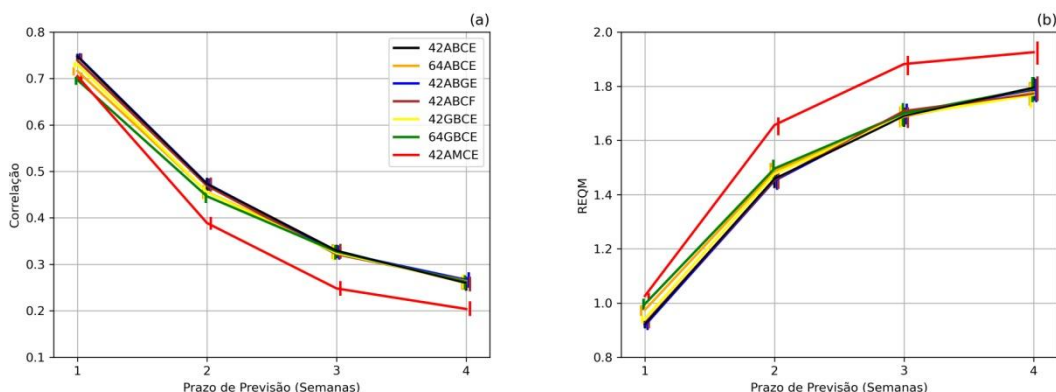
Fonte: Produção do autor.

Valores expressivos de correlação sobre a América do Sul podem ser notados nas quatro semanas de previsão das anomalias semanais de T2M das sete configurações (Figura 3.4). Entretanto, valores de correlação acima de 0.2 sobre as regiões extratropicais da América do Sul são notados apenas até a semana-2. Assim como mencionado acima, os valores de correlação (REQM) são menores (maiores) na configuração 42AMCE do que nas demais configurações sobre a América do Sul nas quatro semanas de previsão. Este fato mostra que o BAM-1.2 apresenta melhores índices de destreza quando configurado com a parametrização de camada limite Bretherton-Park. Os índices de destreza também

são melhores quando o BAM-1.2 é inicializado com a análise do GLDAS ao invés da climatologia (42ABGE vs., 42ABCE). Entretanto, o contraste sobre a América do Sul entre as duas maneiras de inicializar a umidade do solo é menor do que o contraste notado entre as duas parametrizações de camada limite (linhas 42ABCE e 42AMCE nas Figuras 3.4 e 3.5).

A Figura 3.6 mostra os valores médios de correlação (painel a) e REQM (painel b) sobre as regiões entre 60°N-60°S para cada configuração do BAM-1.2 nas quatro semanas de previsão. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95% calculado por meio de reamostragem (bootstrap) com 1000 amostras. As sete configurações apresentam uma redução (aumento) nos valores médios de correlação (REQM) a medida que o prazo de validade da previsão aumenta. Mudanças nas inicializações da atmosfera e umidade do solo, na parametrização de convecção profunda e no aumento da resolução vertical não alteram substancialmente os valores médios de correlação e erro das previsões retrospectivas das anomalias semanais de T2M do BAM-1.2. Essa característica é evidenciada pela sobreposição das barras verticais nos painéis a e b da Figura 3.6. Diferença no desempenho das configurações é notada somente em relação à configuração 42AMCE (linha vermelha) (i.e., mudança na parametrização da camada limite). O experimento configurado com a parametrização Mellor-Yamada (42AMCE) apresenta os menores valores de correlação e os maiores valores de REQM comparado aos outros seis experimentos. A diferença entre a configuração 42AMCE e as demais configurações é maior do que o intervalo de confiança de 95%.

Figura 3.6 - Como a Figura 3.3. Porém para as anomalias de T2M.



Fonte: Produção do autor.

Eventos extremos de temperatura, principalmente associados com ondas de frio e calor sobre as regiões de latitudes médias costumam causar prejuízos socio-econômicos em várias regiões, incluindo a América do Sul. Dessa maneira, a previsão sub-sazonal de T2M apresenta potencial para atenuar o impacto desses eventos, com trabalhos explorando a habilidade preditiva dos MCGAs em prever eventos extremos de ondas calor e de frio sobre a América do Sul (OSMAN; ALVAREZ, 2018; ALVAREZ et al., 2020) e outras regiões específicas (COWAN et al., 2019; PHAKULA et al., 2020). Contudo, a habilidade preditiva do BAM-1.2 para a T2M não será analisada nos próximos capítulos de forma mais aprofundada por motivo de concisão do trabalho, que deste ponto em diante terá como foco a avaliação da qualidade das previsões da OMJ e de precipitação. Os índices de destreza das previsões de T2M do BAM-1.2 para a média do conjunto com 11 membros podem ser encontrados na Figura A.3.1 (correlação) e na Figura A.3.2 (REQM) no Apêndice A.3.

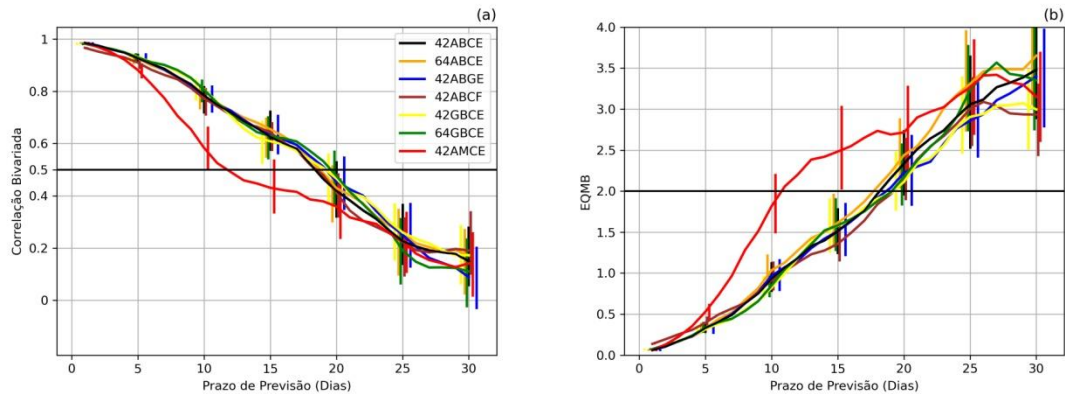
3.3.2 Avaliação das previsões retrospectivas determinísticas das sete configurações do BAM-1.2 para a OMJ

Como destacado anteriormente, a OMJ é definida como a principal fonte de previsibilidade na escala sub-sazonal (VITART; ROBERTSON, 2019), dado que essa oscilação é o principal modo na variabilidade intrassazonal na região tropical. A OMJ é caracterizada pela propagação para leste da convecção tropical, a qual leva cerca de 30 a 60 dias para completar um circuito completo ao redor do globo (MADDEN; JULIAN, 1972). Além da influência sobre a região tropical, a OMJ é capaz de influenciar as

condições de tempo sobre regiões extratropicais por meio de teleconexões trópicos-extratrópicos (MATTHEWS et al., 2004). Dessa forma, para alcançar índices de destreza aceitáveis nas previsões sub-sazonais, é necessário que os MCGAs representem a OMJ e seus impactos na atmosfera adequadamente. Nesta Seção, a habilidade de cada uma das sete configurações do BAM-1.2 em prever a evolução diária da OMJ com até 30 dias de antecedência é avaliada a partir de métricas de avaliação das previsões determinísticas (como definido na Seção 2.2.4).

A Figura 3.7 mostra os valores de correlação bivariada e de EQMB (ver Seção 2.2.4) para as sete configurações do BAM-1.2 nos painéis (a) e (b), respectivamente. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95% calculado por meio de reamostragem (bootstrap) com 1000 amostras. Como destacado na Seção 2.2.4, a habilidade preditiva do BAM-1.2 para o prognóstico da OMJ pode ser determinada pelos limiares de 0.5 e de 2.0 dos valores de correlação bivariada e EQMB, respectivamente. No geral, os prazos de validade da previsão em que esses dois limiares são alcançados costumam ser próximos (LIM et al., 2018). Os valores de correlação bivariada das sete configurações diminuem com o aumento do prazo de validade de previsão. Todas as configurações alcançam o limiar de 0.5 entre os prazos de validade de 18-19 dias, exceto a configuração 42AMCE (linha vermelha), a qual cruza a linha de 0.5 com 12 dias de previsão. Este fato mostra que dos parâmetros avaliados, a parametrização de camada limite foi a que apresentou a maior variação na habilidade preditiva do BAM-1.2 para a previsão da OMJ, dado que os seis experimentos configurados com a parametrização Bretherton-Park apresentam desempenho superior ao experimento configurado com a parametrização de Mellor-Yamada. A sobreposição dos intervalos de confiança (barras verticais) para a maioria das configurações (exceto para a configuração 42AMCE) ilustra a similaridade na habilidade preditiva do BAM-1.2.

Figura 3.7- Correlação bivariada (a) e EQMB (b) dos índices RMMs.



Os valores de correlação bivariada e Erro Quadrático Médio Bivariado (EQMB) foram computados para as sete configurações do BAM-1.2 em função do prazo de validade da previsão em dias. As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada configuração. As barras verticais plotadas em torno dos 30 dias de previsão, plotados a cada 5 dias, para cada configuração representam o intervalo de confiança de 95%, calculado por meio de reamostragem (bootstrap) com substituição de 1000 amostras.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 3.7b mostra que os valores de EQMB das sete configurações aumentam em função do prazo de validade de previsão. Como notado na Figura 3.7a, o BAM-1.2 atinge o limiar de 2.0 em torno de 18 dias de previsão, quando configurado com a parametrização Bretherton-Park, enquanto que esse valor cai para 11 dias com a parametrização Mellor-Yamada. Embora os contrastes entre os experimentos configurados com as duas parametrizações de convecção profunda (Arakawa-Shubert e Grell-Dévényi) não sejam maiores do que o intervalo de confiança de 95% (diferentemente do que foi notado para as duas parametrizações de camada limite), os experimentos configurados com Grell-Dévényi (linhas verde e amarela) apresentam um ganho de 1 dia de previsão quando comparados com os experimentos configurados com a parametrização de Arakawa-Shubert (linhas preta e laranja). Essa característica é notada tanto para os valores de correlação bivariada (Figura 3.7a) como para os valores de EQMB (Figura 3.7b). Embora essa diferença seja quantitativamente pequena, o aumento em 1 dia na habilidade preditiva da OMJ é igual a evolução anual alcançada pelo ECMWF (VITART, 2014). Ou seja, esse resultado destaca que a parametrização Grell-Dévényi apresenta uma ligeira vantagem em relação à parametrização Arakawa-

Shubert para o prognóstico da OMJ, diferentemente do que foi notado para a previsão das anomalias semanais de precipitação.

3.4 Sumário

As sete configurações do BAM-1.2 apresentam níveis de destreza melhores (correlação REQM) para as previsões das anomalias semanais de precipitação e T2M na primeira semana de previsão. Os níveis de destreza diminuem com o aumento do prazo de validade de previsão. Essas características também foram evidenciadas para a previsão da evolução diária da OMJ. Os valores de correlação acima de 0.2 foram notados apenas em algumas regiões tropicais (e.g., Oceano Pacífico equatorial) nas semanas-3 e 4 para as previsões de precipitação e T2M. Os maiores valores de REQM foram notados sobre regiões onde a variabilidade sub-sazonal nas variáveis de precipitação e T2M é mais intensa. As características destacadas acima também são notadas em outros trabalhos que avaliam a habilidade preditiva dos MCGAs na escala sub-sazonal (LIU et al., 2014; LI; ROBERTSON, 2015; VITART, 2017; LIM et al., 2018; DE ANDRADE et al., 2019; ALVAREZ et al., 2020). Embora as sete configurações avaliadas apresentem padrões espaciais e evolução temporal dos índices de destreza semelhantes, dado o papel dos padrões de teleconexão da OMJ e ENOS na habilidade preditiva dos MCGAs (LI; ROBERTSON, 2015; DE ANDRADE et al., 2019), algumas configurações apresentam índices de destrezas melhores do que outras. Contudo, as configurações que apresentam os melhores índices de destreza variam com relação à variável avaliada (precipitação, T2M e OMJ).

O aumento da resolução vertical, de 42 para 64 níveis, não resultou em um aumento na habilidade preditiva sub-sazonal do BAM-1.2. Este fato pode ser notado ao comparar as configurações 42ABCE e 64ABCE, ou as configurações 42GBCE e 64GBCE, (experimentos que apresentam contraste na configuração apenas com relação à resolução vertical) para as previsões das anomalias semanais de precipitação e T2M e para a evolução diária da OMJ. Esses resultados parecem contraditórios, uma vez que outros trabalhos destacam que modelos com maior resolução espacial apresentam índices de destreza melhores na escala sub-sazonal (VITART, 2017; DE ANDRADE et al., 2019). Como destacado anteriormente, esse resultado pode estar relacionado com a baixa resolução vertical da condição inicial, dado que as reanálises ERA-Interim

apresentam apenas 37 níveis verticais, os quais foram interpolados para 42 e 64 níveis, e com a possível influência do detalhamento dessas duas resoluções verticais para a resolução horizontal do BAM-1.2 utilizada.

O BAM-1.2 apresenta melhor habilidade preditiva para a previsão sub-sazonal da precipitação quando configurado com a parametrização de convecção profunda Arakawa-Shubert do que quando configurado com a parametrização Grell-Dévényi. Isso é claramente notado ao comparar os índices de destreza das configurações 42ABCE e 42GBCE ou das configurações 64ABCE e 64GBCE (experimentos que apresentam contrastes na configuração apenas com relação à parametrização de convecção profunda) para as anomalias semanais de precipitação, principalmente nas duas primeiras semanas de previsão. Por outro lado, tal fato não foi percebido para os prognósticos de T2M e da OMJ. Inclusive, o BAM-1.2 apresenta habilidade preditiva superior a 1 dia no prognóstico da OMJ quando configurado com a Grell-Dévényi (com habilidade preditiva até o prazo de validade de previsão de 19 dias) do que quando configurado com Arakawa-Shubert (com habilidade preditiva até 18 dias de previsão). O caso do BAM-1.2 apresentar melhores índices de destreza para a previsão da precipitação quando configurado com Arakawa-Shubert é uma característica intrigante que deseja análises adicionais (as quais fogem do escopo do trabalho), uma vez que o mesmo comportamento não foi verificado para as previsões de T2M e OMJ. Como destacado na Seção 2.2.2, a versão da parametrização Arakawa-Shubert foi reformulada para reduzir precipitações espúrias. Esse procedimento realizado por Ham e Pan (2011) poderia ser previamente um possível motivo para explicar o melhor desempenho do BAM-1.2 nas previsões de precipitação com a parametrização Arakawa-Shubert.

A parametrização de camada limite Bretherton-Park proporciona melhor desempenho para o BAM-1.2 para as previsões de T2M e OMJ quando comparada com a parametrização de Mellor-Yamada. As maiores diferenças são notadas com relação à previsão da OMJ, onde a correlação bivariada (EQMB) diminui (aumenta) abruptamente com o aumento do prazo de validade de previsão na configuração 42AMCE (o único experimento com o BAM-1.2 configurado com Mellor-Yamada). Dessa maneira, o BAM-1.2 alcançou os limiares de 0.5 (correlação) e 2.0 (EQMB) em torno de 11/12 dias de previsão, enquanto que esses limiares foram alcançados em torno de 18/19 dias para as outras seis configurações.

Assim como a mudança na resolução vertical, as mudanças na inicialização da umidade do solo (climatologia e análise do GLDAS) e da condição inicial da atmosfera (reanálises ERA-Interim e análise FNL) não induziram um impacto robusto na habilidade preditiva do BAM-1.2. Ao inicializar o BAM-1.2 com a análise de umidade do solo do GLDAS, ao invés da umidade do solo climatológica, um ligeiro aumento nos índices de destreza para a previsão das anomalias semanais de T2M foi identificado sobre regiões específicas, incluindo a América do Sul. Entretanto, esse aumento é menos acentuado do que foi verificado em trabalhos anteriores [e.g., Koster et al. (2011) e Drewitt et al. (2012)]. O fato do BAM-1.2 não apresentar um aumento na destreza em resposta a mudança nas condições de inicialização da umidade do solo pode estar associado a diferentes fatores, tais como o período (novembros-março) e os prazos de validade da previsão (anomalias semanais) investigados, características dos experimentos e/ou sensibilidade do BAM-1.2 com respeito à inicialização da umidade do solo. Com relação à inicialização do componente atmosférico, o fato dos índices de destreza do BAM-1.2 não apresentarem contrastes importantes ao ser inicializado com as análises FNL ao invés das reanálises ERA-Interim é um resultado relevante, dado que isso pode sugerir que a habilidade preditiva do BAM-1.2 não está exclusivamente atrelada à qualidade da condição inicial (reanálises ERA-Interim) utilizada. Este fato também sugere que o BAM-1.2 apresenta potencial em manter o nível de habilidade preditiva, os quais são considerados promissores (assim como será mostrado no próximo capítulo), em um desenvolvimento futuro de uma análise específica para o BAM-1.2.

Após realizar a avaliação das sete configurações do BAM-1.2, foi possível determinar a configuração mais adequada para o desenvolvimento do sistema de previsões sub-sazonais por conjunto do CPTEC. Desse modo, a configuração determinada foi a 42ABCE. Essa versão consiste do BAM-1.2 com resolução horizontal TQ126, 42 níveis na vertical em coordenada sigma, convecção profunda Arakawa–Schubert (HAM; PAN, 2011), camada limite Bretherton–Park (BRETHERTON; PARK., 2009), microfísica Morrison (MORRISON et al., 2009), radiação de onda curta CLIRAD-SW (TARASOVA; FOMIN, 2000), radiação de onda longa CLIRAD-LW (CHOU et al., 2001), modelo de superfície terrestre IBIS-2.6-CPTEC (KUBOTA, 2012), inicialização da umidade do solo climatológica e condição inicial da atmosfera proveniente das

reanalises ERA-Interim. A resolução vertical com 42 níveis foi selecionada, visto que o aumento para 64 níveis não resultou em melhorias na habilidade preditiva do BAM-1.2. Apesar das parametrizações de convecção profunda Arakawa–Schubert e Grell–Dévényi apresentarem habilidade similar para as previsões de T2M e da OMJ, o primeiro esquema apresentou índices de destreza mais elevados para a previsão sub-sazonal de precipitação. Desse modo, Arakawa–Schubert foi selecionada em detrimento da parametrização Grell–Dévényi. A parametrização de camada limite de Bretherton–Park foi selecionada devido aos índices satisfatórios para as previsões da T2M e OMJ. O BAM-1.2 apresentou índices de destreza ligeiramente mais elevados em regiões específicas quando inicializado com a umidade do solo da análise do GLDAS ao invés da climatologia. Entretanto, optou-se por fazer a inicialização do BAM-1.2 com a umidade do solo climatológica, visto que, em um contexto global, a habilidade preditiva do BAM-1.2 não foi substancialmente diferente ao usar a análise do GLDAS, além das limitações na disponibilidade de dados precisos de umidade do solo para previsões em tempo real.

4 AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO DO CPTEC COM OS MODELOS DO PROJETO S2S NA ESCALA SUB-SAZONAL

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma análise do desempenho do modelo do CPTEC a partir da configuração 42ABCE do BAM-1.2 definida no capítulo anterior como a configuração mais apropriada para a avaliação da qualidade dos prognósticos sub-sazonais em relação aos modelos do BoM, ECCC, ECMWF e JMA (centros de meteorologia australiano, canadense, europeu e japonês, respectivamente). O desempenho desses cinco modelos é examinado para as previsões semanais de precipitação produzidas com até quatro semanas de antecedência, com abordagens determinística e probabilística, e para as previsões diárias da OMJ até 35 dias de antecedência com abordagem determinística. Adicionalmente, o desempenho do modelo do CPTEC para outros prazos de validade de previsão (i.e., previsões quinzenais e mensais) para a anomalia de precipitação também é investigado. Nessa última avaliação, o desempenho do modelo do CPTEC é comparado com o desempenho do modelo do ECMWF. Parte dos resultados apresentados neste capítulo encontra-se publicado na revista *Climate Dynamics*, intitulado “*An inter-comparison performance assessment of a Brazilian global sub-seasonal prediction model against four Sub-seasonal to Seasonal (S2S) prediction project models*” (GUIMARÃES et al., 2021). Além desse trabalho, os resultados alcançados neste capítulo contribuíram, também, para o trabalho de Klingaman et al. (2020) intitulado “*Subseasonal prediction performance for austral summer South American rainfall*”, publicado na revista “*Weather and Forecasting*”.

4.2 Fundamentação teórica

Como destacado no capítulo anterior, os MCGAs ainda apresentam uma série de limitações com relação à habilidade preditiva na escala sub-sazonal. Essas limitações representavam um desafio ainda maior no passado de tal maneira que a escala sub-sazonal ficou conhecida como “deserto de previsibilidade” (VITART; ROBERTSON, 2019). Por essa razão, quase nenhuma atenção era dada para a previsão na escala temporal sub-sazonal até pouco tempo atrás. Entretanto, a partir dos anos 2000, um crescente aumento no interesse sobre a qualidade e utilidade do prognóstico na escala

sub-sazonal tem sido notado, dada a evolução dos MCGAs devido aos avanços no conhecimento científico e computacional (e.g., VITART, 2014).

O ECMWF foi um dos centros de meteorologia pioneiro a desenvolver previsões sub-sazonais rotineiras no formato atual, embora o estudo de Miyakoda et al. (1983) seja reconhecido como o primeiro trabalho publicado abordando essa temática. A partir de 2002 o ECMWF adotou um sistema de previsão, o qual apresentava características diferentes dos sistemas de previsão das escalas de tempo e clima sazonal, com integração de 32 dias e frequência de emissão das previsões realizada duas vezes por semana, utilizando um modelo acoplado atmosfera-oceano, conjunto de 51 membros e resolução horizontal de $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ com 40 níveis na vertical. Vitart (2004) validou o sistema de previsão na escala sub-sazonal do ECMWF analisando 45 “previsões em tempo real” de março de 2002 a dezembro de 2003 e também previsões retrospectivas produzidas para um período de 12 anos (de março de 1990 a dezembro de 2001). Dessa forma, Vitart (2004) mostrou que o sistema do ECMWF apresentava habilidade preditiva moderada para as previsões das anomalias semanais de T2M e precipitação. Os resultados encontrados por Vitart (2004) podem ser considerados um marco, demonstrando que um sistema de previsão numérica pode apresentar previsões úteis (i.e., quando a previsão apresenta erro menor do que uma previsão de referência) na escala sub-sazonal.

O ECMWF se encontra na vanguarda do conhecimento na temática da previsão sub-sazonal, devido ao pioneirismo e a constante evolução do sistema de previsão sub-sazonal desse centro. Os fatores que mais contribuem para essa evolução são o refinamento da resolução espacial e, principalmente, melhorias nos processos físicos do modelo (VITART, 2014). Por conta disso, o modelo do ECMWF tem sido identificado como o modelo mais habilidoso na escala sub-sazonal quando comparado com MCGAs de outros centros. Li e Robertson (2015) avaliaram as previsões sub-sazonais retrospectivas das anomalias semanais de precipitação dos modelos do ECMWF, JMA e NCEP durante o verão boreal (junho, julho e agosto). Li e Robertson (2015) mostraram que, embora os modelos avaliados apresentem um padrão espacial de habilidade preditiva semelhante, o modelo do ECMWF apresenta índices de destreza ligeiramente melhores do que os modelos do JMA e do NCEP. Esses resultados foram corroborados em estudos mais recentes, por exemplo, em de Andrade et al. (2019).

O sistema de previsão sub-sazonal do JMA (centro de meteorologia do Japão), assim como o sistema do ECMWF, tem apresentado uma constante evolução nos últimos anos. Por conta disso, o sistema de previsão do JMA apresenta alta resolução espacial com resolução horizontal de 40 (55) km nos primeiros (após) 18 dias de integração e 100 níveis na vertical. Entretanto, o sistema do JMA não apresenta acoplamento com um modelo oceânico. Mesmo sem acoplamento com o oceano, o sistema de previsão sub-sazonal do JMA apresenta habilidade preditiva comparável a modelos que apresentam essa característica. Por exemplo, Li e Robertson (2015) mostraram que no geral, o modelo do JMA apresenta índices de destreza para as anomalias semanais de precipitação similares ao do modelo acoplado do NCEP. Na avaliação da qualidade das previsões sub-sazonais de precipitação realizada em de Andrade et al. (2019) foi mostrado que o modelo do JMA apresenta os maiores índices de destreza dentre os modelos do S2S que não apresentam acoplamento com o oceano. Além disso, o modelo do JMA apresenta habilidade preditiva comparável à habilidade preditiva do modelo do ECMWF para previsões de precipitação produzidas com até duas semanas de antecedência.

O centro de meteorologia australiano (BoM) também produz o prognóstico sub-sazonal de forma rotineira. Entretanto, diferentemente da maioria dos centros mundiais de meteorologia, o sistema de previsão sub-sazonal do BoM é unificado com o sistema de previsão sazonal. Ou seja, esses dois sistemas apresentam uma mesma configuração. Como resultado disso, o sistema de previsão sub-sazonal do BoM apresenta baixa resolução espacial com 250 km na horizontal e apenas 17 níveis na vertical. Por outro lado, o sistema de previsão do BoM é contemplado com o acoplamento atmosfera-oceano. Hudson et al. (2011a) mostraram que o modelo do BoM apresenta habilidade preditiva para as previsões sub-sazonais de precipitação e T2M sobre a Austrália, principalmente sobre a parte leste, para a previsão da segunda quinzena (média dos dias 15-28 de previsão). Em uma perspectiva global, de Andrade et al. (2019) mostraram que, mesmo com o acoplamento com o oceano, a habilidade preditiva do modelo do BoM é inferior à habilidade preditiva do modelo do JMA para as anomalias semanais de precipitação, possivelmente associado à baixa resolução espacial do modelo do australiano.

O sistema de previsão sub-sazonal do ECCC (centro de meteorologia do Canadá) é frequentemente examinado por vários trabalhos. Isso ocorre porque o conjunto de previsões desse sistema participa de dois projetos globais, o S2S e o SUBX. Lin et al. (2016) avaliaram a primeira versão do sistema de previsão sub-sazonal não acoplado do ECCC, o qual apresentava melhorias na resolução espacial e no sistema de inicialização do modelo atmosférico quando comparado com o sistema de previsão sazonal. Os autores encontraram que o modelo do ECCC apresentava índices de destreza expressivos para a altura geopotencial em 500 hPa e T2M até a quarta semana de previsão sobre regiões específicas do Hemisfério Norte. Posteriormente, Liang e Lin (2018) avaliaram o mesmo sistema de previsão para a região do leste da Ásia durante o período do verão boreal. Os resultados mostram que o modelo do ECCC consegue capturar sinais das oscilações intrassazonais que ocorrem nas monções asiáticas. Resultados satisfatórios foram encontrados para T2M e altura geopotencial em 500 hPa para as 4 semanas de previsão. Por outro lado, os autores mostraram que a habilidade preditiva do sistema de previsão do ECCC para a precipitação é limitada à primeira semana sobre o leste da Ásia. Os autores associaram algumas falhas na habilidade preditiva do modelo a falta de acoplamento com o oceano do sistema ECCC. Recentemente, Lin et al. (2020) compararam a habilidade preditiva do modelo do ECCC com a dos modelos do ECMWF e do NCEP sobre a região do Ártico. Os resultados mostraram que os três modelos examinados apresentaram o mesmo nível de habilidade preditiva para a T2M sobre a região estudada.

Um número considerável de trabalhos explora a habilidade preditiva dos modelos mencionados acima em prever a evolução diária da OMJ. Vitart (2017) mostrou que praticamente todos os modelos que participam do projeto S2S apresentam habilidade preditiva além de 17 dias de antecedência, medida pelo tempo entre a data de inicialização da previsão e a data de validade da previsão até que o índice de correlação bivariada representativo da atividade da OMJ seja inferior a 0.5. Esse resultado mostra um avanço importante na capacidade dos MCGAs em representar a evolução da OMJ. Posteriormente, os resultados de Lim et al. (2018) corroboraram com os resultados encontrados em Vitart (2017), os quais mostram que o modelo do ECMWF apresenta os maiores índices de destreza em prever a OMJ, isto é, em torno de 30 dias de antecedência. O modelo do BoM também aparece em destaque, com habilidade

preditiva em torno de 25 dias. Os modelos do JMA e do ECCC, os quais não apresentam acoplamento com o oceano, mostraram índice de destreza ligeiramente inferior ao do modelo do BoM, com habilidade preditiva em torno de 20 dias.

De modo geral, os trabalhos que avaliam a habilidade preditiva dos MCGAs na escala sub-sazonal, tanto para as previsões semanais ou quinzenais de precipitação e T2M como para a evolução diária da OMJ, mostram que características como resolução espacial, acoplamento com o oceano e tamanho do conjunto (número de membros gerados para as previsões) apresentam impacto importante na habilidade preditiva (LIM et al., 2018; DE ANDRADE et al., 2019; PEGION et al., 2019).

4.3 Resultados

4.3.1 Avaliação das previsões semanais determinísticas das anomalias de precipitação

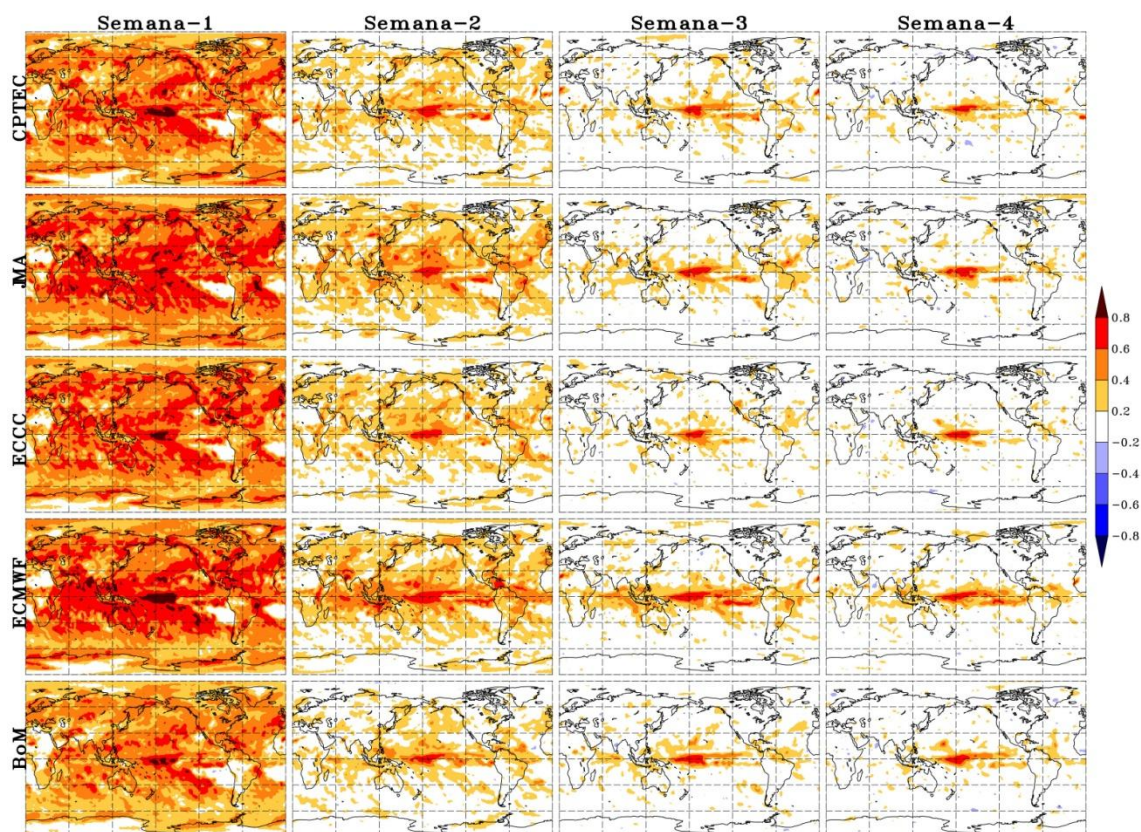
Nesta Seção, as previsões retrospectivas das anomalias semanais de precipitação do modelo do CPTEC são avaliadas em uma perspectiva determinística. Além disso, os índices de destreza do modelo do CPTEC são comparados com a habilidade preditiva dos modelos do JMA, ECCC, ECMWF e BoM.

A Figura 4.1 mostra a distribuição espacial dos valores de correlação temporal entre as previsões retrospectivas dos cinco modelos avaliados e as observações (GPCP) (linhas) para as quatro semanas de prazo de validade de previsão (colunas), como definido na Figura 2.1 (linhas vermelhas). Para comparar os modelos de forma justa, as previsões retrospectivas são compostas pela média do conjunto de quatro membros, dado que esse é o número máximo de membros do modelo do ECCC (o modelo que possui o menor número de membros). As características de habilidade dos modelos com relação ao prazo de validade de previsão (e.g., diminuição dos valores de correlação, valores de correlação mais intensos sobre a região tropical para os prazos de validade de previsão mais longos, etc.) são as mesmas das que foram mostradas no Capítulo-3. Dessa forma, essas características não são descritas novamente aqui.

Na Figura 4.1, observa-se que, em geral, os padrões espaciais dos valores de correlação são semelhantes entre os cinco modelos para todos os prazos de validade de previsão. O modelo do ECMWF (quarta linha na Figura 4.1) apresenta os maiores valores de correlação nas quatro semanas de previsão quando comparado com os modelos do

CPTEC, BoM, ECCC e JMA. Isso mostra que o modelo do ECMWF apresenta o melhor desempenho, em termos de associação linear, entre os modelos avaliados na escala sub-sazonal. Essa característica tem sido reportada em outros trabalhos (LI; ROBERTSON, 2015; DE ANDRADE ET AL., 2019). O modelo do CPTEC (primeira linha na Figura 4.1) apresenta desempenho comparável aos modelos do ECCC e JMA, principalmente nas semanas-2, 3 e 4 de previsão. O modelo do BoM apresenta os menores valores de correlação para os prazos de validade de previsão mais curtos (semana-1 e 2). Isso pode estar associado com a baixa resolução espacial desse modelo. Entretanto, a diminuição dos valores de correlação com o prazo de validade de previsão (e.g., sobre os oceanos tropicais) é menor no modelo do BoM do que nos modelos do CPTEC, ECCC e JMA. Essa característica pode estar associada com o fato do modelo do BoM apresentar acoplamento com o oceano, diferentemente dos outros três modelos mencionados. As diferenças entre os valores de correlação do modelo do CPTEC e os demais modelos podem ser visualizadas na Figura C.1 no Apêndice - C. No Capítulo-3, foi notado que os valores de correlação acima de 0.2 são confinados sobre os oceanos tropicais, principalmente sobre o Oceano Pacífico, nas semanas-3 e 4 de previsão. Além disso, também foi notado que o modelo do CPTEC apresenta valores de correlação acima de 0.2 sobre o setor leste da América do Sul até semana-3. Na Figura 4.1, é notado que nem todos os modelos apresentam essa última característica mencionada. Dos modelos avaliados, apenas os modelos do ECMWF e do JMA, além do modelo do CPTEC, apresentam valores positivos notáveis de correlação na parte leste da América do Sul na semana-3. No geral, todos os modelos apresentam valores de correlação acima de 0.2 sobre o norte da América do Sul nas semanas-3 e 4 de previsão.

Figura 4.1 – Correlação dos 5 modelos avaliados e o GPCP.



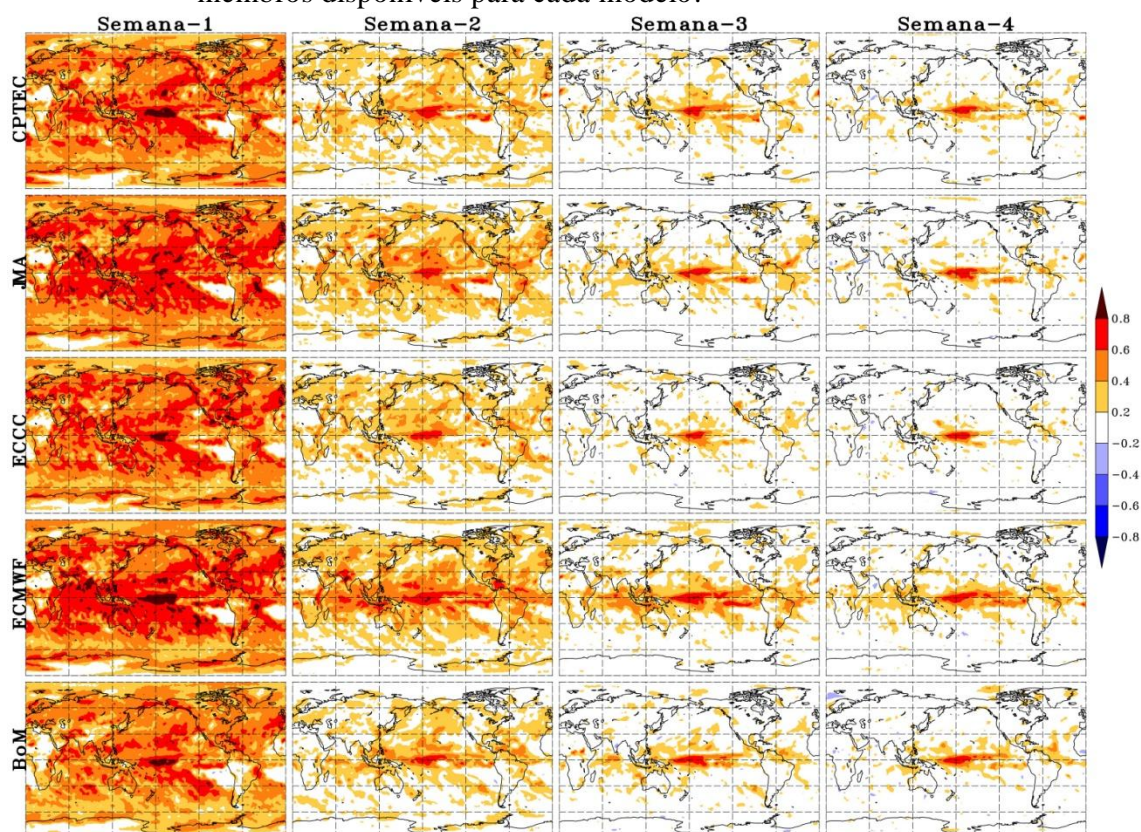
As correlações foram calculadas entre as anomalias semanais de precipitação da média do conjunto com 4 membros e a observação (GPCP) para os modelos do CPTEC, JMA, ECCC, ECMWF e BoM (linhas) e para as quatro semanas de previsão (colunas). As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada modelo.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.2 mostra os campos de correlação para cada modelo avaliado como na Figura 4.1. Entretanto, as médias dos conjuntos para as anomalias semanais de precipitação foram calculadas para o número total de membros disponíveis de cada modelo (i.e., 11 membros para os modelos do CPTEC, ECMWF e BoM, 5 membros para o JMA e 4 membros para o ECCC). Com o aumento do número de membros do conjunto, os valores de correlação aumentam para todos os modelos e nos quatro períodos de validade de previsão em comparação com a Figura 4.1, exceto para o ECCC que apresenta o mesmo número de membros nas duas figuras. Esses aumentos também são notados sobre a América do Sul. Os valores de correlação aumentam mais substancialmente nos modelos que apresentam maior número de membros (i.e., CPTEC,

ECMWF e BoM) do que para o modelo do JMA, o qual apresenta aumento de apenas um membro na Figura 4.2. Os contrastes entre as Figuras 4.1 e 4.2 são maiores sobre as regiões extratropicais nos dois primeiros prazos de validade de previsão e sobre as regiões tropicais nas semanas-3 e 4.

Figura 4. 2 - Como a Figura 4.1. Porém, para a média do conjunto calculada com o número de membros disponíveis para cada modelo.



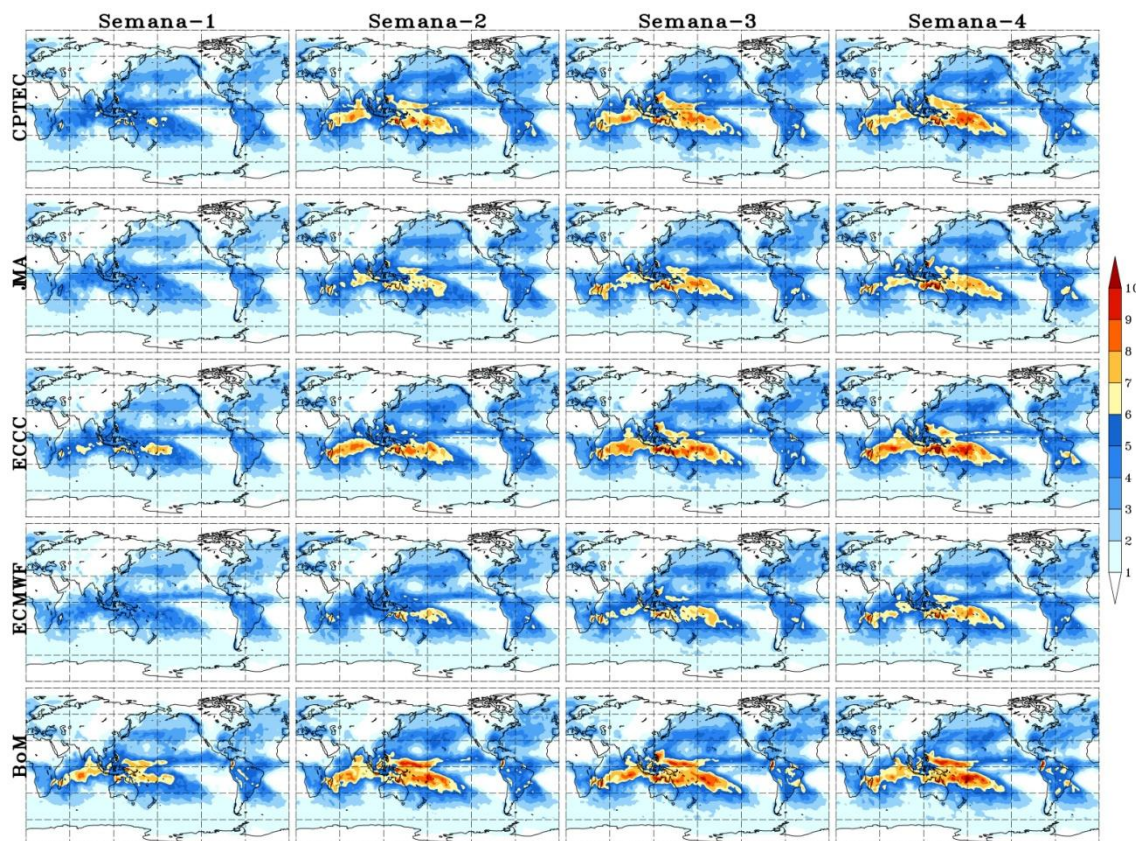
As médias dos conjuntos foram calculadas com o número total de membros disponíveis de cada modelo. 11 membros para o modelo do CPTEC, 5 membros para o modelo do JMA, 4 membros para o modelo do ECCC, 11 membros para o modelo do ECMWF e 11 membros para o modelo do BoM.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.3 mostra as características espaciais dos valores de REQM das previsões retrospectivas dos cinco modelos avaliados (linhas) para as quatro semanas de previsão (colunas). Assim como na Figura 4.1, os valores de REQM foram calculados para a média do conjunto com 4 membros para as 120 previsões retrospectivas de cada modelo. Da mesma forma que notado no Capítulo-3, os padrões espaciais de REQM são similares entre os modelos avaliados para as quatro semanas de previsão. Isso ocorre porque os valores de REQM são maiores sobre as regiões (e.g., ZCIT, ZCPS, ZCAS)

que apresentam forte influência da variabilidade sub-sazonal (e.g., OMJ e teleconexões trópicos-extratrópicos). Por outro lado, a intensidade dos valores de REQM varia entre os modelos avaliados. Isso ocorre porque os modelos que mostram maior capacidade em representar as variabilidades na escala sub-sazonal apresentam valores de REQM menores. Dessa forma, os valores de REQM aumentam com o prazo de validade de previsão, dado que a variabilidade sub-sazonal é representada melhor nos prazos de validade de previsão mais curtos (semanas-1 e 2) do que nas semanas-3 e 4. Como notado na Figura 4.1, em geral, o modelo do ECMWF apresenta o melhor desempenho nas quatro semanas de previsão, como mostrado pelos menores valores de REQM quando comparado aos demais modelos avaliados. O modelo do CPTEC mostra valores de REQM similares aos dos modelos do JMA e ECCC. De modo geral, o modelo do JMA apresenta valores REQM ligeiramente inferiores aos do que o modelo do CPTEC, enquanto que o modelo do ECCC apresenta valores de REQM ligeiramente superiores aos do que o modelo do CPTEC. O modelo do BoM mostra os maiores valores de REQM a partir da primeira semana de previsão. Esses valores são relativamente altos, principalmente sobre os oceanos Índico e Pacífico Oeste. É interessante notar que, ao contrário das semanas-1 e 2 de previsão, onde os valores de REQM do modelo do BoM são os maiores encontrados, os valores de REQM do modelo do BoM são menores do que os valores do modelo do ECCC nas semanas-3 e 4. Além disso, a diferença entre os valores de REQM do modelo do BoM e dos modelos do CPTEC e JMA diminui com o aumento do tempo de previsão. Essas duas características podem estar ligadas ao papel do acoplamento oceano-atmosfera uma vez que os modelos do CPTEC, JMA e ECCC não apresentam acoplamento com o componente oceânico, diferentemente do modelo do BoM. Além disso, os valores relativamente elevados de REQM a partir da primeira semana de previsão do modelo do BoM podem estar ligados com a baixa resolução espacial desse modelo (cerca de 250 km na horizontal e 17 níveis na vertical). A diferença dos valores de REQM entre o modelo do CPTEC e os demais modelos avaliados pode ser visualizada na Figura C.2 do Apêndice - C. Além disso, os valores de REQM para a média do conjunto com o número total de membros disponíveis para cada modelo são mostrados na Figura D.1 do Apêndice - D. Como esperado, os valores de REQM diminuem com o aumento do número de membros.

Figura 4.3 - REQM dos 5 modelos avaliados com relação as anomalias semanais do GPCP.

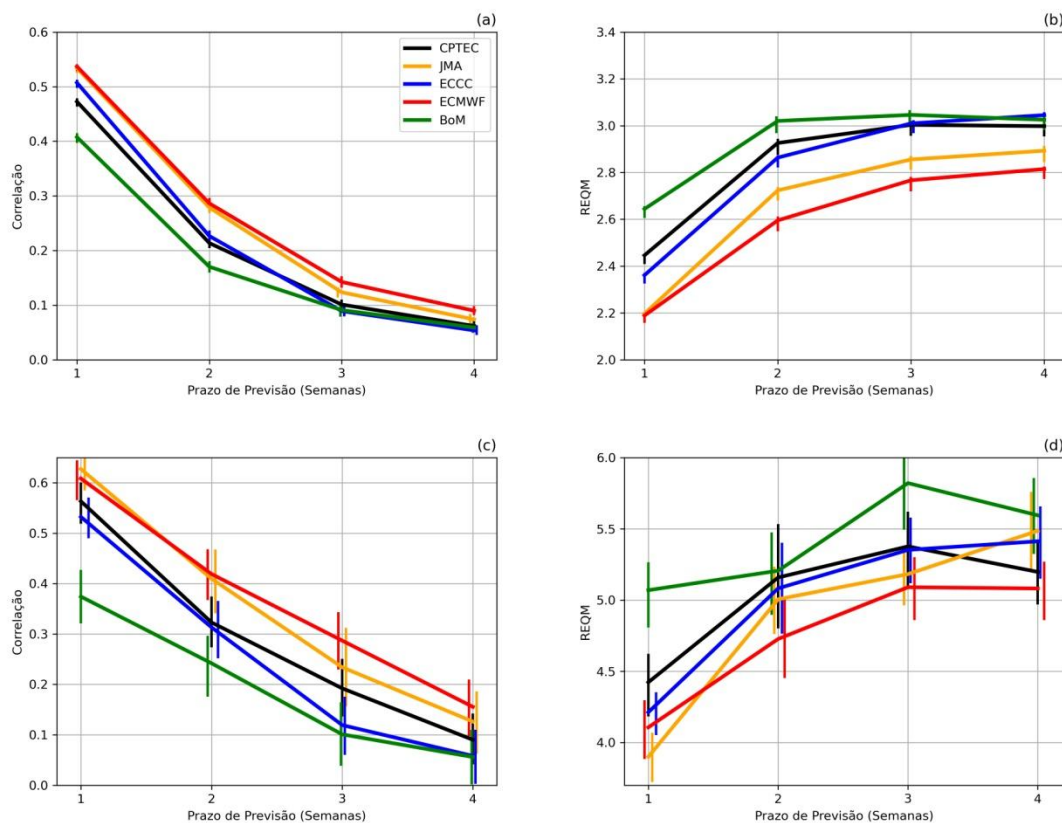


Os valores de REQM foram calculados para as previsões retrospectivas das anomalias semanais de precipitação ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$) dos modelos do CPTEC, JMA, ECCC, ECMWF e BoM (linhas), todos os modelos com a média do conjunto com 4 membros, com relação as anomalias semanais do GPCP. As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada modelo. Fonte: Produção do autor.

Para resumir as figuras anteriores e facilitar a classificação dos modelos avaliados, a Figura 4.4 mostra as médias globais (entre 60°N - 60°S) de correlação e REQM nos painéis (a) e (b), respectivamente, além dos valores médios de correlação e REQM sobre parte da região tropical da América do Sul (0 - 30°S e 55°W - 35°W) nos painéis (c) e (d), respectivamente. Os valores de correlação e REQM foram calculados para a média do conjunto com quatro membros dos cinco modelos avaliados para as quatro semanas de previsão (assim como nas Figuras 4.1 e 4.3). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95% calculado por meio do método de reamostragem (bootstrap) com 1000 amostras. Como notado no Capítulo-3, os valores médios de correlação (entre 60°N - 60°S) do modelo do CPTEC apresentam uma queda

quase exponencial com o aumento do prazo de validade de previsão. Essa característica também é notada nos outros quatro modelos avaliados (Figura 4.4a). O modelo do ECMWF apresenta os maiores valores de correlação médios nos quatro prazos de validade de previsão. O modelo do JMA aparece classificado como o segundo melhor modelo, enquanto que o terceiro lugar é ocupado pelos modelos do CPTEC e do ECCC, dependendo do prazo de validade da previsão. Os valores de correlação do modelo do CPTEC são maiores (menores) do que os valores do modelo do ECCC nas semanas-3 e 4 (semanas-1 e 2). Apesar do modelo do BoM apresentar os menores valores de correlação entre os modelos avaliados, tais valores são comparáveis aos dos modelos do ECCC e CPTEC nas duas últimas semanas de prazo de validade da previsão (as barras verticais desses modelos se sobrepõem, indicando que os valores de correlação desses dois modelos são comparáveis). A média global de REQM entre 60°N e 60°S (Figura 4.4b) corrobora a classificação encontrada na Figura 4.4a. O modelo do ECMWF apresenta os menores valores de REQM nas quatro semanas de previsão, seguido pelo modelo do JMA. Os modelos dos CPTEC e ECCC apresentam valores de REQM similares, com valores de REQM maiores do que os valores dos modelos do ECMWF e JMA. O modelo do BoM apresenta os maiores valores de REQM, exceto na semana-4, onde o modelo do ECCC mostra os maiores valores.

Figura 4.4 - Médias espaciais dos valores de correlação e REQM.



As médias foram calculadas entre as latitudes de 60°N-60°S dos valores de correlação (a) e REQM (b), e média sobre parte da região tropical da América do Sul (0-30°S e 55°W-35°W) dos valores de correlação (c) e REQM (d). Os valores de correlação e REQM foram calculados entre as previsões retrospectivas (média do conjunto com 4 membros) dos 5 modelos avaliados e a referência (GPCP) para as quatro semanas de previsão. As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada modelo. As barras verticais plotadas em torno das quatro semanas de previsão para cada modelo representam o intervalo de confiança de 95%, calculado por meio de reamostragem (bootstrap) com 1000 amostras. Fonte: Produção do autor.

Os valores médios de correlação e REQM sobre parte da região tropical da América do Sul (0-30°S e 55°W-35°W) (Figuras 4.4c e 4.4d, respectivamente) mostram uma classificação dos modelos semelhante à encontrada para os valores médios globais. O modelo do CPTEC apresenta desempenho equivalente aos modelos do projeto S2S avaliados sobre a América do Sul, principalmente em relação aos modelos do JMA e ECCM. Diferentemente da Figura 4.4a, os valores de correlação sobre parte da América

do Sul apresentam uma queda quase linear em função do tempo de previsão (Figura 4.4c). Outra diferença entre os dois domínios, é um desempenho ligeiramente melhor do modelo do JMA em relação ao modelo do ECMWF na primeira semana de previsão sobre a região destacada da América do Sul. A evolução dos valores de REQM do modelo do BoM com o aumento do tempo de validade da previsão apresenta comportamento diferente aos demais modelos avaliados sobre a América do Sul (linha verde na Figura 4.4d), com elevados valores de REQM a partir da primeira semana. Isso ocorre, provavelmente, em resposta à baixa resolução espacial do modelo do BoM. Essa característica induz maiores valores de REQM sobre a América do Sul dada a presença dos Andes.

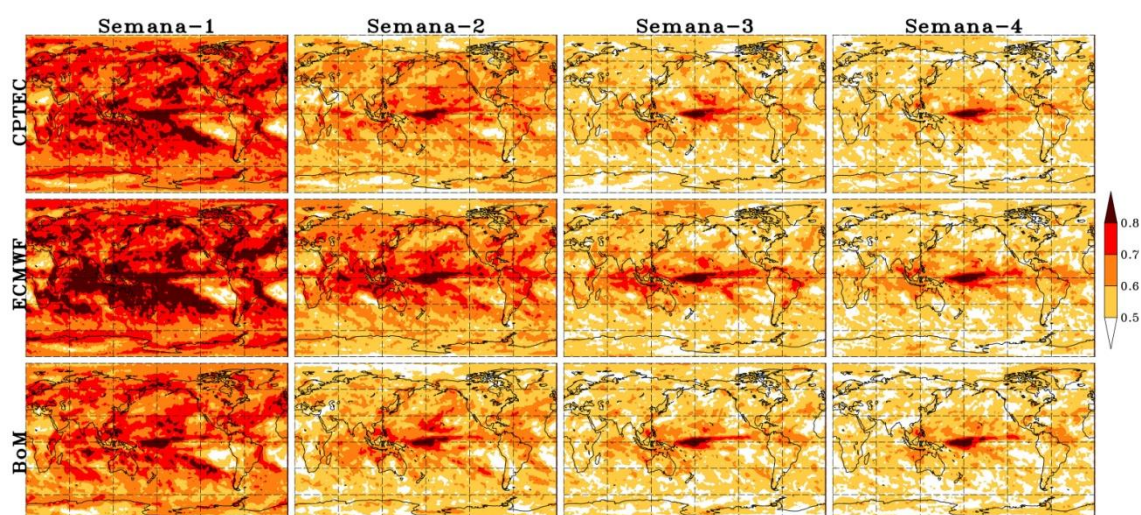
4.3.2 Avaliação das previsões probabilísticas das anomalias semanais de precipitação

Nesta parte do trabalho, as previsões retrospectivas das anomalias semanais de precipitação são avaliadas em uma perspectiva probabilística. Diferentemente da seção anterior, apenas os modelos do CPTEC, ECMWF e BoM são avaliados na abordagem probabilística, dado que os modelos do JMA e ECCO apresentam um conjunto com poucos membros (5 membros para o JMA e 4 membros para o ECCO). O número limitado de membros disponíveis para esses dois modelos dificulta a estimativa de probabilidades associadas ao evento de interesse a ser previsto. Como mencionado no Capítulo-2, as métricas usadas para a avaliação probabilística são a área sob a curva ROC (AROC) e o diagrama de confiabilidade, assim como empregado em outros trabalhos (HUDSON et al. 2011a; SUN et al. 2018; COELHO et al. 2018).

A Figura 4.5 mostra os mapas de AROC, os quais foram calculados para as probabilidades de ocorrência do evento anomalia semanal positiva de precipitação em cada ponto de grade para os modelos avaliados (linhas) e para os quatro prazos de validade de previsão (colunas). Como destacado no Capítulo-2, o valor de AROC igual a 1 representa um conjunto capaz de distinguir perfeitamente a ocorrência da não ocorrência do evento escolhido (i.e., anomalia positiva de precipitação semanal). O valor de AROC igual a 0.5 indica um conjunto que não pode distinguir o evento selecionado, com capacidade de discriminar a ocorrência do evento equivalente à capacidade de uma escolha aleatória (i.e., 50%). A Figura 4.5 mostra que os valores de

AROC diminuem com o aumento do prazo de validade de previsão. Os três modelos avaliados (CPTEC, ECMWF e BoM) apresentam melhor capacidade em discriminar a ocorrência da não ocorrência das anomalias positivas semanais de precipitação nas regiões onde esses modelos apresentam maiores valores de correlação nas quatro semanas de previsão (Figura 4.2). Ou seja, os modelos avaliados apresentam melhor discriminação em regiões onde existe maior associação com os dados do GPCP. De modo geral, o modelo do CPTEC apresenta valores de AROC menores do que o modelo do ECMWF, que, por sua vez, mostra os maiores valores de AROC nas quatro semanas de previsão. Em contrapartida, a capacidade de discriminar eventos positivos de precipitação semanal no modelo do CPTEC é mais alta do que no modelo do BoM, principalmente nas semanas-1 e 2.

Figura 4.5 - Mapa dos valores da AROC para os modelos do CPTEC, ECMWF e BoM.



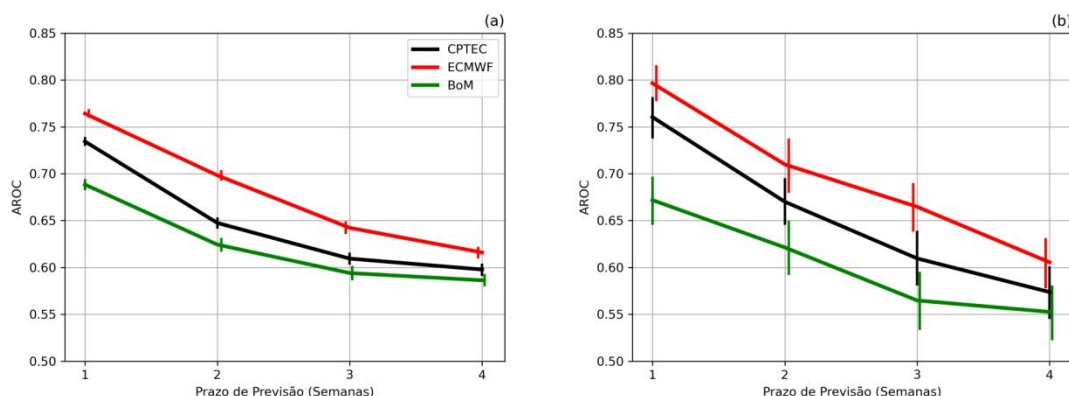
A AROC foi calculada para as probabilidades de ocorrência do evento anomalia semanal positiva de precipitação em cada ponto de grade, calculadas com o conjunto de 11 membros dos modelos do CPTEC, ECMWF e BoM nas quatro semanas de previsão (colunas). As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada modelo.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.6 ilustra AROC dos modelos do CPTEC (linhas pretas), ECMWF (linhas vermelhas) e BoM (linhas verdes) como na Figura 4.5, porém, para os pontos de grade agregados sobre a região tropical (30°N–30°S) global e sobre parte da região tropical da América do Sul (0-30°S e 55°W-35°W) nos painéis (a) e (b), respectivamente, para os

quatro prazos de validade de previsão. A Figura 4.6 mostra que os valores AROC diminuem com o aumento do tempo de previsão nas duas regiões avaliadas. Entretanto, todos os modelos mostram valores acima de 0.5. O modelo do ECMWF mostra os maiores valores de AROC, seguido pelos modelos do CPTEC e BoM. Os três modelos mostram valores ligeiramente maiores sobre a região da América do Sul do que sobre a região tropical, principalmente para as previsões com prazos de validade mais curtos.

Figura 4. 6 - AROC sobre a região tropical (a) e sobre parte da América do Sul (b).



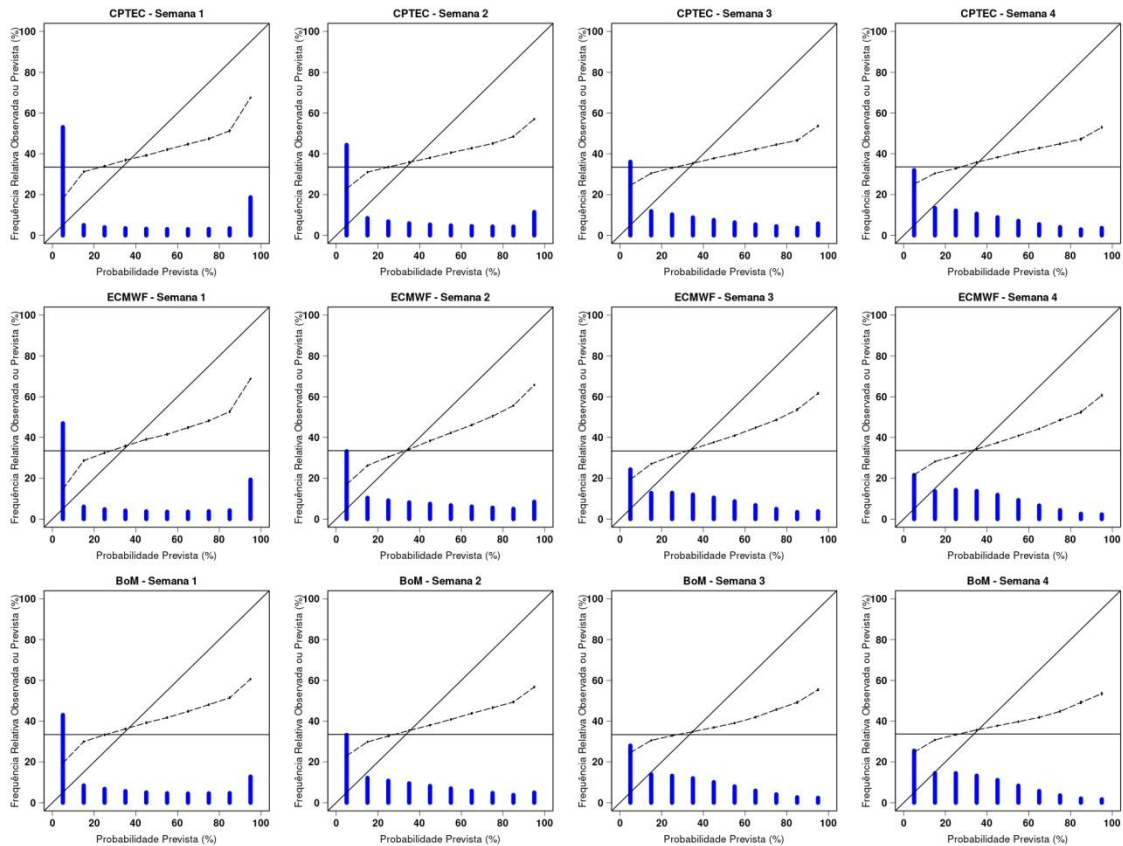
A AROC foi calculada para as probabilidades de ocorrência do evento anomalia semanal positiva de precipitação para os pontos de grade agregados sobre (a) a região tropical (30°N-30°S) e (b) parte da região tropical da América do Sul (0-30°S e 55°W-35°W) dos modelos do CPTEC, ECMWF e BoM (conjunto composto por 11 membros) nas quatro semanas de previsão. As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada modelo. As barras verticais plotadas em torno das quatro semanas de previsão para cada modelo representam o intervalo de confiança de 95%, calculado por meio de reamostragem (bootstrap) com 1000 amostras.

Fonte: Produção do autor.

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram os diagramas de confiabilidade para a região tropical e para parte da região tropical da América do Sul (0-30°S e 55°W-35°W), respectivamente. Em ambas as figuras, os diagramas foram construídos para os modelos do CPTEC, ECMWF e BoM (linhas) e para as quatro semanas de previsão (colunas), com o gráfico das probabilidades de ocorrência do evento selecionado (anomalia positiva) sendo construído em função das correspondentes frequências relativas observadas. Os intervalos de probabilidade selecionados foram 0-10%, 10-20%, 20-30%, 30-40%, 40-50%, 50-60%, 60-70%, 70-80%, 80-90% e 90-100%. A linha

tracejada mostra a frequência relativa dos intervalos de probabilidade observada associada à ocorrência do evento em função de cada intervalo de probabilidade. As barras verticais azuis representam o histograma de frequência de cada intervalo de probabilidade. A linha contínua na diagonal representa um conjunto hipotético perfeitamente confiável e com probabilidades emitidas diferentes da frequência climatológica de ocorrência do evento de interesse, a qual é representada pela linha contínua na horizontal. Dessa forma, o conjunto avaliado apresenta melhor confiabilidade e resolução quando a linha tracejada se encontra o mais próximo da linha contínua na diagonal. Para ambas as regiões selecionadas (Figuras 4.7 e 4.8), as linhas tracejadas dos três modelos avaliados (CPTEC, ECMWF e BoM) se distanciam da linha diagonal e se aproximam da linha horizontal com o aumento do prazo de validade de previsão. Ou seja, os atributos de confiabilidade e resolução diminuem com o aumento do prazo de validade da previsão. Além disso, a inclinação da linha tracejada indica que os três modelos são superconfiantes nos quatro prazos de validade de previsão e sobre as duas regiões avaliadas, dado que as previsões com altas (baixas) probabilidades são menos (mais) frequentes do que a frequência relativa observada. Com relação aos histogramas (barras azuis), nota-se que os modelos apresentam maior frequência para as previsões com probabilidades de ocorrência e não ocorrência de anomalias positivas de precipitação (i.e., probabilidades próximas de 100% e 0%, respectivamente, com o histograma apresentando um formato em “U”) nas duas primeiras semanas de previsão. Essa característica muda nas duas últimas semanas de previsão, dado que a frequência das previsões com maior valor nos três modelos diminui quando comparada com a frequência das duas primeiras semanas.

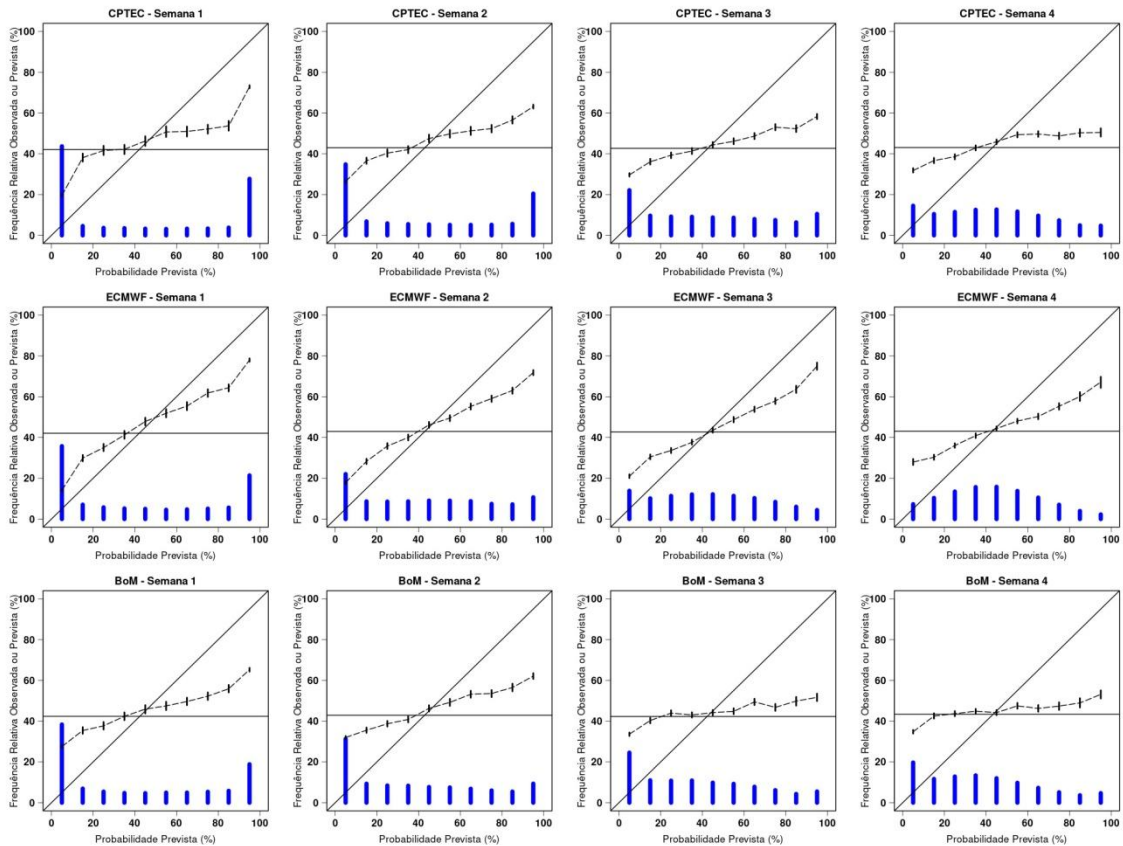
Figura 4. 7 – Diagramas de confiabilidade dos modelos do CPTEC, ECMWF e BoM.



Os diagramas foram calculados para as previsões probabilísticas, produzidas com os 11 membros de cada um dos modelos avaliados, de ocorrência de anomalia semanal positiva de precipitação para os pontos de grade agregados sobre a região tropical (30°N-30°S). As barras verticais azuis representam o histograma de frequência relativa das previsões. As barras sobre a linha tracejada (linha de confiabilidade) representam o intervalo de confiança de 95% para a frequência relativa observada calculada com o reamostragem (bootstrap) com 1000 amostras. As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada modelo.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4. 8 – Como a Figura 4.7. Porém para a região da América do Sul (0-30°S e 55°W-35°W).



Os pontos de grade sobre o oceano adjacente foram removidos.

Fonte: Produção do autor.

4.3.3 Avaliação das previsões em outros prazos de validade dentro da escala sub-sazonal

Os resultados destacados acima mostram que, embora o modelo do ECMWF apresente índices de destreza superiores aos demais modelos avaliados, todos os modelos apresentam limitações intrínsecas no que diz respeito à qualidade das previsões semanais. Por exemplo, a partir da semana-3, a habilidade preditiva de todos os modelos é limitada a região tropical (i.e., regiões com valores de correlação acima de 0.2). Como destacado na fundamentação teórica do Capítulo-3, este fato ocorre porque a escala sub-sazonal é longa o suficiente para que grande parte da memória das condições iniciais da atmosfera seja perdida (i.e., previsibilidade proveniente do estado inicial da atmosfera) e muito curta para que a variabilidade oceânica contribua como fonte de previsibilidade dos MCGAs. Dessa maneira, informações em outras escalas temporais, além das previsões das anomalias semanais de precipitação, devem ser exploradas para

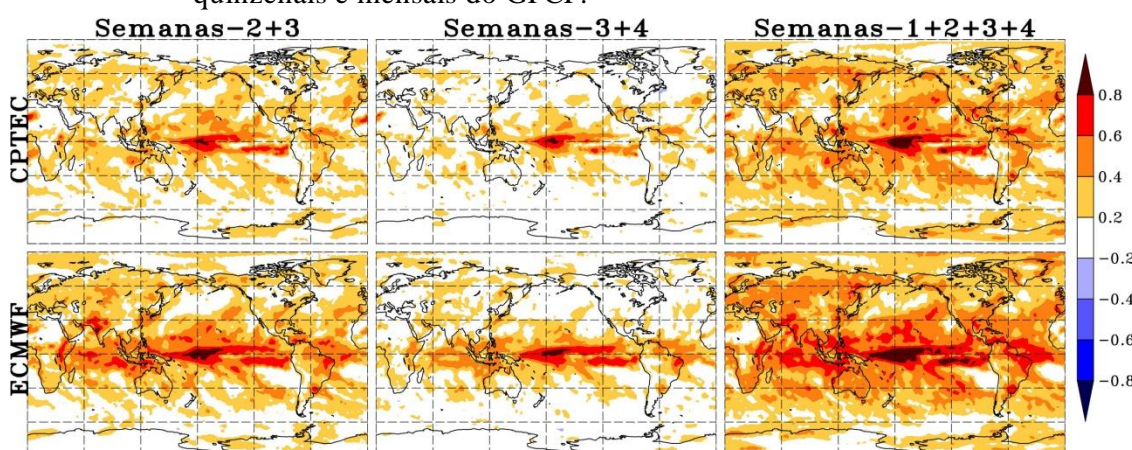
investigar de maneira mais ampla o potencial das previsões sub-sazonais. Por exemplo, Sun et al., (2018) mostraram que a habilidade preditiva dos MCGAs é melhor em determinadas regiões para as previsões de precipitação das semanas-3 e 4 combinadas (i.e., previsões quinzenais) do que para as previsões semanais com 3 semanas de antecedência. Com isso em mente, esta seção examina a habilidade preditiva do modelo do CPTEC para as previsões sub-sazonais das anomalias de precipitação a partir da combinação das semanas 2-3, semanas 3-4 combinadas e semanas 1-2-3-4 conforme ilustrado na Figura 2.1. Nesta parte, o modelo do CPTEC é comparado apenas com o modelo do ECMWF, pois ambos os modelos apresentam o mesmo número de membros e as mesmas datas de inicialização.

A Figura 4.9 mostra a distribuição espacial dos valores de correlação temporal entre as previsões retrospectivas dos dois modelos avaliados (CPTEC e ECMWF) e a observação (GPCP) (linhas) para os prazos de validade de previsões quinzenais (semanas-2 e 3 e semanas-3 e 4 combinadas) e mensal (semanas-1, 2, 3 e 4 combinadas) (colunas). O padrão espacial dos valores de correlação para os prazos de previsão quinzenal e mensal é parecido com o padrão espacial de correlação notado para o prazo semanal (Figura 4.2). Dessa maneira, os padrões espaciais dos modelos do CPTEC (primeira linha) e ECMWF (segunda linha) também são parecidos. Assim como notado anteriormente, em geral, os valores de correlação do modelo do ECMWF são maiores do que os valores de correlação do modelo do CPTEC. É importante destacar que o fato do modelo do ECMWF apresentar índices de destrezas maiores do que o modelo do CPTEC é uma característica esperada, dado que o modelo do ECMWF apresenta alta resolução espacial e acoplamento com um modelo oceânico (características que não são observadas na configuração do BAM-1.2).

Na Figura 4.9, é possível notar que as previsões quinzenais apresentam valores de correlação altos, principalmente nas semanas-2 e 3 combinadas, a qual incluem elevados valores de correlação sobre as regiões extratropicais (e.g., sobre a América do Norte). Vale notar que, em ambos os modelos, os valores de correlação para as semanas-2 e 3 combinadas são maiores do que os valores de correlação para a semana-2 (Figura 4.2) em certas regiões (e.g., Oceano Pacífico equatorial). Essa característica também é notada ao comparar as semanas-3 e 4 combinadas com a semana-3 (Figura 4.2), como reportado por Sun et. (2018). Isso também pode ser notado sobre a América

do Sul, especialmente no modelo do ECMWF que apresenta maiores valores de correlação sobre o Nordeste do Brasil nas semanas-3 e 4 combinadas comparado com a semana-3 na Figura 4.2. Ao combinar as quatro semanas (previsão mensal), os modelos do CPTEC e do ECMWF apresentam maiores valores de correlação quando comparados com os valores de correlação para as previsões semanais (a partir da semana-2) e quinzenais.

Figura 4. 9 - Correlação dos modelos do CPTEC e ECMWF com relação às anomalias quinzenais e mensais do GPCP.



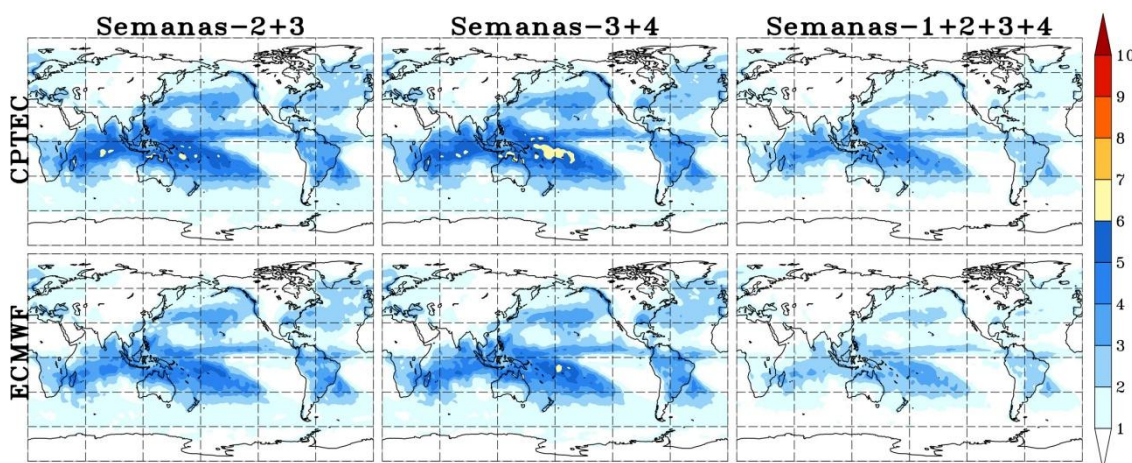
As correlações foram calculadas para as anomalias quinzenais e mensais de precipitação entre a média do conjunto com 11 membros dos modelos do CPTEC e ECMWF e a observação (GPCP) nas quinzenas das semanas-2 e 3 combinadas e semanas-3 e 4 combinadas (previsão quinzenal) e para a anomalia mensal das semanas-1, 2, 3 e 4 combinadas (previsão mensal) (colunas). As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada modelo.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.10 mostra as características espaciais dos valores de REQM das previsões retrospectivas dos dois modelos avaliados (CPTEC e ECMWF) (linhas) para os prazos de validade das previsões quinzenais (semanas-2 e 3 e semanas-3 e 4 combinadas) e mensais (semanas-1, 2, 3 e 4 combinadas) (colunas). Assim como notado no padrão de correlação, os padrões de REQM para as previsões quinzenais e mensais são similares ao padrão de REQM para as previsões semanais. Os valores de REQM do modelo do ECMWF são menores do que os valores de REQM do modelo do CPTEC. A partir da Figura 4.10 é possível notar que os valores de REQM diminuem com o aumento do prazo de validade de previsão. Ou seja, os valores de REQM dos modelos do CPTEC e

do ECMWF para a previsão mensal são menores do que os valores de REQM para as previsões quinzenais. Por sua vez, os valores de REQM para as previsões quinzenais são menores do que os valores de REQM para as previsões semanais (Figura A.4.3 no Apêndice 4). Entretanto, realizar uma comparação direta dos valores de REQM entre as diferentes janelas de previsão (i.e., semanas vs., quinzenas vs., meses), como apresentado anteriormente para os valores de correlação, não seria adequada nessa avaliação, dado que os valores do desvio padrão do dado de referência (GPCP) também diminui ao ser calculado para as anomalias quinzenais e mensais. Dessa forma, o REQM é menor para esses prazos de validade, uma vez que a magnitude do REQM é dependente da intensidade da variabilidade.

Figura 4.10 - Como a Figura 4.9. Porém para os valores de REQM.

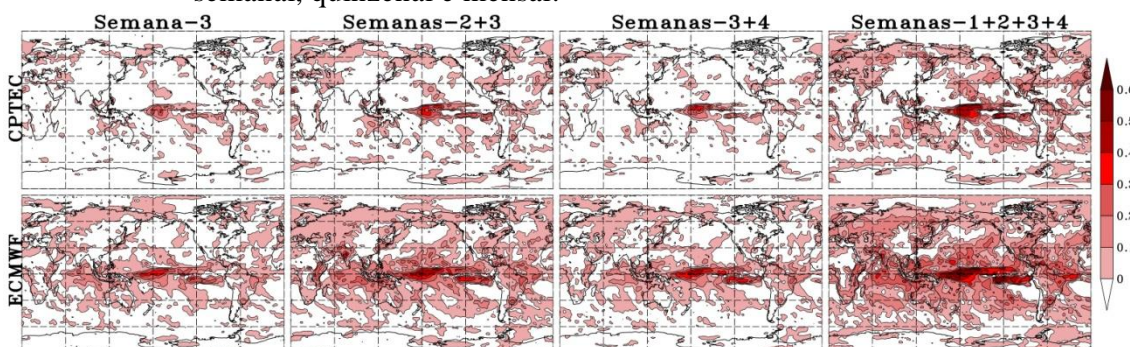


Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.11 mostra os valores de PH dos modelos do CPTEC e ECMWF (linhas) para a semana-3, semanas-2 e 3 combinadas, semanas-3 e 4 combinadas e semanas-1, 2, 3 e 4 combinadas (colunas). Como destacado no Capítulo-2, o PH determina a habilidade preditiva de um dado MCGA por meio da comparação do REQM desse modelo e do REQM de uma previsão de referência (previsão climatológica). Os valores de PH positivo indicam regiões onde os MCGAs apresentam REQM menor do que o REQM da previsão de referência (climatologia). Essas regiões podem ser definidas como regiões onde os modelos apresentam previsões úteis. A Figura 4.11 mostra que os valores de PH dos modelos do CPTEC e do ECMWF são positivos sobre regiões onde esses modelos apresentam valores altos de correlação (Figuras 4.2 e 4.9). Dessa forma, o modelo de ECMWF apresenta valores de PH mais intensos do que o modelo do

CPTEC. Em ambos os modelos, as regiões com previsões úteis são restritas sobre os oceanos tropicais (principalmente para o modelo do CPTEC) para as previsões semanais com três semanas de antecedência (primeira coluna na Figura 4.11). Para a semana-4 (figura não mostrada), essa característica é ainda mais marcante. Contudo, os valores de PH são mais intensos para os prazos de validade de previsão quinzenais e mensais, exceto para as semanas-3 e 4 combinadas, onde os valores de PH são similares aos valores de PH da semana-3 de cada modelo. Com isso, os modelos do CPTEC e do ECMWF apresentam previsões úteis sobre as regiões extratropicais para o prazo quinzenal das semanas-2 e 3 combinadas (segunda coluna na Figura 4.11) e para o prazo mensal (última coluna na Figura 4.11), as quais são restritas para as previsões semanais com prazo de validade mais longos (semanas-3 e 4). Esse é um resultado importante, dado que ilustra que previsões sub-sazonais mais habilidosas podem ser extraídas para as previsões quinzenais e mensais.

Figura 4. 11 – Valores de PH para os modelos do CPTEC e ECMWF para os prazos de validade semanal, quinzenal e mensal.



Os valores de PH foram calculados para as previsões do CPTEC e ECMWF (médias dos conjuntos com 11 membros) das anomalias de precipitação da semana-3, da quinzena-2+3 e quinzena-3+4 (formadas pelas semanas-2 e 3 combinadas e semanas-3 e 4 combinadas, respectivamente) e mensais (formadas pelas semanas-1, 2, 3 e 4 combinadas) (colunas). As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada modelo.

Fonte: Produção do autor.

Assim como notado nos índices de destreza empregados na avaliação das previsões determinísticas, os índices de destreza utilizados para examinar as previsões probabilísticas aumentam para as previsões quinzenais e mensais. Sobre a região tropical, o modelo do CPTEC (ECMWF) apresenta valores de AROC de 0.63 (0.69)

para as semanas-2 e 3 combinadas, 0.61 (0.65) para as semanas-3 e 4 combinadas e 0.67 (0.73) para as semanas-1, 2, 3 e 4 combinadas, enquanto que esses valores são de 0.65 (0.70), 0.61 (0.64) e 0.60 (0.62) para as semanas-2, 3 e 4, respectivamente (Figura 4.6a). Isso também é notado para a região da América do Sul (0-30°S e 55°W-35°W). O modelo do CPTEC (ECMWF) apresenta valores de AROC de 0.67 (0.72) para as semanas-2 e 3 combinadas, 0.60 (0.66) para as semanas-3 e 4 combinadas e 0.70 (0.75) para as semanas-1, 2, 3 e 4 combinadas, enquanto que esses valores são de 0.67 (0.71), 0.61 (0.66) e 0.57 (0.6) para as semanas-2, 3 e 4, respectivamente (Figura 4.6b). Os conjuntos desses modelos também apresentam maior confiabilidade, resolução e nitidez nas previsões quinzenais e mensais (Figura E.1 e E.2 no Apêndice - E).

4.3.4 Avaliação das previsões determinísticas diárias da OMJ

Nesta Seção, a habilidade preditiva do modelo do CPTEC em representar a evolução diária da OMJ é comparada com a habilidade preditiva dos modelos do JMA, ECCO, ECMWF e BoM. As métricas usadas para a avaliação das previsões determinísticas da OMJ são a correlação bivariada e o Erro Quadrático Médio Bivariado (EQMB), assim como realizado no Capítulo-3. Além disso, o erro associado com a amplitude da OMJ (EQMBa) e o erro associado com a fase da OMJ (EQMf) também são mostrados.

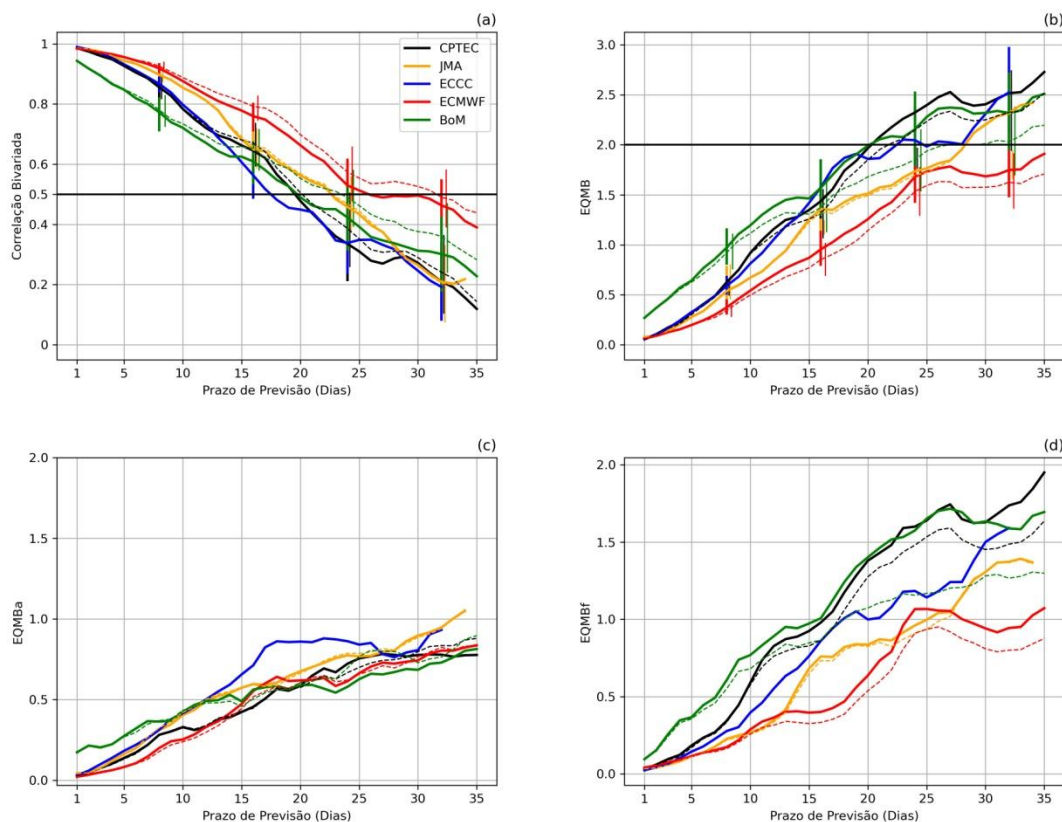
A Figura 4.12 mostra a avaliação comparativa da qualidade da previsão da OMJ para os cinco modelos aqui investigados. Como destacado no Capítulo-2, a habilidade preditiva para a OMJ pode ser definida pelo limiar de 0.5 da correlação bivariada e pelo limiar de 2 do EQMB. Esses dois índices são mostrados na Figura 4.12a e 4.12b, respectivamente. Além disso, o EQMB foi desmembrado em dois componentes, o erro associado com a amplitude da OMJ (EQMBa, Figura 4.12c) e o erro associado com a fase da OMJ (EQMf, Figura 4.12d), os quais mostram, respectivamente, o papel das limitações associados à representação da intensidade e da velocidade de propagação da OMJ no crescimento do EQMB. As barras verticais nas Figuras 4.12a e 4.12b representam o intervalo de confiança de 95% calculado por meio do método de reamostragem (bootstrap) com 1000 amostras.

A Figura 4.12a mostra que os valores de correlação bivariada dos cinco modelos avaliados diminuem com aumento do prazo de validade de previsão, assim como foi notado na avaliação das configurações do BAM-1.2 no Capítulo-3. A habilidade

preditiva varia entre os modelos. Os valores de correlação bivariada calculados com a média do conjunto com quatro membros (linhas sólidas) mostra que o modelo do ECMWF apresenta o melhor desempenho, atingindo o limiar de 0.5 em torno de 26 dias de previsão. Por outro lado, o modelo do ECCC apresenta a maior diminuição dos valores de correlação bivariada com o aumento do prazo de validade de previsão. Dessa maneira, o modelo do ECCC alcança o limiar de 0.5 com 17 dias de previsão. O modelo do CPTEC aparece entre esses dois modelos, com valores de correlação bivariada acima de 0.5 até o tempo de previsão de 19 dias. O mesmo valor é encontrado para o modelo do BoM. O JMA também apresenta um desempenho satisfatório, o qual atinge o limiar com 23 dias de previsão. Como esperado, ao utilizar todos os membros disponíveis de cada modelo para calcular a média do conjunto (linhas tracejadas), é notado um aumento nos valores de correlação bivariada. Esse aumento é sutil no modelo do JMA, dado que o incremento no número de membros foi de apenas um membro. É notado um aumento na habilidade preditiva do CPTEC da ordem de um dia quando o número de membros passa de 4 para 11. Esse aumento é maior para os modelos do ECMWF e do BoM, os quais apresentam um ganho de 6 e 4 dias de previsibilidade da OMJ, respectivamente.

A Figura 4.12b mostra os valores de EQMB para os cinco modelos avaliados. O EQMB aumenta em função do prazo de validade de previsão. O modelo do ECMWF, assim como notado anteriormente, apresenta os menores erros de previsão da OMJ. Esse modelo é o único, entre os modelos investigados, que não ultrapassa o limiar de 2.0 nos 35 dias de previsão avaliados. O modelo do ECMWF é seguido pelo modelo do JMA, o qual atinge o limiar com 28 dias de previsão. As linhas contínuas (i.e., a média do conjunto composta por 4 membros) mostram que os modelos do CPTEC e do BoM cruzam o limiar de 2.0 com 20 dias de previsão. Diferentemente da Figura 4.12a, o modelo do ECCC apresenta maior horizonte de previsão do que os modelos do CPTEC e BoM, o qual alcança o limiar com 22 dias de previsão. Os valores de EQMB diminuem quando o tamanho do conjunto aumenta de 4 para o número máximo de membros disponíveis em cada modelo (linhas tracejadas). Essa característica é mais evidente para os modelos do ECMWF, BoM e CPTEC, os quais apresentam um maior incremento no número de membros (de 4 para 11 membros).

Figura 4.12 - Valores de correlação bivariada, EQMB, EQMBa e EQMBf para os modelos avaliados.



Os valores de correlação bivariada (a), EQMB (b), EQMBa (c) e EQMBf e (d) foram computados para os cinco modelos investigados com a média do conjunto com 4 membros (linhas contínuas) e com a média do conjunto com o número total de membros de cada modelo (linhas pontilhadas), em função do tempo de previsão em dias. As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada modelo. As barras verticais mostradas em (a) e (b) em torno dos tempos de previsão de 8, 16, 24 e 32 dias representam o intervalo de confiança de 95%, calculados por meio de reamostragem (bootstrap) com 1000 amostras.

Fonte: Produção do autor.

A classificação do desempenho dos modelos definida nas Figuras 4.12a e 4.12b não é considerada significativa, dado o tamanho dos intervalos de confiança calculados para os valores de correlação bivariada e EQMB (i.e., nota-se sobreposição das barras verticais para os modelos do CPTEC, ECCC, JMA e BoM em todos os prazos de validade de previsão nessas duas figuras). Entretanto, os resultados encontrados neste estudo corroboram com os trabalhos de Vitart (2017) e Lim et al. (2018). Nota-se que os

modelos do CPTEC, ECMWF, JMA e ECCC apresentam valores de correlação bivariada próximos de 1 e valores de EQMB próximos de 0 nos prazos de validade de previsão mais curtos. Esses modelos mostram desempenho similar até o quinto dia de previsão, quando os valores de correlação bivariada e EQMB dos modelos do CPTEC e ECCC se degradam de forma mais intensa do que os valores dos modelos do ECMWF e JMA. Embora o modelo do BoM apresente desempenho inferior aos demais modelos nos prazos de validade de previsão mais curtos (provavelmente devido a baixa resolução espacial), a degradação dos valores de correlação bivariada e EQMB evoluem a uma taxa mais lenta do que os modelos que apresentam apenas o componente atmosférico (CPTEC, JMA e ECCC). Dessa forma, o modelo do BoM atinge o nível de desempenho do ECCC com 15 dias de previsão e do CPTEC com 19 dias. O aumento do tamanho do conjunto apresenta um papel importante para a melhoria do desempenho da previsão da OMJ. O desempenho dos modelos do CPTEC, BoM e ECMWF melhora quando a média do conjunto é composta por 11 membros (linhas tracejadas) ao invés de 4 membros (linhas contínuas).

Os valores de EQMBa para o CPTEC são geralmente próximos aos valores de EQMBa dos modelos do ECMWF e JMA (os dois melhores modelos classificados nas Figuras 4.12a e 4.12b). ECCC mostra os maiores valores de EQMBa entre os prazos de validade de previsão de 10 e 26 dias, enquanto que o modelo do BoM mostra os maiores valores de EQMBa nos prazos de validade de previsão mais curtos. Entretanto, depois de 20 dias de previsão, o BoM mostra os menores valores de EQMBa. A Figura 4.12c indica que o aumento no tamanho do conjunto não apresenta impacto para a redução dos valores de EQMBa, uma vez que as linhas contínuas e tracejadas apresentam valores similares para todos os modelos.

A Figura 4.12d mostra que o modelo do ECMWF apresenta os menores valores de EQMBf entre todos os modelos avaliados. Os modelos do CPTEC e BoM apresentam os maiores valores de EQMBf, principalmente a partir do prazo de validade de previsão de 18 dias, onde esses dois modelos mostram valores bem superiores aos demais modelos. Essa característica contribui para o desempenho inferior desses dois modelos identificado na Figura 4.12b. Em geral, os valores de EQMBf (Figura 4.12d) são maiores do que os valores de EQMBa (Figura 4.12c). Isso indica que os modelos apresentam maior dificuldade em caracterizar a velocidade de propagação do que a

intensidade da OMJ. Essa característica também foi encontrada por Lim et al. (2018). Diferentemente do que foi notado para o EQMBa, o EQMBf é sensível ao tamanho do conjunto, dado que os valores de EQMBf diminuem com o aumento do número de membros. Essa característica é mais evidente nos modelos do CPTEC, ECMWF e BoM, os quais mostram menores valores de EQMBf quando a média do conjunto apresenta 11 membros (linhas tracejadas) em vez de 4 membros (linhas contínuas).

4.4 Sumário

A comparação do desempenho do modelo do CPTEC com o desempenho dos modelos do S2S avaliados neste capítulo mostrou que o modelo do CPTEC apresenta habilidade preditiva equivalente e comparável aos demais modelos investigados na escala sub-sazonal, tanto para a previsão das anomalias semanais de precipitação como para a previsão da OMJ.

A avaliação das previsões retrospectivas das anomalias semanais de precipitação dos cinco modelos avaliados mostrou que o modelo do ECMWF é o que apresenta os maiores índices de destreza, com certo nível de habilidade preditiva maior do que os demais modelos. Isso pode estar relacionado ao fato de que o ECMWF possui alta resolução espacial, acoplamento com o oceano e parametrizações mais apropriadas. Como os cinco modelos possuem características distintas com relação à configuração do sistema de previsão sub-sazonal, foi possível notar possíveis influências da configuração dos modelos na qualidade das previsões, tais como número de membros do conjunto, resolução espacial e acoplamento atmosfera-oceano. Como exemplo, foi notado que: a habilidade preditiva dos MCGAs aumenta quando um número maior de membros é utilizado para a obtenção da média do conjunto, principalmente nos modelos que apresentam um maior número de membros (CPTEC, ECMWF e BoM); os modelos com maior resolução espacial (ECMWF, JMA e ECCC) apresentam maior habilidade preditiva, principalmente nos prazos de validade de previsão mais curtos; e, os modelos que apresentam acoplamento com o oceano (ECMWF e BoM) mostraram um menor decréscimo dos índices de destreza com o aumento do prazo de validade de previsão. Tais características também foram notadas ao avaliar especificamente as previsões retrospectivas para a América do Sul.

Com relação à avaliação dos índices de destreza para as previsões retrospectivas da OMJ, o modelo do CPTEC apresenta previsões habilidosas até em torno de 20 (21) dias de antecedência ao utilizar a média do conjunto com 4 (11) membros. Isso evidencia que, assim como para as previsões das anomalias semanais de precipitação, o modelo do CPTEC mostra desempenho equivalente aos demais modelos do S2S, exceto ao modelo do ECMWF, o qual apresenta previsões hábeis até em torno de 30 dias de antecedência. O modelo do CPTEC mostrou maior dificuldade em representar a fase do que a amplitude da OMJ. Ou seja, a velocidade de propagação é menos acurada do que a intensidade da OMJ no modelo do CPTEC. Essa característica foi notada nos demais modelos avaliados, entretanto, essa diferença nos dois componentes da OMJ é mais acentuada no modelo do CPTEC.

Em relação à habilidade preditiva dos MCGAs para diferentes prazos de validade de previsão sub-sazonal (quinzenal e mensal), foi notado que os modelos do CPTEC e do ECMWF apresentam maior habilidade preditiva para a previsão das anomalias quinzenais e mensais de precipitação do que para as anomalias semanais. Por exemplo, os índices de destreza calculados para as semanas-2 e 3 (3 e 4) combinadas apresentam valores equivalentes quando comparados com os índices computados para a semana-2 (3) apenas, com valores ligeiramente superiores em determinadas regiões. O aumento na habilidade preditiva notado para os prazos quinzenal e mensal é robusto, dado que os modelos do CPTEC e do ECMWF apresentam previsões úteis (i.e., valores de PH positivos) até mesmo sobre regiões extratropicais para o prognóstico das anomalias de precipitação para as semanas-2 e 3 combinadas e das semanas-1, 2, 3 e 4 combinadas. Em geral, os MCGAs apresentam valores de PH positivos apenas sobre as regiões tropicais para as previsões semanais de precipitação com prazos de validade além da semana-2.

5 IMPACTO DOS MODOS DOMINANTES DE VARIABILIDADE SOBRE A AMÉRICA DO SUL NA HABILIDADE PREDITIVA DOS MODELOS DO CPTEC E DO ECMWF PARA AS PREVISÕES SUB-SAZONAIS DA PRECIPITAÇÃO

5.1 Introdução

Este capítulo, o qual apresenta a terceira e última parte dos resultados desta tese, tem dois focos principais. Primeiramente, as fontes de previsibilidade (fenômenos atmosféricos ou oceânicos que contribuem para a habilidade preditiva dos MCGAs em uma determinada escala temporal) das anomalias semanais de precipitação sobre a América do Sul são determinadas. Isso foi realizado a partir de uma investigação dos correspondentes modos dominantes de variabilidade espaço-temporal identificados através de uma análise de FOEs, possíveis relações entre os modos de variabilidade e potenciais fenômenos atmosféricos/oceânicos são examinadas para auxiliar na identificação das fontes de previsibilidade envolvidas. No segundo foco principal, a capacidade dos modelos do CPTEC e do ECMWF em representar os modos dominantes de variabilidade de precipitação semanal sobre a América do Sul é avaliado por meio das previsões retrospectivas produzidas com uma a quatro semanas de antecedência.

5.2 Fundamentação teórica

As fontes de previsibilidade na escala sub-sazonal e a capacidade dos MCGAs em representar essas fontes têm sido estudadas por meio de vários métodos, entre eles: avaliação condicional (HUDSON et al., 2011a; LIN; ROBERTSON, 2015; KLINGAMAN et al., 2020); regressão linear (DE ANDRADE et al., 2019); filtros temporais (SCHRECK et al., 2020) e análise de FOEs (DONG et al., 2020).

Na avaliação condicional, um determinado fenômeno (e.g., OMJ, ENOS) é examinado como uma possível fonte de previsibilidade para uma determinada região através da estratificação das datas de inicialização de um modelo em função das condições observadas do respectivo fenômeno. Por exemplo, as previsões inicializadas durante as fases ativas da OMJ são separadas das previsões inicializadas durante a correspondente fase inativa. Em seguida, esses dois grupos de previsões são avaliados e os índices de destreza são computados. Se a habilidade preditiva dos MCGAs for maior na amostra em que o determinado fenômeno esteve ativo, tal fenômeno é identificado como fonte

de previsibilidade para a região estudada. No caso contrário, a exclusão do fenômeno como fonte de habilidade preditiva deve ser realizada com cautela, dado que a ausência de incremento dos índices de destreza na amostra em que o fenômeno avaliado esteve ativo pode estar relacionada com o fato do MCGA avaliado não representar de forma satisfatória o padrão de teleconexão do associado ao fenômeno. Uma característica que limita a utilização dessa abordagem é o fato do curto período das previsões retrospectivas disponíveis nos projetos S2S e SubX. Isso faz com que o tamanho das amostras estratificadas seja reduzido devido ao condicionamento da presença do determinado fenômeno. Outra desvantagem é a necessidade da escolha a priori dos fenômenos. Isso pode resultar na seleção de fenômenos que não contribuem para a habilidade preditiva dos MCGAs, e, portanto, a diferença entre a habilidade preditiva das duas amostras pode não apresentar valores significativos. Li e Robertson (2015), por exemplo, avaliaram a habilidade preditiva do modelo do ECMWF para a previsão semanal com três semanas de antecedência para uma amostra com cinco anos de ENOS ativo (El-Niño ou La-Niña) e para outra amostra com cinco anos de ENOS inativo. Os resultados mostraram que os índices de destreza do modelo do ECMWF aumentam sobre o Oceano Pacífico tropical, norte do Brasil, sul e sudeste da Austrália e parte da África durante períodos de ENOS ativo. Entretanto, foi notado que os índices de destreza diminuem em algumas regiões, como, por exemplo, sobre o Oceano Atlântico tropical. Nesse contexto, Klingaman et al (2020) avaliaram o papel do ENOS e OMJ na habilidade preditiva dos modelos do CPTEC, ECMWF, NCEP e UKMOT sobre a América do Sul. Os resultados mostraram que, de modo geral, a habilidade preditiva desses modelos não muda quando esses fenômenos estão ativos durante as datas de inicialização dos modelos avaliados. Isso sugere que, ou esses fenômenos podem não atuar como fonte de previsibilidade para a América do Sul, ou que os modelos não são capazes de representar a influência desses fenômenos na precipitação sobre a América do Sul.

No processo de determinar a fontes de previsibilidade por meio da regressão linear, o um determinado fenômeno é inicialmente selecionado, assim como na avaliação condicional, e seu padrão espacial de teleconexão é definido por meio de regressão linear (e.g., anomalias de precipitação global regredidas dentro do índice IOS). Em seguida, o padrão regredido é removido das previsões retrospectivas. A avaliação da

fonte de habilidade preditiva é feita em duas amostras distintas. Na primeira, as métricas de avaliação são calculadas entre as previsões retrospectivas e os dados de referência sem remover os padrões de regressão das previsões. Na segunda, a mesma avaliação é realizada, exceto por remover o padrão de regressão das previsões retrospectivas. A remoção da variabilidade linearmente dependente associada a um determinado fenômeno é empregada para avaliar o impacto do fenômeno na habilidade preditiva de um MCGA. Nesse caso, quanto maior a redução na habilidade preditiva, maior é a contribuição do fenômeno avaliado para a habilidade preditiva do MCGA. Em um contexto global, de Andrade et al. (2019) avaliaram o papel do ENOS e da OMJ na habilidade preditiva dos 11 modelos do projeto S2S. Os resultados mostraram que os índices de destreza dos 11 modelos diminuem sobre regiões que são fortemente influenciadas pelo ENOS e OMJ quando os padrões de regressão desses dois fenômenos com a precipitação foram removidos das previsões semanais. Entretanto, em determinadas regiões, incluindo a América do Sul, os modelos apresentaram índices de destreza elevados, mesmo após a remoção dos padrões de teleconexão associados ao ENOS e a OMJ. Esse fato sugere que a habilidade preditiva dos modelos do projeto S2S pode estar ligada a atuação de outros fenômenos sobre a América do Sul.

Na abordagem com filtros temporais, uma determinada faixa temporal, a qual pode ou não estar associada a um determinado fenômeno atmosférico/oceânico (e.g., a variabilidade entre 30-60 dias associada com a OMJ), é realçada por meio da aplicação de filtros temporais nas previsões retrospectivas e nos dados de referência. Com os dados filtrados, as métricas de avaliação são computadas e os índices de destreza alcançados pelos MCGA são atribuídos ao fenômeno/oscilação definido. Além disso, um fato que torna esse método interessante é a capacidade de se determinar a contribuição potencial de um determinado fenômeno/oscilação a partir da filtragem dos dados observacionais (ou de referência). Nesse caso, os dados observacionais são filtrados em uma determinada faixa temporal e as métricas de avaliação são calculadas com os dados observacionais não filtrados confrontados com a amostra gerada a partir dos dados observacionais filtrados. Desse modo, os níveis de destreza encontrados são atribuídos à contribuição máxima do determinado fenômeno/oscilação para a habilidade preditiva dos MCGAs. Contudo, a desvantagem desse método é a aplicação dos filtros temporais nas previsões retrospectiva, dada a dependência da climatologia do MCGA

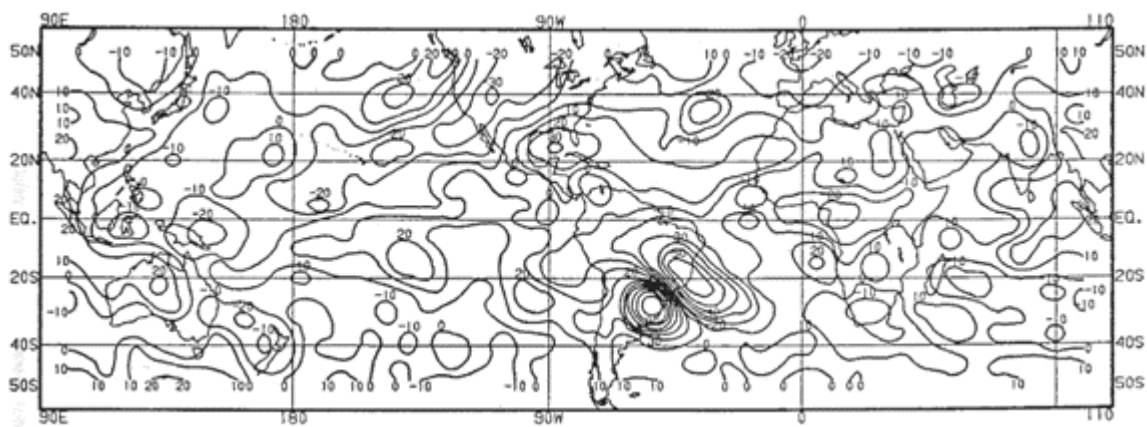
com o prazo de validade da previsão (isso é conhecido como “deriva do modelo”). Schreck et al. (2020) estudaram o impacto da variabilidade interanual, OMJ e das ondas equatoriais de Kelvin e Rossby na habilidade preditiva do modelo NCEP para a previsão sub-sazonal da precipitação. Os autores mostraram que para as previsões com duas a quatro semanas de antecedência, a principal fonte de previsibilidade vem da variabilidade de baixa frequência (interanual), associada, principalmente, com o ENOS. Além do ENOS, os autores notaram que a OMJ também contribui para a habilidade preditiva sub-sazonal da precipitação. Entretanto, a contribuição da OMJ é limitada para a região do Oceano Índico.

Na análise de FOEs, os modos dominantes de variabilidade espaço-temporal sobre uma determinada região são identificados tanto nos dados observacionais (ou de referência) quanto nas previsões retrospectivas. Dessa forma, a capacidade dos MCGAs em representar as estruturas espaciais e temporais desses modos pode ser determinada por meio de métricas de avaliação (e.g., correlação linear). Em geral, os padrões espaciais definidos pela análise de FOEs coincidem com os padrões de habilidade preditiva dos modelos (DONG et al., 2020). Isso indica que os padrões de variabilidade encontrados na análise de FOEs podem ser associados a potenciais fontes de previsibilidade em uma determinada região. Com isso, necessário estabelecer uma relação do modo dominante de variabilidade com fenômenos atmosféricos/oceânicos para a determinação da fonte de previsibilidade. A análise de FOEs é capaz de determinar modos dominantes de variabilidade que são influenciados por diferentes fenômenos atmosféricos/oceânicos (o que por muitas vezes remete a interações entre escalas). Nesse caso, a fonte de previsibilidade pode estar associada à soma de vários fenômenos. Um exemplo é a variabilidade intrassazonal da precipitação sobre a América do Sul. Nessa região, observa-se uma contribuição importante tanto da OMJ como de teleconexões trópico-extratropicais (GRIMM, 2019). Este fato pode ser uma explicação para a habilidade preditiva dos MCGAs não removida sobre a América do Sul no estudo de Andrade et al. (2019) e possivelmente uma explicação para os resultados de Klingaman et al. (2020) não indicarem um impacto importante do ENOS e da OMJ na habilidade preditiva dos MCGAs sobre a América do Sul. Dong et al. (2020) utilizaram uma variante da análise de FOEs para determinar o modo mais previsível de precipitação sobre o setor Indo-Pacífico (30°N-30°S e 60°E-160°E) e para analisar a habilidade do modelo do NCEP

em representar esse padrão de variabilidade na escala de tempo sub-sazonal. Dessa forma, os autores mostraram que o padrão mais previsível é determinado pelo primeiro modo da análise de FOEs, o qual mostra um dipolo zonal de precipitação associado com a propagação para leste da OMJ durante as estações de verão e outono do Hemisfério Sul. O modelo do NCEP representa de forma satisfatória esse padrão com até 30 dias de antecedência.

Grande parte da América do Sul e do Brasil é caracterizada por um marcante ciclo sazonal de precipitação, com a estação chuvosa ocorrendo durante o verão e a estação seca ocorrendo durante o inverno (RAIA; CAVALCANTI, 2008). Por essa razão, o regime de precipitação sobre a América do Sul é caracterizado como um regime de monção (VERA et al., 2006). Durante o período úmido do regime de monção da América do Sul, o qual ocorre geralmente entre os meses de novembro a março, o padrão dominante de variabilidade de precipitação é caracterizado por um dipolo meridional de anomalia de precipitação (também notado nos campos de atividade convectiva) sobre a parte leste da América do Sul, o qual pode ser visualizado na Figura 5. 1, retirado do trabalho de Casarin e Kousky (1986). O polo mais ao norte é notado sobre o leste da América do Sul tropical (sobre parte das regiões do Nordeste e Sudeste do Brasil), enquanto que o polo mais ao sul atua sobre o Sul do Brasil, nordeste da Argentina, Paraguai e Uruguai. Ambos os polos se estendem em direção ao Oceano Atlântico adjacente. Esse padrão mostra o contraste de precipitação/convecção entre os dois polos. Ou seja, quando um dos polos está sob a influência de condições úmidas, o outro está sob a influência de condições de estiagem devido aos movimentos de compensação da circulação. Por esse motivo, o padrão de dipolo também é conhecido como padrão de gangorra de precipitação da América do Sul. Pelo fato do polo mais ao norte ser notado na região de atuação da ZCAS, vários trabalhos associam a fase em que há atividade convectiva nesse polo com a presença da ZCAS (CASARIN; KOUSKY, 1986; LIEBMANN et al, 1999; PAEGLE; MO, 2000; CUNNINGHAM; CAVALCANTI, 2006; GONZALEZ; VERA, 2014).

Figura 5. 1 - Padrão de dipolo sobre a América do Sul.



Fonte: Casarin e Kousky (1986).

O padrão de dipolo sobre a América do Sul pode ser identificado em várias escalas de tempo, principalmente na variabilidade intrassazonal. Casarin e Kousky (1986) sugeriram uma relação da OMJ e o dipolo sobre a América do Sul. Posteriormente, ao estudar os padrões de circulação atmosférica que antecedem a ocorrência de episódios de ZCAS na escala de tempo de 2-30 dias, Liebmann et al (1999) também identificaram o padrão de dipolo sobre a América do Sul. Nessa escala de tempo, o dipolo é associado com uma estrutura de trem de onda de Rossby que se estende da região extratropical do Oceano Pacífico Sul para o leste da América do Sul. Esses dois trabalhos sugerem que a atividade do padrão de dipolo é modulada por fenômenos que atuam em escalas de tempo distintas. Este fato foi evidenciado no estudo de Paegle e Mo (2000), o qual mostrou que o padrão de dipolo é influenciado por dois distintos modos de variabilidade associados a um padrão de teleconexão engatilhado pela atividade convectiva sobre o centro-oeste do Oceano Pacífico tropical. O primeiro modo, entre a banda de 36-40 dias, apresenta uma relação com a circulação tropical por meio da propagação da OMJ, como sugerido por Casarin e Kousky (1986). O segundo modo, na banda de 22-28 dias, apresenta uma forte associação com um padrão de trem de onda de Rossby extratropical sobre o Oceano Pacífico Sul, como ilustrado no trabalho de Liebmann et al. (1999).

Assim como Paegle e Mo (2000), Gonzalez e Vera (2014) mostraram que o padrão de dipolo sobre a América do Sul aparece em duas bandas temporais dentro da escala intrassazonal (10-30 dias e 30-90 dias). Embora os trabalhos de Casarin e Kousky (1986) e Paegle e Mo (2000) também tenham reportado características similares,

Gonzalez e Vera (2014) mostraram de forma mais detalhada que o dipolo sobre a América do Sul na escala de tempo de 30-90 dias é relacionado a um trem de ondas de Rossby com trajetória em forma de arco sobre o Oceano Pacífico Sul. Ou seja, o dipolo sobre a América do Sul pode ser modulado tanto por teleconexão trópico-trópico quanto por teleconexão trópico-extratropical na escala temporal de 30-90 dias. Por outro lado, Gonzalez e Vera (2014) não encontraram uma relação do padrão de dipolo na escala de tempo de 10-30 dias com a convecção tropical. Esses autores encontraram um padrão de trem de ondas que tem origem na região subtropical do Oceano Pacífico Sul, diferentemente do que foi mostrado em Liebmann et al. (1999) e Paegle e Mo (2000).

Como mencionado anteriormente, alguns trabalhos associam o padrão de dipolo (quando este apresenta sinal de excesso de precipitação ou atividade convectiva no polo mais ao norte e déficit de precipitação ou inibição de atividade convectiva no polo mais ao sul) com a manifestação da ZCAS. Por exemplo, no trabalho de Cunningham e Cavalcanti (2006), a influência das teleconexões trópico-trópico e trópico-extratropical no padrão de dipolo sobre a América do Sul em escala de tempo de 30-90 dias foi avaliada com relação ao posicionamento da ZCAS. Os autores mostraram que o padrão trópico-trópico apresenta um sinal maior em eventos de ZCAS deslocada para o norte de sua posição climatológica, enquanto que a teleconexão trópico-extratropical é responsável pela formação da ZCAS na sua posição climatológica ou deslocada para o sul. Os autores destacaram também que a variabilidade intrassazonal quando atua em fase com a variabilidade sinótica (2-10 dias) promove condições favoráveis para a formação da ZCAS. Isso implica que, além do padrão de dipolo ser influenciado por mecanismos distintos na variabilidade intrassazonal, a escala sinótica pode ser mais um ingrediente para a manifestação desse padrão.

No contexto da associação do dipolo sobre a América do Sul com a ZCAS, os trabalhos de Casarin e Kousky (1986), Liebmann et al. (1999), Paegle e Mo (2000) e Cunningham e Cavalcanti (2006) mostram uma relação entre a convecção da Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) com a formação/manutenção da ZCAS. A interação dessas duas zonas de convergência ocorre por meio de trens de ondas de Rossby extratropicais estimulados pelas anomalias de convecção na ZCPS, localizada Oceano Pacífico sudoeste (GRIMM; SILVA DIAS, 1995).

Contudo, é importante destacar que os eventos de ZCAS não foram definidos de maneira objetiva na maioria dos trabalhos mencionados acima. Os eventos de ZCAS foram definidos a partir de métodos estatísticos onde o dipolo apresenta sinal de anomalias positivas de chuva (ou aumento de convecção) no polo mais ao norte e de déficit de chuva (ou de inibição de convecção) no polo mais ao sul. Entretanto, a formação do dipolo sobre a América do Sul pode estar relacionada à presença de outros fenômenos além da ZCAS. Por exemplo, o padrão de dipolo sobre a América do Sul também é encontrado nos compostos de fases específicas da OMJ (GOTTSCHALCK et al., 2010; GRIMM, 2019). Durante as fases 8/1 da OMJ, anomalias positivas de precipitação ou de intensificação da convecção são notadas sobre o leste da América do Sul tropical, enquanto anomalias negativas de precipitação ou de inibição da convecção são notadas sobre o sudeste da América do Sul, que compreende a região Sul do Brasil, Uruguai, Paraguai e Parte da Argentina. Os sinais sobre essas duas regiões são alterados quando a OMJ se encontra nas fases 4/5. Ou seja, os padrões de variabilidade de precipitação/convecção sobre a América do Sul identificados nas fases 8/1 e 4/5 da OMJ são semelhantes às duas fases do padrão de dipolo.

O padrão de dipolo sobre a América do Sul pode ser modulado também pela influência do padrão conhecido como *Pacific South American* (PSA) (MO; GHIL, 1987). O PSA é uma resposta à variabilidade da atividade convectiva no Oceano Pacífico tropical, caracterizado por um padrão de onda número 3 que se estende do centro-oeste do Oceano Pacífico tropical para o oeste do Oceano Atlântico Sul, afetando a precipitação na América do Sul em várias escalas de tempo (MO; PAEGLE, 2001). O PSA pode ser identificado por meio de dois modos de variabilidade, definidos como PSA1 e PSA2, extraídos a partir da análise de FOEs de variáveis como altura geopotencial em 500 hPa ou função de corrente em 200 hPa (MO; HIGGINS, 1998; MO; PAEGLE, 2001). Esse dois modos variam em quadratura (i.e., os dois modos apresentam defasagem de $\frac{1}{4}$ de onda, ou 90° , entre si) e apresentam propagação para leste (MO; HIGGINS, 1998). Na escala intrassazonal, o impacto do PSA é mais fraco durante o verão do que durante o inverno austral e apresenta baixa variância na banda temporal de 10-50 dias (KIDSON, 1999). Mesmo assim, o PSA atua como um condutor dos efeitos convecção sobre o Oceano Pacífico tropical modular a variabilidade intrassazonal da precipitação de monção da América do Sul (MO; PAEGLE, 2001). O resultado desse mecanismo é a

formação do dipolo sobre a América do Sul discutido anteriormente, como mostrado nas Figuras 9 e 11 do trabalho de Mo e Paegle (2001), as quais mostram os compostos de anomalias de ROL filtradas na banda de 30-90 dias (gerados por meio das séries temporais referentes aos modos do PSA1 e PSA2), respectivamente. É importante destacar que o padrão de dipolo sobre a América do Sul, quando relacionado ao PSA, pode ser uma resposta indireta das flutuações da atividade convectiva sobre a região tropical, uma vez que os trabalhos de Mo e Higgins (1998) e Mo e Paegle (2001) mostram que o PSA é modulado pela atividade convectiva associada à OMJ. Por essa razão, trabalhos como o de Cunningham e Cavalcanti (2006) e Gonzalez e Vera (2014) relacionam os padrões de dipolo sobre a América do Sul aos efeitos do PSA e OMJ, principalmente dentro da variabilidade de 30-90 dias. Essa associação também foi sugerida em Grimm (2019).

A intensidade e frequência do padrão de dipolo podem modular a qualidade da estação chuvosa do sistema de monção da América do Sul por meio de eventos que são conhecidos por fases ativas e inativas do sistema de monção (NOGUES-PAEGLE; MO 1997; GAN et al., 2004; VERA et al., 2006; MUZA et al. 2009; BOERS et al., 2014). Durante a fase ativa, a circulação de grande escala favorece o transporte de umidade da bacia Amazônica para a região sob o domínio do sistema de monção da América do Sul, dada a presença da ZCAS e/ou a OMJ nas fases 8/1. Isso resulta geralmente na formação do padrão de dipolo com anomalias positivas (negativas) de precipitação no polo mais ao norte (sul). Durante a fase inativa, o padrão de dipolo apresenta sinal oposto, uma vez que a umidade proveniente da bacia Amazônica é transportada para a região que engloba o Sul do Brasil, nordeste da Argentina, Paraguai e Uruguai (região influenciada pelo polo mais ao sul do padrão de dipolo), por conta do Jato de Baixos Níveis (JBN) e/ou da influência da OMJ nas fases 4/5, o que desfavorece a precipitação na região dominada pelo sistema de monção.

Como destacado acima, existe uma variedade de trabalhos que estudaram o padrão de dipolo sobre a América do Sul associando a presença desse modo de variabilidade de precipitação com a influência de diferentes fenômenos em distintas escalas de tempo intrassazonais (e.g. OMJ, ZCPS, PSA e trens de ondas de Rossby). Entretanto, a variabilidade interanual também exerce influência no padrão de dipolo sobre a América do Sul (NOGUÉS-PAEGLE; MO, 1997; DRUMOND; AMBRIZZI, 2006; DE LIMA

ET AL., 2018). Drumond e Ambrizzi (2006), por exemplo, mostraram que os eventos de ZCAS, definidos por meio do padrão de dipolo sobre a América do Sul, ocorrem com mais frequência em anos de La-Niña. Destacaram também que a variabilidade interanual do padrão de dipolo apresenta picos em torno de 2 e 3.5 anos, associados com os componentes de baixa frequência e quase-bienal do ENOS. Essas flutuações de baixa frequência podem influenciar consideravelmente no comportamento da estação de monção da América do Sul. Por exemplo, as secas severas que ocorreram nas regiões do Centro-Oeste e Sudeste do Brasil durante os verões de 2000/2001 (KOUSKY; CAVALCANTI, 2001) e 2013/2014 (COELHO et al., 2016) que estiveram relacionadas com períodos inativos prolongados do sistema de monção da América do Sul devido à redução de eventos de ZCAS.

Outros modos de variabilidade também podem influenciar o sistema de monção da América do Sul. Por exemplo, um padrão que apresenta uma estrutura meridional tripolar sobre o leste da América do Sul tem sido identificado, por meio de análises de FOEs, em trabalhos que avaliam a variabilidade intrassazonal sobre a América do Sul (VASCONCELLOS, 2008; CARVALHO et al., 2011; DE LIMA et al., 2018). Esse padrão é associado com a presença da ZCAS desconectada da atividade convectiva da América do Sul tropical. Por esse motivo, esse padrão é definido como ZCAS oceânica (CARVALHO et al., 2011). Esse padrão apresenta pico de variabilidade entre 15 e 20 dias e aparece relacionado a um padrão de teleconexão do tipo PSA com defasagem de 5 dias.

5.3 Resultados

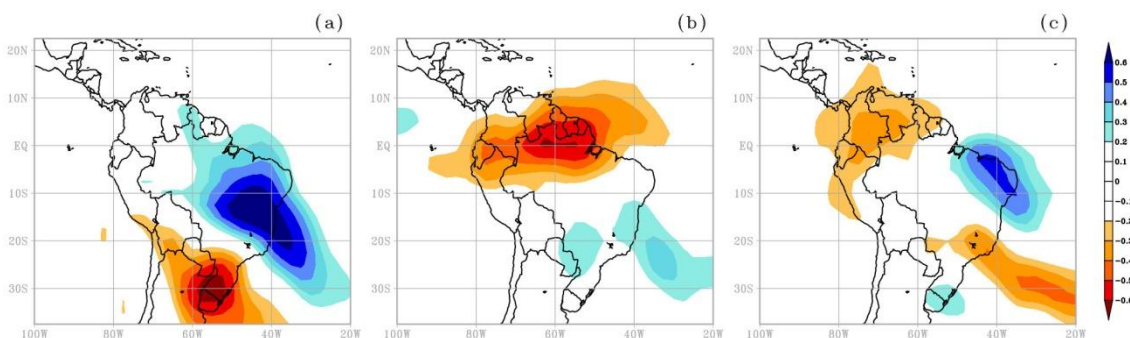
5.3.1 Modos dominantes de variabilidade espaço-temporal de precipitação sobre a América do Sul

Nesta Seção, os modos dominantes de variabilidade espaço-temporal das anomalias semanais de precipitação notados sobre a América do Sul são identificados por meio da análise de FOEs. Além disso, a relação desses modos com fenômenos atmosféricos/oceânicos também é apresentada.

A Figura 5.2 mostra os três primeiros modos extraídos por meio das análises de FOEs das anomalias semanais de precipitação observada (proveniente do GPCP) para o verão austral (os modos são referentes às semanas-1 definidas na Seção 2.1). Esses três modos

representam juntos 51% da variância total dos dados. Os correspondentes modos para as semanas-2, 3 e 4 das anomalias semanais do GPCP (os quais são mostrados nas linhas 4 e 7 da Figura 5.17) são similares aos modos da Figura 5.2. Por esse motivo, apenas os três primeiros modos referentes às semanas-1 foram avaliados para examinar quais são os principais fenômenos que contribuem na modulação desses três modos de variabilidade sobre a América do Sul. Observa-se que os padrões espaciais das três primeiras FOEs coincidem com as regiões onde os MCGAs avaliados no Capítulo-4 apresentam os maiores índices de habilidade preditiva sobre a América do Sul (i.e., regiões com os maiores valores de correlação na Figura 4. 2). Esse fato sugere que os fenômenos relacionados com os três primeiros modos da Figura 5.2 atuam como potenciais fontes de previsibilidade para os MCGAs na escala sub-sazonal sobre a América do Sul.

Figura 5.2 - Padrões espaciais dos três primeiros modos da análise de FOEs.



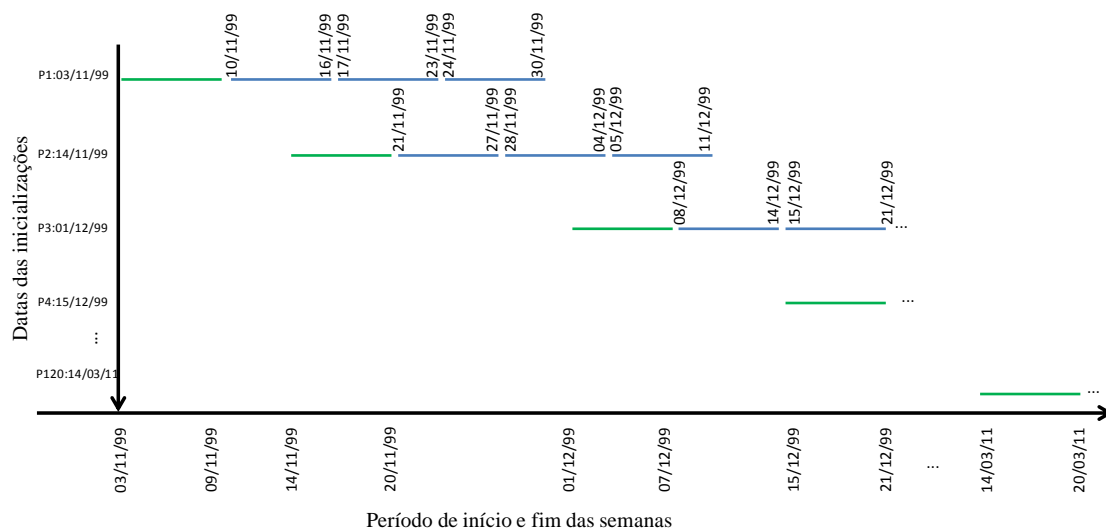
Os padrões espaciais dos três primeiros modos de FOEs - modo-1 em (a), modo-2 em (b) e modo-3 em (c) - foram calculados para as anomalias semanais de precipitação do GPCP referentes à semana-1 (linhas verdes na Figura 5.3) com relação às datas de inicialização para o período do verão estendido (novembro-março) de 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões.

Fonte: Produção do autor.

As análises realizadas nesta Seção foram realizadas para as FOEs calculadas com as anomalias semanais de precipitação do GPCP, as quais compreendem o período referente às semanas-1 de cada data de inicialização do BAM-1.2. Para deixar de forma mais clara qual o período de cada semana referente ao dado de entrada para o cálculo das FOEs e, conseqüentemente, cada tempo das séries temporais - ou componentes principais - geradas pelas FOEs, a Figura 5.3 mostra o diagrama de disposição das semanas (eixo x) referentes às datas de inicialização do BAM-1.2 (eixo y). As linhas

verdes representam as datas das anomalias semanais de precipitação utilizadas como dado de entrada para a análise das FOEs, as quais são dependentes das datas de inicialização do BAM-1.2 (Tabela 2.1). Portanto, o primeiro tempo da série temporal de cada modo e do dado de entrada para a geração das FOEs corresponde à semana dos dias 3 e 9 de novembro de 1999, o segundo tempo corresponde à semana dos dias 14 e 20 de novembro de 1999, o terceiro tempo corresponde à semana dos dias 1 e 7 de dezembro de 1999, assim sucessivamente até o 120º tempo correspondente à semana dos dias 14 e 20 de março de 2011 (linhas verdes na Figura 5.3). As datas referentes às semanas-1 das datas de inicialização compreendem aproximadamente a metade do período do verão estendido (são 10 semanas por ano dentro do período do verão estendido que compreende aproximadamente 21 semanas). Como pode ser notado na Figura 5.3, o intervalo entre as semanas-1 (linhas verdes) não é constante. Isso ocorre porque as datas de inicialização variam com relação ao mês da previsão retrospectiva. Como as datas das inicializações ocorrem sempre em datas próximas ao início e ao meio de cada mês, as semanas-1 (linhas verdes) não se sobrepõem e apresentam uma frequência que varia de 10 a 15 dias. A partir da Seção 5.3.2, a análise de FOEs também foi realizada para o período referente às anomalias das semanas-2, 3 e 4 (linhas azuis) do GPCP e para as semanas 1, 2, 3 e 4 para as previsões dos modelos do CPTEC e ECMWF.

Figura 5.3 - Diagrama de disposição das datas das semanas com relação às datas de inicialização do BAM-1.2.



O diagrama de disposição mostra as datas referentes às semanas-1, 2, 3 e 4 (eixo x) definidas a partir das datas de inicialização (eixo y). As linhas verdes representam as datas referentes às semanas-1 das anomalias semanais de precipitação utilizadas para a análise das FOEs realizada na Seção 5.3.1.

Fonte: Produção do autor.

5.3.1.1 Modo-1

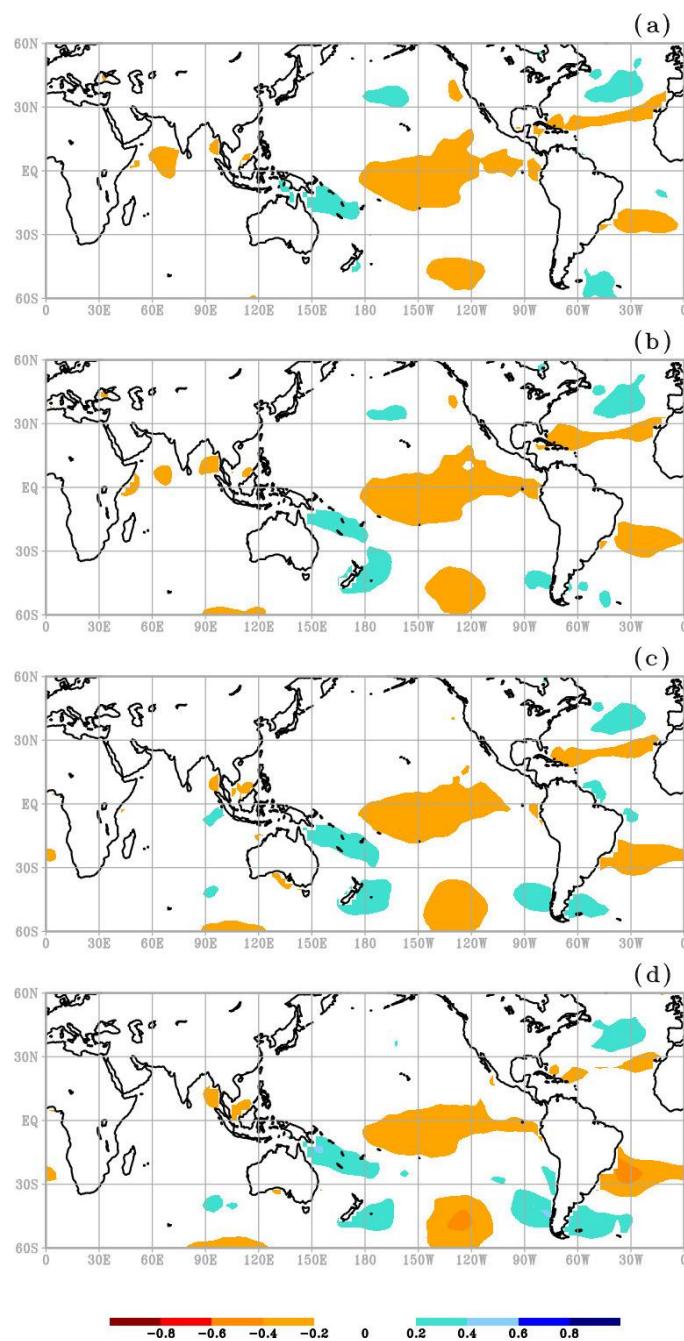
O primeiro modo (Figura 5.2a) mostra o padrão de dipolo meridional sobre o leste da América do Sul tropical identificado em estudos anteriores (e.g., Casarin e Kousky, 1986; Gozalez e Vera, 2014). Esse modo representa 24% da variabilidade total das anomalias semanais de precipitação. O polo mais ao norte abrange partes da região de monção da América do Sul e parte Nordeste do Brasil, e se estende sobre o Oceano Atlântico (área em tons de azul na Figura 5.2a). O polo mais ao sul compreende a região Sul do Brasil, Uruguai, Argentina, Paraguai, e também se estende sobre o Oceano Atlântico (área em tons de laranja e vermelho na Figura 5.2a). Como visto na Seção 5.2, o padrão de dipolo apresenta anomalias de precipitação/convecção opostas entre os dois polos. Desse modo, o padrão de dipolo apresenta duas configurações. A primeira, definida aqui como dipolo com sinal positivo, ocorre quando o polo mais ao norte apresenta anomalias positivas de precipitação e anomalias negativas de precipitação no polo mais ao sul. O segundo, o qual é definido como dipolo com sinal negativo, ocorre quando o polo mais ao norte apresenta anomalias negativas de precipitação e anomalias positivas de precipitação no polo mais ao sul. Para examinar os padrões globais de

teleconexões associados ao dipolo de precipitação sobre a América do Sul, a série temporal do primeiro modo (definida a partir de agora como FOE1 total) foi correlacionada com as anomalias semanais de TSM, ROL e função de corrente em 200 hPa. As correlações foram calculadas em cada ponto de grade de forma simultânea e defasada temporalmente, com as anomalias de TSM, ROL e função de corrente adiantadas uma, duas e três semanas com relação a FOE1 total.

A Figura 5.4 mostra os campos de correlação entre a FOE1 total, a qual representa o padrão de dipolo sobre a América do Sul (Figura 5.2a), e as anomalias semanais de TSM adiantadas – três semanas (a), duas semanas (b) e uma semana (c) – e sem defasagem temporal em (d). Na Figura 5.4, nota-se que o primeiro modo apresenta relação linear, estatisticamente significativa ao nível de 5% (valores de correlação a partir de 0.2 em módulo), com a TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico, tanto sobre a região tropical como sobre as regiões extratropicais do Hemisfério Norte, principalmente com TSM adiantada três e duas semanas [Figuras 5.4 (a) e (b), respectivamente], e Hemisfério Sul, principalmente com a TSM adiantada uma semana e sem defasagem temporal [Figuras 5.4 (c) e (d), respectivamente]. Os valores de correlação sobre a região tropical do Oceano Pacífico sugerem uma associação entre o ENOS e o padrão de dipolo sobre a América do Sul. Como os valores de correlação entre as anomalias de TSM sobre o Oceano Pacífico tropical e a FOE1 total são negativos, o padrão de dipolo com sinal positivo (i.e., anomalias positivas de precipitação localizadas no polo mais ao norte e anomalias negativas de precipitação localizadas no polo mais ao sul) é notado com mais frequência em anos de La-Niña (i.e., anomalias negativas de TSM sobre o Oceano Pacífico Tropical). Em contrapartida, os eventos de dipolos com sinal negativo (i.e., anomalias negativas de precipitação localizadas no polo mais ao norte e anomalias positivas de precipitação localizadas no polo mais ao sul) ocorrem com mais frequência durante anos de El-Niño (i.e., anomalias positivas de TSM sobre o Oceano Pacífico Tropical). Essa relação entre o padrão de dipolo e ENOS também foi encontrada em Drumond e Ambrizzi (2006) e Grimm (2019). Simultaneamente aos padrões de TSM sobre o Oceano Pacífico tropical, valores persistentes de correlação com significância estatística ao nível de 5% são notados sobre as regiões de latitudes médias do Oceano Atlântico Norte e Sul, dado o padrão de teleconexão trópico-extratropical em resposta ao ENOS. Além disso, sobre o Oceano

Atlântico Sul, os valores de TSM são influenciados pelo padrão de dipolo devido aos mecanismos de *feedback* entre nuvens, precipitação e TSM (DE ALMEIDA et al. 2007). Os padrões de correlação, encontrados na Figura 5.4, sugerem uma forte influência da variabilidade interanual no padrão de dipolo sobre a América do Sul. Isso implica em uma interação entre escalas, uma vez que, como visto na Seção 5.2, o padrão de dipolo apresenta, também, sinais dentro da variabilidade intrassazonal.

Figura 5.4 - Correlação temporal entre a série temporal do modo-1 e as anomalias semanais de TSM.

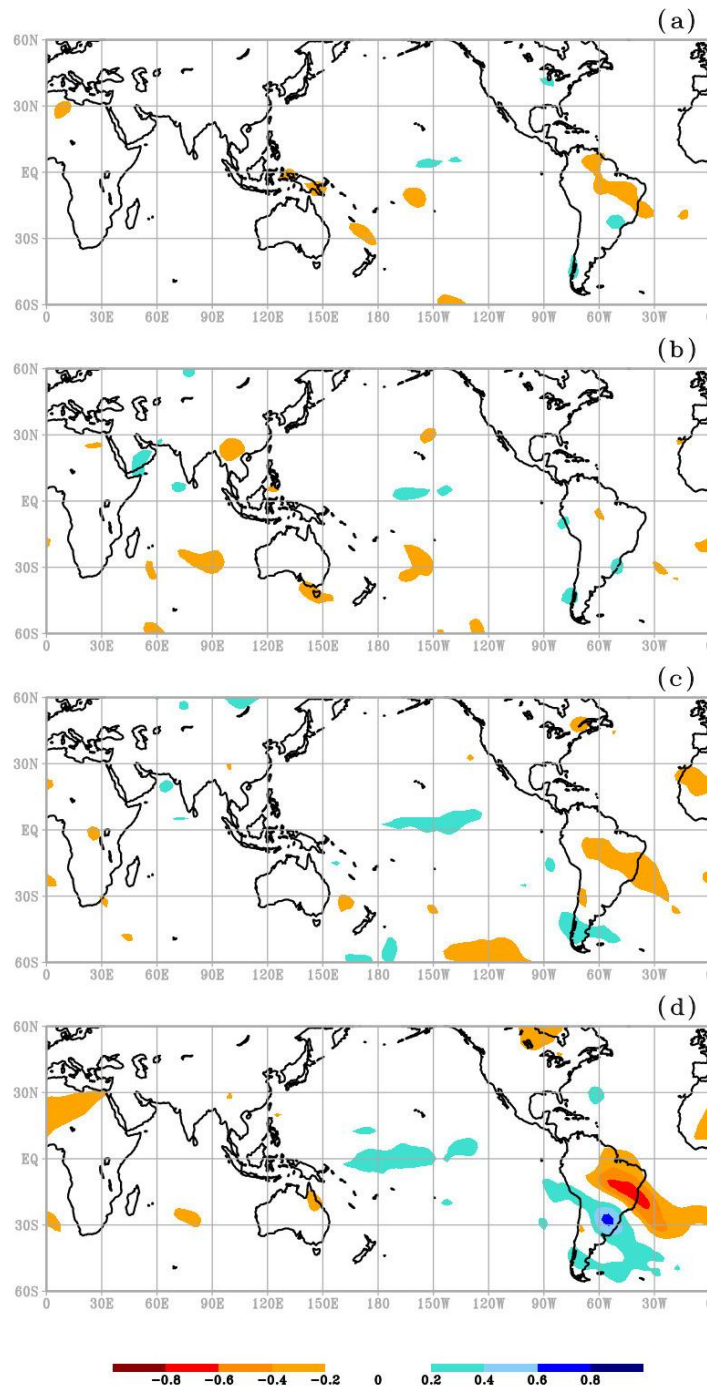


As correlações temporais foram calculadas entre a série temporal do modo-1 e as anomalias semanais de TSM das reanálises ERA-interim para o período referente à primeira semana das datas de inicialização do BAM-1.2 (linhas verdes na Figura 5.3), as quais compreendem o período do verão estendido (novembro-março) de 1999/2000-2010/2011 com 120 amostras. As correlações foram calculadas com defasagem temporal, campos de TSM adiantados três semanas em (a), duas semanas em (b) e uma semana em (c) em relação à FOE1 total, e sem defasagem (d).

Fonte: Produção do autor.

A correlação entre a FOE1 total e as anomalias semanais ROL, calculada da mesma forma como foi realizado para a TSM, é mostrada na Figura 5.5. Embora seja possível observar valores de correlação significativos sobre o Oceano Pacífico tropical com a ROL adiantada uma semana (Figura 5.5c) e sem defasagem temporal (Figura 5.5d), não é evidente a influência do ENOS para a formação do dipolo sobre a América do Sul como notado na Figura 5.4, uma vez que os valores de correlação não são altos quando a ROL é adiantada duas e três semanas (Figuras 5.5b e 5.5a, respectivamente). Provavelmente, isso ocorre porque as variações mais lentas da TSM favorecem a detecção da influência do ENOS na formação do dipolo sobre a América do Sul, dado que as anomalias semanais de ROL apresentam um sinal mais forte na variabilidade intrassazonal do que na variabilidade interanual sobre a região tropical devido ao sinal da OMJ. Dessa maneira, a relação entre ENOS e dipolo não é bem destacada nos campos de correlação entre a ROL e FOE1 total. Entretanto, os padrões de correlação notados na Figura 5.5 também não refletem os padrões de teleconexões presentes na variabilidade intrassazonal. Por exemplo, as correlações não mostram o padrão de onda 1 na região equatorial com sinais opostos entre a atividade convectiva sobre o Hemisfério Oeste e o Continente Marítimo associado as fases 8/1 e 4/5 da OMJ. Como visto na Seção 5.2, esse sinal da OMJ no padrão de dipolo sobre a América do Sul é encontrado por vários estudos (e.g., Cunningham e Cavalcanti, 2006; Gonzalez e Vera, 2014). Entretanto, esses trabalhos utilizaram o artifício de filtros temporais em suas análises, principalmente na banda de 30-90 dias. Dessa maneira, a influência do OMJ no padrão de dipolo é realçada. Provavelmente, o padrão de teleconexão do dipolo na variabilidade intrassazonal é mascarado dado à influência de mecanismos dinâmicos diferentes que ocorrem na variabilidade intrassazonal (GONZALEZ; VERA, 2014), restando o sinal de correlação negativa encontrado na região central do Oceano Pacífico tropical (Figura 5.5c e Figura 5.5d). Como esperado, a correlação simultânea entre a ROL e a série temporal do primeiro modo (Figura 5.5d) mostra o aumento da atividade (inibição) convectiva na região do polo mais ao norte (sul) quando o padrão de dipolo apresenta sinal positivo. O padrão oposto de convecção é notado quando o dipolo apresenta sinal negativo.

Figura 5.5 - Correlação temporal entre a série temporal do modo-1 e as anomalias semanais de ROL.



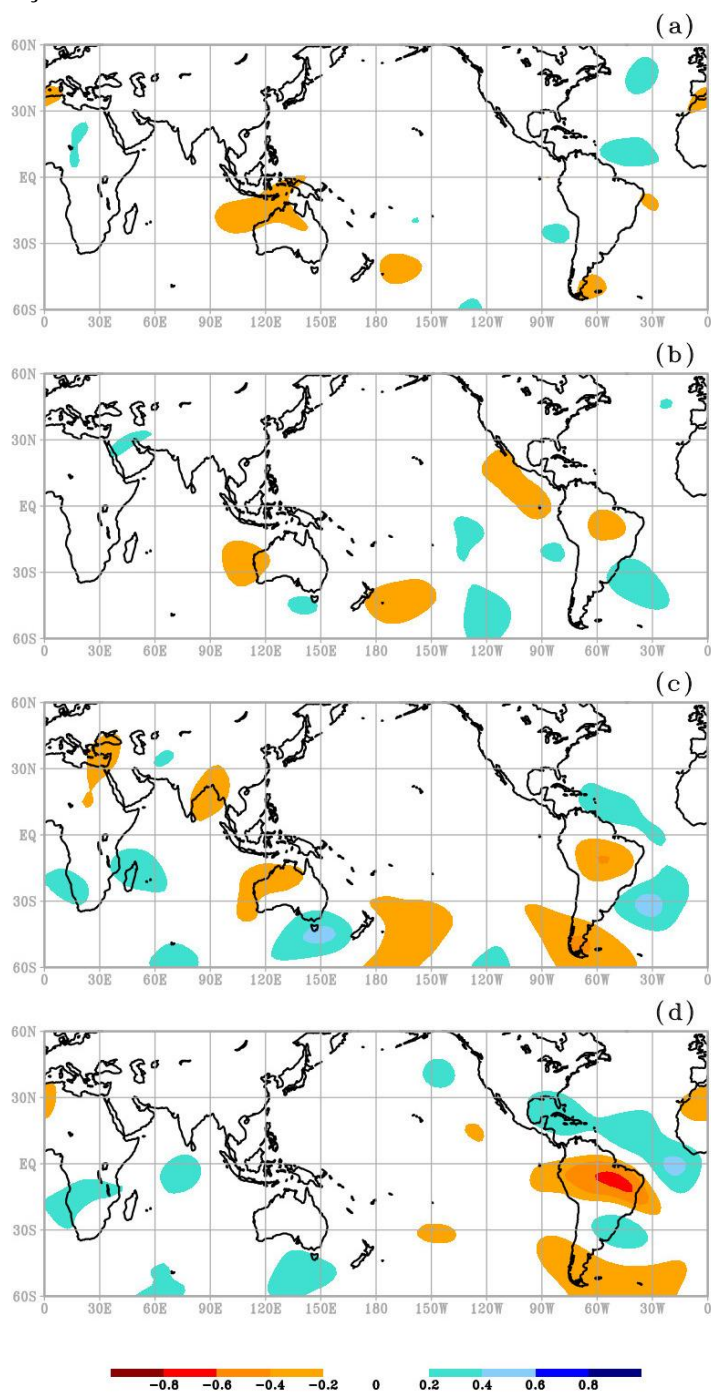
Como a Figura 5.4. Porém, para as anomalias semanais de ROL da NOAA.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.6 mostra os padrões espaciais dos valores de correlação entre a FOE1 total e as anomalias semanais de função de corrente em 200 hPa (componente rotacional do campo vetorial do vento), calculados de forma defasada, com as anomalias de função de

corrente adiantadas 3 (Figura 5.6a), 2 (Figura 5.6b) e 1 (Figura 5.6c) semanas em relação a FOE1 total, e sem defasagem (Figura 5.6d). Os campos de correlação da Figura 5.6 mostram que o padrão de teleconexão trópico-extratropical sobre o Oceano Pacífico Sul começa a se desenvolver com três semanas de antecedência a formação do dipolo sobre a América do Sul (Figura 5.6a). O padrão de trem de onda melhor configurado na Figura 5.6c, o qual apresenta um padrão de onda de número 3 com a forma de um arco que liga a circulação sobre o oeste da Austrália (adiantada uma semana) com o dipolo sobre a América do Sul. Esse padrão é similar ao padrão PSA, sugerindo que esse padrão de teleconexão está associado à formação do dipolo sobre a América do Sul com defasagem de uma semana. A relação do PSA com o padrão de dipolo tem sido reportada em vários trabalhos (e.g., Grimm e Silva Dias, 1995; Mo e Paegle, 2001; Cunningham e Cavalcanti, 2006; Carvalho et al., 2011; Gonzalez e Vera, 2014; Grimm, 2019). Com a correlação sem defasagem temporal (Figura 5.6d), valores negativos (positivos) de correlação sobre a parte tropical e de latitudes altas (subtropicais) da América do Sul são notados. Isso mostra que anomalias anticiclônicas (cyclônicas) são notadas nessas regiões quando a série temporal do dipolo apresenta valores positivos. O padrão inverso, no campo de circulação em altos níveis, é notado quando a FOE1 total apresenta sinal negativo.

Figura 5.6 - Correlação temporal entre a série temporal do modo-1 e as anomalias semanais de função de corrente em 200 hPa.



Como a Figura 5.4. Porém, para as anomalias semanais de função de corrente calculadas a partir dos componentes meridional e zonal do vento em 200 hPa das reanálise ERA-Interim.

Fonte: Produção do autor.

Com a análise das correlações entre a FOE1 total e os campos de anomalias semanais de TSM, ROL e função de corrente em 200 hPa sem a utilização de filtros temporais, não

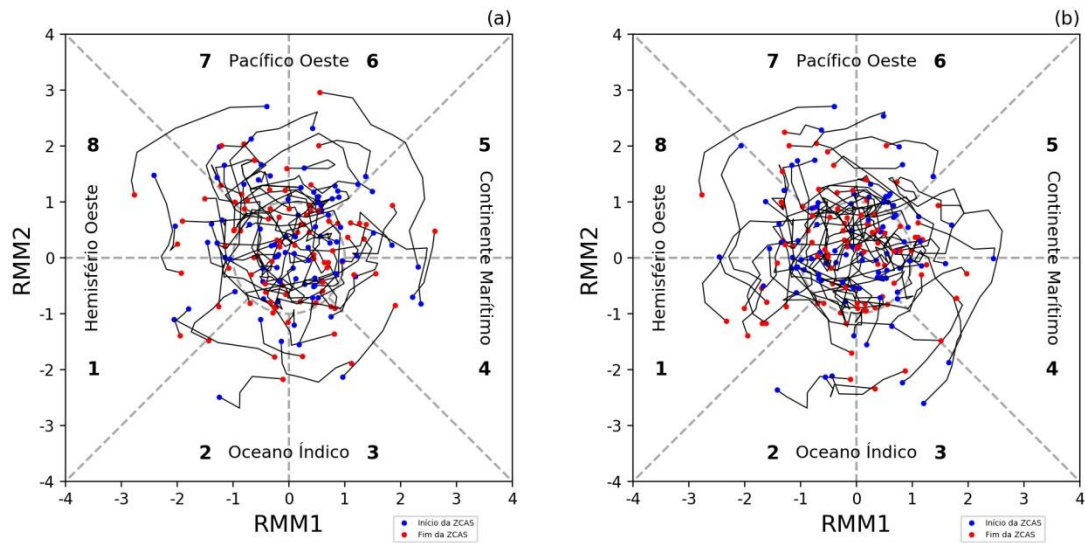
foi possível encontrar um padrão de teleconexão claro entre a variabilidade intrassazonal na região tropical e o padrão de dipolo sobre a América do Sul, assim como encontrado em outros trabalhos (LIEBMANN et al., 1999; CUNNINGHAM; CAVALCANTI 2006; GRIMM, 2019). Os padrões encontrados remetem a variabilidade interanual, uma vez que, os sinais de correlação são fortes sobre a região do ENOS, TSM do Oceano Atlântico e PSA.

Como destacado nos trabalhos de Paegle e Mo (2000) e Gonzalez e Vera (2014), o padrão de dipolo sobre a América do Sul apresenta dois picos dentro da variabilidade intrassazonal (um entre 10-30 dias e outro entre 30-90 dias como destacado na Seção 5.2), os quais estão associados com mecanismos dinâmicos diferentes. Ou seja, esses mecanismos geram oscilações, as quais podem interagir entre si de forma construtiva (i.e., em fase) ou de forma destrutiva (i.e., fora de fase) para a formação do padrão de dipolo sobre a América do Sul. Por exemplo, o papel da ZCAS e da OMJ para a formação do padrão de dipolo sobre a América do Sul como destacada na Seção 5.2. Para mostrar como esses dois fenômenos podem atuar na formação do padrão de dipolo, o estado da OMJ, monitorado por meio dos índices RMM1 e RMM2 (WHEELER; HENDON, 2004), foi analisado através do diagrama de Wheeler e Hendon (2004) (também conhecido como diagrama de fase da OMJ) durante as datas de ocorrência de eventos de ZCAS nos verões estendidos de 1999/2000 a 2010/2011. A partir dessa análise, é possível examinar a evolução da OMJ durante cada evento de ZCAS. Pelo fato de existirem vários critérios para a identificação de ZCAS, o que gera discordância na caracterização desse fenômeno, os episódios de ZCAS foram extraídos de dois conjuntos de eventos de ZCAS definidos por métodos diferentes. O primeiro conjunto (Figura 5.7a) foi obtido do trabalho de Rosa (2017), o qual desenvolveu um algoritmo automático de caracterização de eventos de ZCAS por meio de campos diários de ROL. O segundo conjunto (Figura 5.7b) foi obtido do trabalho de Rosso et al. (2018), o qual definiu os episódios de ZCAS por meio do boletim climanálise gerado pelo CPTEC. Os pontos azuis (vermelhos) mostram a fase e intensidade da OMJ no primeiro (último) dia de ocorrência de um determinado evento de ZCAS. As linhas entre os pontos azuis e vermelhos correspondem à evolução diária da OMJ durante cada evento de ZCAS.

Embora seja possível identificar algumas diferenças entre os dois conjuntos de ZCAS ilustrados nas Figuras 5.7a e Figura 5.7b, os diagramas de fase mostram que os eventos

de ZCAS ocorrem preferencialmente quando a OMJ se encontra inativa (região central do diagrama de fase). Além disso, é possível notar que os eventos de ZCAS são bem distribuídos dentro do diagrama de fase nos dois conjuntos. Dessa forma, os resultados dos diagramas de fase sugerem que os eventos de ZCAS analisados não são influenciados pela OMJ, pelo menos no que diz respeito à formação dos eventos. Dessa forma, se cada evento de ZCAS for considerado como um padrão de dipolo com sinal positivo, interações construtivas (quando eventos de ZCAS que ocorrem durante as fases 8/1 da OMJ) e destrutivas (quando eventos de ZCAS que ocorrem durante as fases 4/5 da OMJ) entre a ZCAS e a OMJ podem ser notadas para a formação do padrão de dipolo sobre a América do Sul. Por conta das interações destrutivas, o padrão de teleconexão de onda 1 na região tropical, com sinais opostos de atividade convectiva entre o Continente Marítimo e a América do Sul, é cancelado, dado que o padrão de dipolo da América do Sul com sinal positivo relacionado com a OMJ nas fases 8/1 é acompanhado por supressão da convecção sobre o Continente Marítimo. Entretanto, quando a ZCAS se forma durante as fases 4/5 da OMJ, um aumento da atividade convectiva é notado sobre o Continente Marítimo. Isso seria uma explicação para o sinal da variabilidade interanual dominar a série temporal do primeiro modo.

Figura 5.7 – Diagrama de fase da OMJ para os eventos de ZCAS.



Os diagramas de fase da OMJ foram construídos com os dados diários dos índices RMM-1 (no eixo x) e RMM-2 (no eixo y) para as datas de eventos de ZCAS que ocorreram durante o verão estendido dos anos 1999/2000 a 2010/2011. Os pontos azuis (vermelhos) indicam o início (fim) de cada evento de ZCAS. Os eventos de ZCAS foram definidos por Rosa (2017) em (a) e Rosso et al. (2018) em (b).

Fonte: Produção do autor.

Como visto na Seção 5.2, vários trabalhos associam a ZCAS tanto com oscilações de alta frequência como com oscilações de baixa frequência dentro da variabilidade intrassazonal (LIEBMANN et al., 1999; PAEGLE; MO, 2000; CUNNINGHAM; CAVALCANTI, 2006; GONZALEZ; VERA, 2014; GRIMM, 2019). Por um lado, isso mostra que separar os padrões de dipolo modulados pelos eventos de OMJ e ZCAS é uma tarefa difícil. Por outro lado, como a OMJ não aparece nas oscilações de alta frequência da variabilidade intrassazonal (LIEBMANN et al., 1999) é possível separar os padrões de dipolo associados com a OMJ dos padrões de dipolo associados a eventos de ZCAS de mais alta frequência (entre 10-30 dias). Desse modo, seguindo o trabalho de Gonzalez e Vera (2014), as anomalias semanais foram recalculadas com as anomalias diárias filtradas, por meio do filtro de Lanczos (DUCHON, 1979), em duas bandas temporais dentro da variabilidade intrassazonal. A primeira, entre 10-30 dias destaca o padrão de dipolo associado à teleconexões trópico-extratropical sem relação com a OMJ (LIEBMANN et al., 1999; GONZALEZ; VERA, 2014). A segunda, entre 30-90 dias, ressalta os padrões de dipolo relacionados com a OMJ e teleconexões que

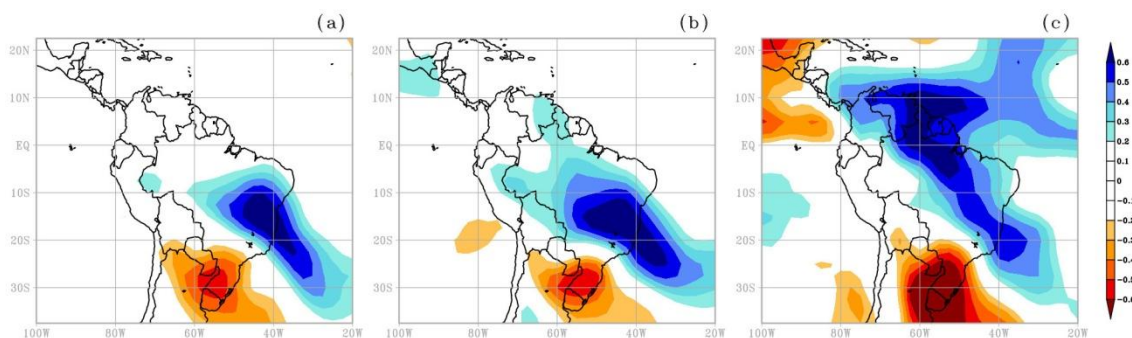
ocorrem dentro da variabilidade intrassazonal de baixa frequência (e.g., PSA e interações entre ZCPS e ZCAS) (CUNNINGHAM; CAVALCANTI, 2006; GONZALEZ; VERA, 2014; GRIMM, 2019). Esse procedimento foi realizado para entender melhor o papel dessas oscilações na formação do padrão de dipolo sobre a América do Sul e, conseqüentemente, na habilidade preditiva nos MCGAs na escala sub-sazonal. Além dessas duas oscilações dentro da variabilidade intrassazonal, as médias semanais, referentes às primeiras semanas das datas de inicializações, foram também recalculadas a partir dos dados diários precipitação após a aplicação do filtro passa baixa (> 120 dias) para a avaliação do papel da variabilidade interanual na modulação do padrão de dipolo sobre a América do Sul (NOGUÉS-PAEGLE; MO, 1997; DRUMOND; AMBRIZZI, 2006; DE LIMA et al., 2018).

A Figura 5.8 mostra a distribuição espacial dos primeiros modos da análise de FOEs para as anomalias semanais de precipitação, referentes à primeira semana de cada data de inicialização (linhas verdes na Figura 5.3), filtradas nas bandas de 10-30 dias em (a), 30-90 dias em (b) e na variabilidade interanual (passa baixa de 120 dias) em (c). Esses três primeiros modos serão mencionados a partir de agora como FOE1 10-30, FOE1 30-90 e FOE1 120, respectivamente. Assim como em Gonzalez e Vera (2014), o padrão de dipolo sobre a América do Sul aparece como o principal modo nas duas bandas intrassazonais. Esse modo representa 20% da variabilidade total dentro das anomalias semanais de precipitação filtradas em 10-30 dias, enquanto que o mesmo representa 23% da variabilidade total filtrada em 30-90 dias. Os padrões de regressão linear (simultâneo e com defasagem temporal) entre a série temporal desses dois modos e as anomalias semanais de com ROL e função de corrente em 200 hPa (Figuras F.1 e no Apêndice-F, respectivamente) são similares com os padrões encontrados em Gonzalez e Vera (2014); Figuras 3, 5, 7 e 9. Portanto, a propagação da OMJ e teleconexões trópico-extratropical são mecanismos dinâmicos responsáveis pela formação do padrão de dipolo sobre a América do Sul na banda de 30-90 dias, enquanto que os padrões de teleconexões trópico-extratropical sobre o Oceano Pacífico Sul são responsáveis pela formação do dipolo na banda de 10-30 dias.

Embora apresente um padrão espacial ligeiramente diferente dos dois padrões encontrados dentro da variabilidade intrassazonal (Figura 5.8a e Figura 5.8b) e do campo total (Figura 5.2a), o padrão de dipolo sobre a América do Sul também aparece

no padrão espacial do FOE1 120 (Figura 5.8c). O padrão de dipolo na variabilidade interanual é acompanhado por sinais sobre a região da ZCIT e sobre o norte da América do Sul, os quais não são notados nos demais padrões espaciais do modo de dipolo.

Figura 5.8 – Padrão espacial das FOE1 10-30, FOE1 30-90 e FOE1 120.



As FOEs foram computadas como na Figura 5.2. Porém, os dados de entrada para a análise da FOEs foram filtrados nas bandas de 10-30 dias em (a), 30-90 dias em (b) e interanual (passa baixa de 120 dias) em (c).

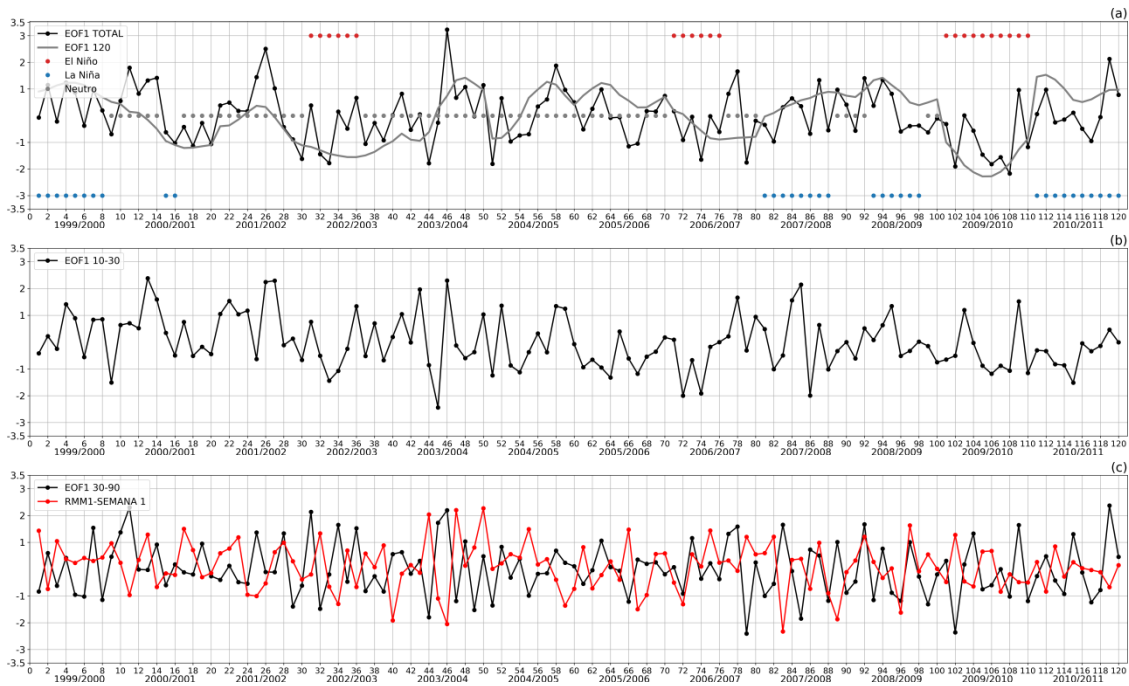
Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.9 mostra as séries temporais dos padrões de dipolo da América do Sul (apresentados nas Figuras 5.2a e 5.8). A Figura 5.9a mostra as séries temporais do FOE1 total (linha preta) e FOE1 120 (linha cinza). A Figura 5.9b mostra a série temporal do FOE1 10-30. A Figura 5.9c mostra a série temporal do FOE1 30-90 (linha preta) e a média semana do RMM1 (linha vermelha), o qual está ligado com as fases 1/8 da OMJ (RMM1 negativo) e com as fases 4/5 (RMM1 positivo). As médias semanais do RMM1 foram calculadas para as mesmas semanas da série temporal do padrão de dipolo (Figura 5.3). Os pontos vermelhos, azuis e cinza, na Figura 5.9a definem o estado do ENOS (eventos de El-Niño, La-Niña e neutros, respectivamente) durante cada semana da série temporal. O RMM1 destaca a presença do padrão de onda 1, associado à OMJ, sobre a região equatorial com influência sobre o Continente Marítimo e o Hemisfério Oeste, o qual compreende a América do Sul (WHEELER; HENDON, 2004).

Como destacado anteriormente, é possível notar, na Figura 5.9a, que a variabilidade interanual (linha cinza na Figura 5.9a) exerce influência importante no padrão de dipolo sobre a América do Sul (linha preta na Figura 5.9a). Por exemplo, durante as 10 semanas do verão de 1999/2000 (eventos 1-10 no eixo x na Figura 5.9a) que compreendem as séries FOE1 total (linha preta) e FOE1 120 (linha cinza), o padrão de

dipolo com sinal negativo abaixo de -1 desvio padrão não foi evidenciado. Durante esse período, foram observadas anomalias positivas (negativas) de precipitação nas regiões sob a influência do polo mais ao norte (sul). Em contrapartida, o padrão de dipolo com sinal negativo domina as séries FOE1 total e FOE1 120 entre os meses de janeiro e março de 2001 (eventos 18, 16 e 20 no eixo x na Figura 5.9a). Durante esse período, grande parte do Brasil (principalmente as regiões sob o polo mais ao norte) passou por um evento forte de estiagem (CAVALCANTI; KOUSKY, 2001), marcado pelo risco de corte no fornecimento elétrico nacional. Esses dois exemplos mostram a importância do papel do padrão de dipolo para a estação chuvosa de grande parte do Brasil e de sua variabilidade interanual. Embora não tenha sido explorada por Casarin e Kousky (1986), a influência da variabilidade interanual no padrão de dipolo sobre a América do Sul também pode ser observada na Figura 3 do trabalho desses autores. Em geral, a periodicidade da variabilidade interanual do padrão de dipolo apresenta relação com eventos de ENOS, o que já era esperado tendo em vista os padrões de correlação encontrados sobre a região do Oceano Pacífico tropical na Figura 5.4. O padrão de dipolo com sinal positivo (negativo) ocorre com mais frequência durante eventos de La-Niña (El-Niño), os quais podem ser notados pelos pontos azuis (vermelhos). Resultados semelhantes foram reportados em Drumond e Ambrizzi (2006). Entretanto, em alguns casos em que a variabilidade interanual do padrão de dipolo (linha cinza) aparece de forma intensa, como nos verões de 2000/2001 (eventos de 15-20), 2003/2004 (eventos de 46-50) e 2004/2005 (eventos de 56-60), observa-se que o ENOS estava em sua fase inativa (pontos cinza). O valor de correlação entre as séries FOE1 total e a FOE1 120 é de 0.49. Isso evidencia uma associação importante da variabilidade interanual com o padrão de dipolo sobre a América do Sul.

Figura 5.9: Séries temporais do FOE1 total, FOE1 10-30, FOE1 30-90 e FOE1 120 e da média semanal do RMM1.



Séries temporais da FOE1 total [linha preta em (a)], FOE110-30 [linha preta em (b)], FOE1 30-90 [linha preta em (c)] e FOE1 120 [linha cinza em (a)]. A média semanal para as datas do RMM1 total é representada pela linha vermelha em (c). Os pontos vermelhos, azuis e cinzas em (a) indicam o estado do ENOS (El-Niño, La-Niña e neutro, respectivamente) em cada semana das séries temporais.

Fonte: Produção do autor.

Com relação à variabilidade intrassazonal do padrão de dipolo sobre a América do Sul, a Figura 5.9b mostra a série FOE1 10-30 dias (variabilidade intrassazonal de alta frequência). O valor de correlação entre a série FOE1 10-30 e o RMM1 é igual a 0. Isso mostra que, pelo menos de forma simultânea, a OMJ não exerce influência no padrão de dipolo nessa banda, assim como destacado por Liebmann et al. (1999). O valor de correlação entre a série FOE1 total e série FOE1 10-30 é de 0.66. Ou seja, a variabilidade de 10-30 dias contribui de forma mais intensa para a formação do dipolo sobre a América do Sul do que a variabilidade interanual e do que a variabilidade intrassazonal de baixa frequência (30-90 dias).

Com o padrão do dipolo gerado a partir dos dados filtrados na banda de 30-90 dias, o valor de correlação entre o padrão de dipolo sobre a América do Sul e o RMM1 aumenta de -0.22 (FOE1 total v.s., RMM1) para -0.39 (FOE1 30-90 v.s., RMM1). Esse aumento é notado porque o filtro na banda de 30-90 dias ressalta os padrões de dipolo

que ocorreram por conta da influência da OMJ. Ou seja, como a correlação entre o padrão de dipolo sobre a América do Sul e o RMM1 apresenta sinal negativo, é esperado que o RMM1 apresente sinal negativo (positivo) durante um dado evento de dipolo com sinal positivo (negativo), como pode ser notado no caso 46 (32) na Figura 5.9c. Entretanto, há casos em que a série temporal do FOE1 total e o RMM1 apresentam valores intensos (acima de 1 desvio padrão em módulo) e com mesmo sinal (e.g., caso 87). Isso faz com que o valor de correlação entre FOE1 total e o RMM1 seja baixa (-0.22) e, também, não seja possível encontrar o padrão de teleconexão de onda número 1 na Figura 5.5. Provavelmente, esses casos estão associados com a presença da ZCAS durante as fases 4/5 da OMJ notada na Figura 5.7. Com a aplicação do filtro na banda de 30-90 dias, alguns desses eventos são removidos da série FOE1 30-90. Por conta disso, a correlação da série FOE1 30-90 com o RMM1 é maior do que a correlação FOE1 total e o RMM1. Entretanto, a banda de 30-90 dias não é a ideal para avaliar a influência da OMJ no padrão de dipolo sobre a América do Sul, dado que a OMJ apresenta pico em 30-60 dias (WHEELER; HENDON, 2004). Por isso, em alguns casos de dipolo e RMM1 intensos e com mesmo sinal não são removidos da série do FOE1 30-90 (e.g., caso 92 na Figura 5.9c). Sendo assim, a correlação entre a série FOE1 30-90 e o RMM1 (-0.39) é menor do que a correlação entre as séries FOE1 total e FOE1 30-90 (0.59). Isso sugere que mecanismos dinâmicos diferentes da OMJ dentro da variabilidade 30-90 dias podem provocar a formação do dipolo sobre a América do Sul (e.g., interações trópico-extratropical), como reportado por Cunningham e Cavalcanti (2006) e Gonzalez e Vera (2014).

A série temporal gerada com a soma entre as três séries filtradas (10-30, 30-90 e 120 dias), apresenta valor de correlação de 0.93 com relação à série do EOF1 total. Isso mostra que essas três oscilações são responsáveis por representar quase toda variabilidade do padrão de dipolo sobre a América do Sul. A Tabela 5.1 sumariza os valores de correlação mencionados anteriormente.

Tabela 5.1 - Sumário dos valores de correlação temporal.

	R
FOE1 total vs FOE1 120	0.49
FOE1 total vs FOE1 10-30	0.66
FOE1 total vs FOE1 30-90	0.59
FOE1 total vs RMM1	-0.22
FOE1 10-30 vs RMM1	0.0
FOE1 30-90 vs RMM1	-0.39
FOE1 total vs 10-30+30-90+120	0.93

Fonte: Produção do autor.

Como destacado anteriormente, o padrão de dipolo é influenciado por diferentes fenômenos atmosféricos (e.g. ZCAS e OMJ, como notado na Figura 5.7), os quais estão ligados a oscilações em várias escalas temporais que interagem entre si. A interação entre essas oscilações podem ocorrer de forma construtiva (em fase) e destrutiva (fora de fase). Para analisar melhor o papel dessas interações na formação do padrão de dipolo sobre a América do Sul (série temporal do FOE1 total), o comportamento das três séries temporais (FOE1 10-30, FOE1 30-90 e FOE1 120) foi avaliado. Como pode ser notado na Figura 5.9, as oscilações de 10-30 dias, 30-90 dias e interanual podem atuar em fase (i.e., quando pelo menos duas oscilações estão intensas e apresentam mesmo sinal) ou fora de fase (i.e., quando pelo menos duas oscilações estão intensas e apresentam sinais opostos). Uma oscilação é considerada intensa (ou ativa) quando apresenta valor, em módulo, acima de 1 desvio padrão. Por conta disso, um caso de dipolo positivo (negativo) é definido quando a série FOE1 total apresenta valor acima (abaixo) de 1 (-1) desvio padrão.

O verão estendido de 2002/2003 (eventos 31-40 na Figura 5.9) é um período interessante para notar as interações entre as três oscilações na formação do padrão de dipolo uma vez que as variabilidades intrassazonais e interanuais apresentaram sinais intensos. Durante esse período, a série temporal FOE1 total não apresentou casos de padrão de dipolo com sinal positivo (i.e., valores acima de 1 desvio padrão na Figura

5.9a, linha preta), até mesmos quando as séries FOE1 10-30 (caso 36) e FOE1 30-90 (casos 31, 34 e 36) apresentaram sinais positivos intensos (i.e., interações fora de fase entre as variabilidades intrassazonais e a interanual). Isso ocorreu por conta da influência da variabilidade interanual que apresentou fortes valores negativos (linha cinza na Figura 5.9a) associados ao evento de El-Niño que ocorreu durante o verão de 2002/2003 (pontos vermelhos na Figura 5.9a). Com isso, eventos de dipolo com sinais negativos intensos foram notados quando as variabilidades interanuais e intrassazonais ocorrem em fase. Por exemplo, o caso 32 (14-20 de novembro de 2002) que ocorreu com a série FOE1 120 em fase com a FOE1 30-90, provavelmente associados com os eventos de El-Niño e OMJ nas fases 4/5 (RMM1 com sinal positivo e intenso, linha vermelha na Figura 5.9c).

Outro período interessante para se avaliar é o verão de 2000/2001. Entre os meses de novembro e dezembro de 2000, três eventos de dipolo com sinal positivo foram notados (desvio padrão acima de 1 nos eventos 11, 13 e 14 na Figura 5.9a). Esses eventos não foram associados com a variabilidade interanual, dado que a linha cinza, na figura 5.9a, apresenta valores próximo de 0. Nesse período é notado o domínio da FOE1 30-90 no caso 11 (3-9 de novembro de 2000) e o domínio do FOE1 10-30 nos casos 13 (1-7 de dezembro de 2000) 14 (15-21 de dezembro de 2000). No entanto, padrões de dipolo com sinal positivo não foram notados a partir de janeiro de 2001 por conta da atuação da variabilidade interanual (FOE1 120), a qual passou a apresentar fortes sinais negativos (linha cinza em 5.9a). Como resultado, três eventos de dipolo com sinal negativo foram notados (16: 14-20 de janeiro; 18: 15-21 de fevereiro; 20: 14 a 20 de março de 2001). Além disso, diferentemente do verão de 2002/2003, as duas bandas dentro da variabilidade intrassazonal estiveram inativas durante esse período (i.e., valores entre -1 e 1 desvio padrão nas linhas pretas nas Figuras 5.9b e 5.9c). Como mencionado anteriormente, o verão de 2000/2001 foi marcado por um forte evento de seca sobre o Brasil, provavelmente associado com o fato da baixa atividade das séries intrassazonais (FOE1 10-30 e 30-90) e dos sinais negativos da série interanual entre os meses de janeiro e março de 2001. Outro fato curioso sobre o período de 2000/2001 é que o ENOS estava na sua fase neutra (pontos cinza na Figura 5.9a). Ou seja, os eventos de dipolo com sinal negativo, associados com a variabilidade, não podem ser

relacionados com eventos de El-Niño clássicos assim como notado no período de 2002/2003.

Em geral, os valores mais intensos na série FOE1 total, tanto com sinal positivo quanto com sinal negativo, ocorreram quando duas ou as três séries filtradas (FOE1 10-30, FOE1 30-90 e FOE1 120) estiveram em fase. Por exemplo, o evento mais intenso de dipolo com sinal positivo ocorreu na semana de 14-20 de janeiro de 2004 (evento 46). Durante essa semana, as séries temporais FOE1 10-30 e FOE1 30-90 apresentaram sinais positivos e intensos. Do mesmo modo, o evento mais intenso de dipolo com sinal negativo, o qual compreende a semana de 1-7 de fevereiro de 2010 (evento 108), ocorreu com as variabilidades intrassazonais e interanual em fase (i.e., FOE1 10-30, FOE1 30-90 e FOE1 120 < -1 desvio padrão). Entretanto, eventos de dipolo intensos podem ser associados com a atuação de apenas uma variabilidade, desde que, essa variabilidade atue de forma intensa e as outras variabilidades apresentem valores próximo de 0. Por exemplo, o caso 26 mostra um evento de dipolo com sinal positivo que foi influenciado apenas pela variabilidade 10-30 dias.

A Tabela 5.2 sintetiza os eventos de dipolo com sinal positivo que ocorreram na série temporal total e sua relação com as três séries temporais filtradas, a OMJ (representada pelo índice RMM1) e os eventos de ZCAS. O critério estabelecido examinar essa relação é que as séries FOE1 10-30, FOE 30-90, FOE1 120 e/ou RMM1 devem apresentar valores intensos (acima de 1 desvio padrão em módulo) em um determinado caso de dipolo positivo (FOE1 total > 1 desvio padrão). Como a relação entre o dipolo e o RMM1 é negativa, espera-se que a OMJ nas fases 8/1 influencie a formação do dipolo com sinal positivo (i.e., RMM1 negativo e abaixo de -1) dado que a onda de número 1 sobre a região tropical associada à OMJ atua de forma a favorecer (desfavorecer) a atividade convectiva sobre a América do Sul (Continente Marítimo) nessas duas fases. O inverso vale para as fases 4/5 com o RMM1 apresentando sinal positivo intenso para essas duas fases. O critério para associar os eventos de dipolo positivo com a ZCAS foi a presença da ZCAS em algum dia da semana em que a série FOE1 total apresentou valor acima de um desvio padrão. Desse modo, a Tabela 5.2 foi construída utilizando o símbolo ● para indicar os casos quando os critérios definidos acima foram obedecidos. No caso em que esses critérios não foram satisfeitos, a Tabela 5.2 foi construída com o símbolo ×.

Das 120 semanas avaliadas dentro do verão estendido de 1999/2000 a 2010/2011, a série temporal FOE1 total apresentou 17 semanas (2, 4, 11, 13, 14, 25, 26, 27, 46, 48, 50, 58, 78, 87, 92, 94 e 119) com valores acima de 1 desvio padrão (Figura 5.9a linha preta). Desses 17 casos, apenas três (11, 25 e 46) ocorreram com o valor semanal do RMM1 abaixo de -1 desvio padrão (linha vermelha na Figura 5.9c). A maior parte dos eventos de dipolo positivo pode ser associada com a presença da ZCAS. Do total das 17 semanas com dipolo positivo, a presença simultânea da ZCAS foi observada em 15 casos. De todos os casos de dipolo positivo, apenas o caso 26, o qual compreende os dias 14-20 de janeiro de 2002, não é explicado de maneira direta pela presença da ZCAS ou pela a OMJ nas fases 1/8 ($RMM1 < -1$). Durante essa semana, OMJ esteve ativa, porém na fase 2 (aumento da convecção sobre o Oceano Índico), e não foi notado a presença da ZCAS (ROSA, 2017; ROSSO et al., 2018). Das séries temporais geradas a partir dos dados de precipitação filtrados, apenas a série FOE1 10-30 apresentou valor acima de 1 desvio padrão (Figura 5.9b). Provavelmente, esse evento pode estar associado com a inércia dos processos termodinâmicos e da circulação sobre a América do Sul, os quais fizeram com que as condições favoráveis para a manutenção do padrão de dipolo devido à presença da OMJ nas fases 8/1 entre os dias 6-12 de janeiro de 2002 (período que compreende parte do evento 25) persistissem até a semana 14-20 de janeiro de 2002. A maioria dos eventos de dipolo com sinal positivo ocorreu quando a série FOE1 10-30 apresenta valores acima de 1 desvio padrão (4, 13, 14, 26, 27, 46, 50, 58, 78). Todos esses casos estão ligados com a presença da ZCAS. Dos 17 casos de dipolo positivo, 7 casos (11, 25, 46, 48, 78, 92 e 119) ocorreram com a série FOE1 30-90 intenso. A série temporal filtrada em 30-90 dias compreende os eventos de dipolo positivo que ocorreram com relação à OMJ nas fases 8/1 (11, 25 e 46). Entretanto, a FOE1 30-90 modular casos que não apresentam ligação com as fases 8/1 da OMJ. Por exemplo, o caso 92 (entre os dias 14-20 de novembro de 2008), onde é notada a presença do dipolo positivo com a presença da ZCAS e OMJ ativa nas fases 4/5 ($RMM1 > 1$) (i.e., OMJ fora de fase com o padrão de dipolo). 7 casos (2, 4, 48, 50, 58, 94 e 119) ocorreram com a série FOE1 120 intensa. É interessante notar que nos casos 2 e 94, nos quais a presença da ZCAS também foi observada, apenas a variabilidade interanual esteve intensa. Isso sugere que, em alguns casos, não é necessária a presença

da variabilidade intrassazonal de forma intensa para a formação da ZCAS, dada a presença favorável da variabilidade interanual.

Tabela 5.2 - Sumário dos eventos de dipolo com sinal positivo e relação desses eventos com as séries temporais FOE1 10-30 dias, FOE1 30-90 dias, FOE1 120, RMM1 e ZCAS.

Nº	2	4	11	13	14	25	26	27	46	48	50	58	78	87	92	94	119
TOTAL	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
RMM1	×	×	●	×	×	●	×	×	●	×	×	×	×	×	×	×	×
ZCAS	●	●	●	●	●	×	×	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
10-30	×	●	×	●	●	×	●	●	●	×	●	●	●	×	×	×	×
30-90	×	×	●	×	×	●	×	×	●	●	×	×	●	×	●	×	●
120	●	●	×	×	×	×	×	×	×	●	●	●	×	×	×	●	●

Os símbolos ● (×) indicam que os critérios de padrão de dipolo nas séries FOE1 10-30, FOE1 30-90 e FOE1 120 (valores > 1), média semanal do RMM1 < -1 e presença da ZCAS foram atendidos (não foram atendidos) durante os eventos de dipolo com sinal positivo na série FOE1 total.

Fonte: Produção do autor.

Da mesma forma que a Tabela 5.2, a Tabela 5.3 mostra a relação entre os eventos de dipolo com sinal negativo e RMM1, ZCAS e as séries FOE1 10-30, FOE1 30-90 e FOE1 120. Assim como as oscilações de 10-30 e 30-90 dias são responsáveis pela formação da ZCAS e, conseqüentemente, pela formação do dipolo positivo sobre a América do Sul sem a influência da OMJ, essas duas oscilações também são responsáveis por mudanças no padrão de circulação sobre a América do Sul, as quais provocam a formação de eventos de dipolo com sinal negativo. Essas mudanças são marcadas por um forte fluxo de umidade dos trópicos para o centro da Argentina e Sul do Brasil, por meio do JBN a leste dos Andes (NOGUÉS-PAEGLE; MO, 1997; HERDIES et al., 2002; GAN et al., 2004). Com isso, o ar seco que fica, normalmente, sobre o Oceano Atlântico Sul se desloca para a região leste da América do Sul. Isso forma um padrão de anomalias de precipitação como o padrão da ZCAS, porém com o sinal invertido, o qual pode ser considerado como um padrão “anti-ZCAS”. Esse padrão pode ser encontrado nos modos na série temporal do dipolo sobre a América do Sul, com sinais negativos, e assim como o padrão de dipolo positivo associado à ZCAS se mistura com o dipolo positivo associado à OMJ nas fases 1/8, a o padrão de dipolo negativo associado ao anti-ZCAS pode se misturar com o padrão de dipolo negativo associado à OMJ nas fases 4/5. Vale destacar que o anti-ZCAS não se refere apenas a

ausência da ZCAS. Na ausência da ZCAS e do anti-ZCAS, as regiões central e Sudeste do Brasil acompanham o ciclo diurno da atividade convectiva da região da bacia Amazônica que ocorre de forma marcante durante o verão austral. Isso resulta em pancadas de chuva no final da tarde e início da noite sobre essas regiões (GARREAUD; WALLACE, 1997). Dessa forma, o padrão de dipolo com sinal negativo não é caracterizado.

A Tabela 5.3 mostra que das 120 semanas avaliadas dentro do verão estendido de 1999/2000 a 2010/2011, 19 casos apresentaram valores abaixo de -1 desvio padrão na série FOE1 total (16, 18, 20, 30, 32, 33, 37, 44, 51, 66, 67, 74, 79, 102, 105, 106, 107, 108 e 110). Das variabilidades analisadas, a que mais se destaca é a interanual. Dos 19 casos com dipolo negativo, a variabilidade interanual esteve intensa em 12 casos (16, 18, 20, 30, 32, 33, 37, 102, 105, 106, 107 e 108). Esses casos estão ligados com o El-Niño que ocorreu no final de 2002 até o início de 2003 e com o El-Niño que ocorreu no final de 2009 até o início de 2010. Além desses dois eventos de El-Niño, a variabilidade interanual esteve intensa no início de 2001 (16, 18 e 20). Como já destacado, o ENOS esteve inativo durante esse período. Além disso, as variabilidades intrassazonais do padrão de dipolo, tanto em 10-30 dias como em 30-90, e o RMM1 não apresentaram valores intensos. Esses fatores podem ter favorecido o evento de seca que ocorreu em grande parte do Brasil no verão de 2000/2001 (KOUSKY; CAVALCANTI, 2001). A variabilidade de 10-30 dias apresentou valor abaixo de -1 desvio padrão em 6 casos (33, 51, 67, 74, 106 e 110), enquanto que a variabilidade de 30-90 dias apresentou valor abaixo de -1 desvio padrão em 8 casos (32, 44, 51, 66, 79, 102, 108 e 110). O RMM1 apresentou valor abaixo de -1 desvio padrão em 5 casos (32, 44, 66, 79 e 102), todos representados na variabilidade de 30-90, assim como notado na Tabela 5.2 para os eventos positivos.

Como o dipolo com sinal negativo mostra um padrão de anomalia negativa de precipitação sobre a região da ZCAS, espera-se que, nesses casos, a presença da ZCAS não seja observada e o padrão anti-ZCAS domine os casos de dipolo com sinal negativo que não sejam associados com as fases 4/5 da OMJ. Por isso, o ideal seria uma comparação do padrão do dipolo negativo com o registro da formação do padrão anti-ZCAS, assim como foi feito para o padrão de dipolo positivo e a ZCAS. Porém, como não existem registros da formação de um sistema como o anti-ZCAS, esses eventos são

classificados aqui com as análises nas séries FOE1 total, FOE1 10-30, FOE1 30-90 e FOE1 120. Com respeito à presença da ZCAS nesses casos, todos os eventos de dipolo negativo foram marcados com o símbolo × na Tabela 5.3. (i.e., ausência da ZCAS). Entretanto, nos casos 37, 67 e 74 foi notada a presença da ZCAS nos dois primeiros dias de cada semana desses casos (ROSA, 2017; ROSSO et al., 2018). Esses casos foram marcados com × porque a ZCAS estava no período de dissipação e, também, fortes anomalias negativas de precipitação na região da ZCAS foram notadas nos 5 dias subsequentes de cada uma dessas semanas. O caso 106, o qual corresponde à semana de 14-20 de janeiro de 2010, compreendeu um evento de ZCAS que ocorreu de 17-24 de janeiro de 2010, o qual foi definido pelo algoritmo de detecção automática de ZCAS desenvolvido por Rosa (2017). Entretanto, com uma análise visual de imagens de satélite no canal do vapor d'água e de anomalias diárias de ROL no período de 14-20 de janeiro de 2010 foi possível notar que a ZCAS esteve ausente no caso 106 (figuras não mostradas). Portanto, a Tabela 5.3 foi preenchida com × para esse caso.

Tabela 5.3 - Como a Tabela 5.2. Porém, para os eventos de dipolo com sinal negativo.

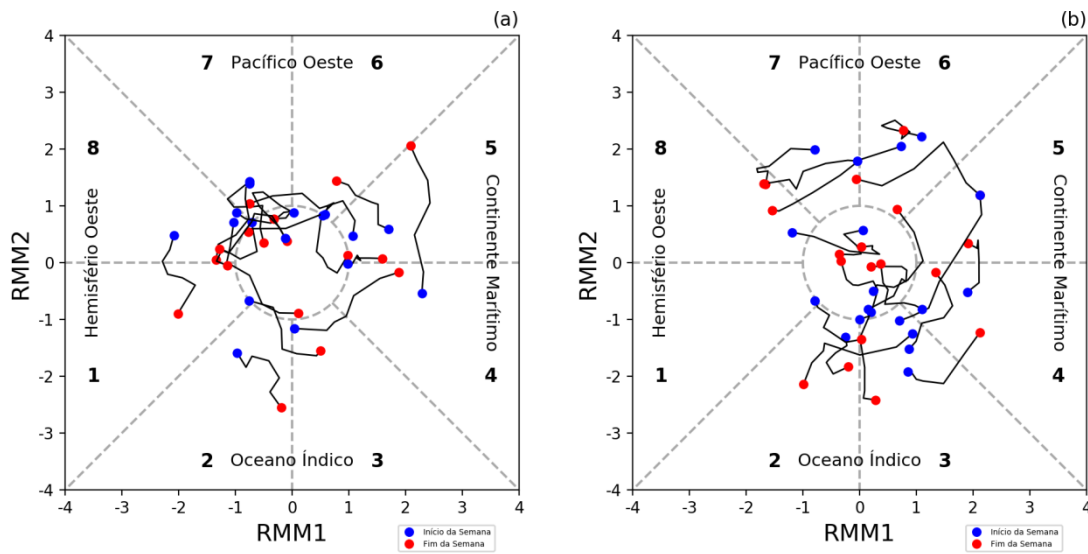
N°	16	18	20	30	32	33	37	44	51	66	67	74	79	102	105	106	107	108	110	
TOTAL	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
RMM1	×	×	×	×	●	×	×	●	×	●	×	×	●	●	×	×	×	×	×	×
ZCAS	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
10-30	×	×	×	×	×	●	×	×	●	×	●	●	×	×	×	●	×	×	×	●
30-90	×	×	×	×	●	×	×	●	●	●	×	×	●	●	×	×	×	×	●	●
120	●	●	●	●	●	●	●	×	×	×	×	×	×	●	●	●	●	●	●	×

Fonte: Produção do autor.

A análise realizada para mostrar as causas da formação dos padrões de dipolo, tanto para o sinal positivo como com para o sinal negativo, não sugere uma influência marcante da OMJ com relação ao padrão de dipolo. Dos 17 casos do dipolo com sinal positivo, o RMM1 apresentou sinal abaixo de -1 desvio padrão (indicativo da OMJ nas fases 1/8) em apenas três casos. Dos 19 casos do dipolo com sinal negativo, o RMM1 mostrou sinal acima de 1 desvio padrão (indicativo da OMJ nas fases 4/5) em apenas 5 casos. Por conta disso, a maior parte dos padrões de dipolo com sinal positivo (negativo) é explicada pela presença da ZCAS (anti-ZCAS) modulada pela variabilidade intrassazonal (nas bandas de 10-30 dias e 30-90 dias) e/ou pela variabilidade interanual. Para entender melhor a influência da OMJ no padrão de dipolo sobre a América do Sul,

os dados diários do RMM1 e RMM2 foram plotados na Figura 5.10 (diagrama de fase) para as semanas da série FOE1 total com valores acima de 1 desvio padrão em (a) e com valores abaixo de -1 desvio padrão em (b). Na Figura 5.10a, podemos notar que os eventos de dipolo com sinal positivo ocorrem de maneira distribuída no diagrama de fase, assim como foi notado para os eventos de ZCAS (Figura 5.7). Ou seja, os eventos de dipolo com sinal positivo ocorrem em todas as fases da OMJ, incluindo 5 casos em que ocorreram enquanto a OMJ se encontrava nas fases 4/5. Como destacado anteriormente, durante essas duas fases da OMJ, espera-se a formação do dipolo sobre a América do Sul com sinal negativo. Entretanto, por conta da influência da variabilidade de 10-30 dias e da variabilidade de 30-90 dias não associada à OMJ, observa-se, em alguns casos, a formação da ZCAS. Por conta disso, o padrão de dipolo com sinal positivo pode ser notado durante as fases 4/5 da OMJ. Contudo, com o diagrama de fase da OMJ para os 17 casos de dipolo com sinal positivo (Figura 5.10a), nota-se que: em apenas 1 caso a OMJ esteve nas fases 8/1 durante toda a semana e; em 5 casos, a OMJ variou entre as fases 8, 7 e inativa (circulo central). Portanto, a Figura 5.10a mostra que a OMJ pode exercer uma influência maior para a formação do padrão de dipolo com sinal positivo do que os 3 casos (11, 25 e 46) identificados por meio do critério da média semanal do RMM1 < -1 . Figura 5.10b, observa-se também que os eventos de dipolo com sinal negativo ocorrem de forma distribuída no diagrama de fase. Contudo, eventos de dipolo com sinal negativo nas fases 8/1 da OMJ não são notados. Ou seja, a OMJ nas fases 8/1 parece inibir a formação do padrão anti-ZCAS.

Figura 5.10 - Diagrama de fase da OMJ para os evento de dipolo sobre a América do Sul.



Os diagramas de fase da OMJ foram construídos com os dados diários dos índices RMM-1 (no eixo x) e RMM-2 (no eixo y) para as datas dos eventos do padrão de dipolo com sinal positivo em (a) e negativo em (b) definidos pela série FOE1 total $> |1|$ desvio padrão. Os pontos azuis (vermelhos) indicam o início (fim) de cada semana em que o padrão de dipolo esteve ativo.

Fonte: Produção do autor.

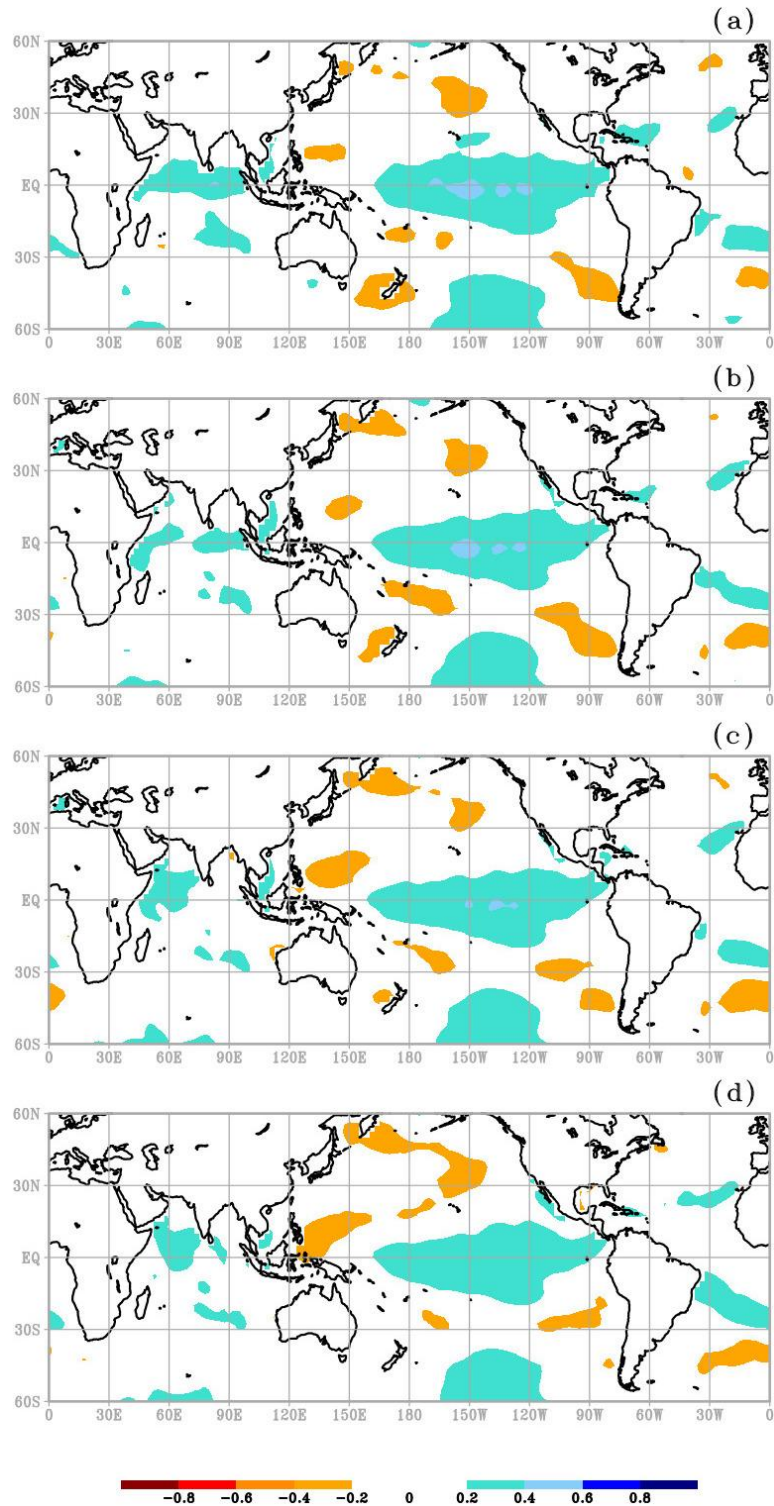
5.3.1.2 Modo-2

A Figura 5.2b mostra o padrão espacial do segundo modo da FOE das anomalias semanais de precipitação referentes às semanas-1 das 120 datas de inicialização (linhas verdes na Figura 5.3). Esse padrão é caracterizado por um centro bem definido com sinal negativo sobre a região equatorial da América do Sul e outro centro com sinal oposto que engloba a região Sudeste do Brasil e Oceano Atlântico adjacente. Esse modo representa 15% da variabilidade total dos dados no período avaliado. Assim como realizado para o modo-1 (padrão de dipolo), a série temporal do segundo modo (FOE2) foi correlacionada com cada ponto de grade das anomalias semanais de TSM, ROL e função de corrente em 200 hPa com e sem defasagem temporal assim como realizado para a FOE1 total.

A Figura 5.11 mostra o padrão de correlação entre a FOE2 e as anomalias de TSM defasadas temporalmente, adiantadas três semanas (a), duas semanas (b) e uma semana (c) em relação a FOE2, e sem defasagem temporal em (d). Na Figura 5.11, nota-se que FOE2 apresenta correlação positiva com a TSM na região tropical dos oceanos Índico,

Pacífico e Atlântico. Esse padrão de correlação mostra uma característica de persistência. Ou seja, o padrão de correlação não se altera com relação à defasagem entre a série temporal e os campos de TSM, principalmente sobre os oceanos Pacífico e Atlântico tropicais. Essa persistência remete a uma influência da variabilidade interanual no padrão espacial da FOE2 assim como foi notada para a FOE1 total. Padrões persistentes também são encontrados sobre as regiões extratropicais, principalmente no Oceano Pacífico e no Oceano Atlântico Sul. As regiões com valores de correlação positivos (negativos) indicam que a TSM apresenta anomalia positiva (negativa) quando a FOE2 apresenta valores positivos (i.e., anomalias negativas de precipitação na região equatorial da América do Sul). Esse padrão de TSM se inverte quando a FOE2 apresenta valores negativos (i.e., anomalias positivas de precipitação sobre a região equatorial da América do Sul).

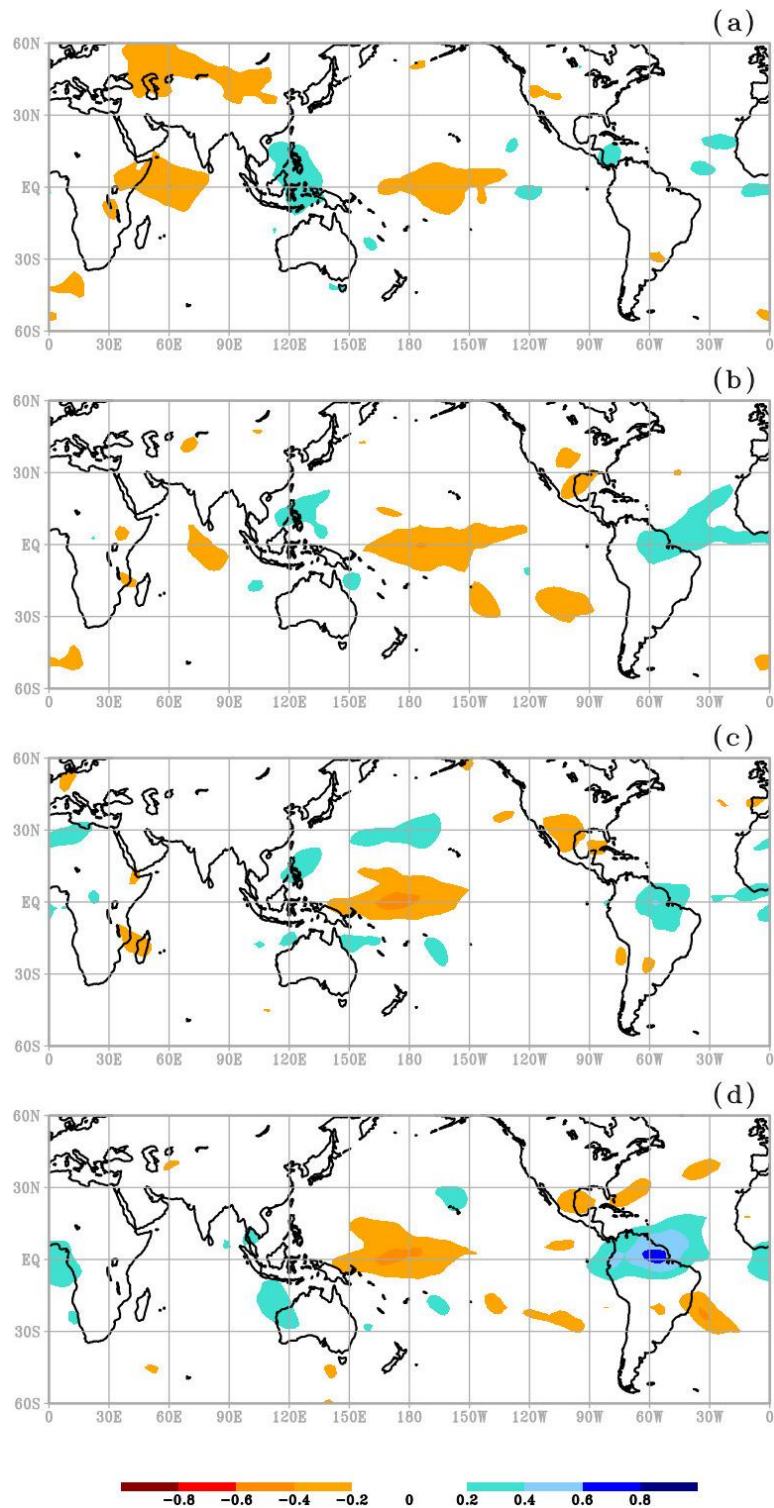
Figura 5. 11 - Correlação temporal entre a série temporal do modo-2 e as anomalias semanais de TSM.



Os valores de correlação foram calculados como na Figura 5.4 Porém, para o modo-2
Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.12 mostra o padrão de correlação assim como foi apresentado na Figura 5.11, porém, entre a série do FOE2 e os campos de anomalias semanais de ROL. Com as anomalias de ROL adiantadas três semanas (Figura 5.12a), o padrão de correlação apresenta valores negativos (positivos) sobre o oeste do Oceano Índico Tropical e sobre a região central do Oceano Pacífico Tropical (Continente Marítimo). Valores positivos de correlação sobre boa parte da região do Atlântico Norte e nordeste da América do Sul são notados com as anomalias de ROL adiantadas duas semanas (Figura 5.12b). Valores opostos de correlação são notados sobre a parte central do Oceano Pacífico. Os padrões encontrados sobre o Oceano Índico e Continente Marítimo na Figura 5.12a são notados de forma menos intensa na Figura 5.12b. Com defasagem de uma semana (Figura 5.12c), a correlação positiva notada sobre o Oceano Atlântico Norte notados na Figura 5.12b, desloca-se para a região da bacia Amazônica. O sinal negativo sobre o Oceano Pacífico tropical também se propaga para oeste, o qual apresenta valores negativos mais intensos. Com a correlação simultânea (Figura 5.12d), o padrão FOE2 (Figura 5.2b) é reproduzido, porém, com sinal invertido dada a relação inversa da ROL e a precipitação convectiva. O sinal negativo sobre o Oceano Pacífico Oeste mantém-se intenso com a correlação simultânea entre a série FOE2 e o ROL. Isso sugere uma forte influência da atividade convectiva sobre essa região para a formação do padrão FOE2. Ou seja, quando o FOE2 apresenta valores positivos, anomalias semanais positivas de ROL (i.e., inibição da convecção e de precipitação) são notadas sobre a região equatorial da América do Sul, enquanto que anomalias semanais negativas (i.e., aumento da convecção e de precipitação) são observadas sobre a região equatorial do Oceano Pacífico Oeste. A região que compreende parte do soeste do Oceano Atlântico Sul e litoral da região Sudeste do Brasil acompanha o sinal de convecção que ocorre sobre o Oceano Pacífico tropical. O padrão inverso pode ser definido quando a série do FOE2 apresenta valores negativos.

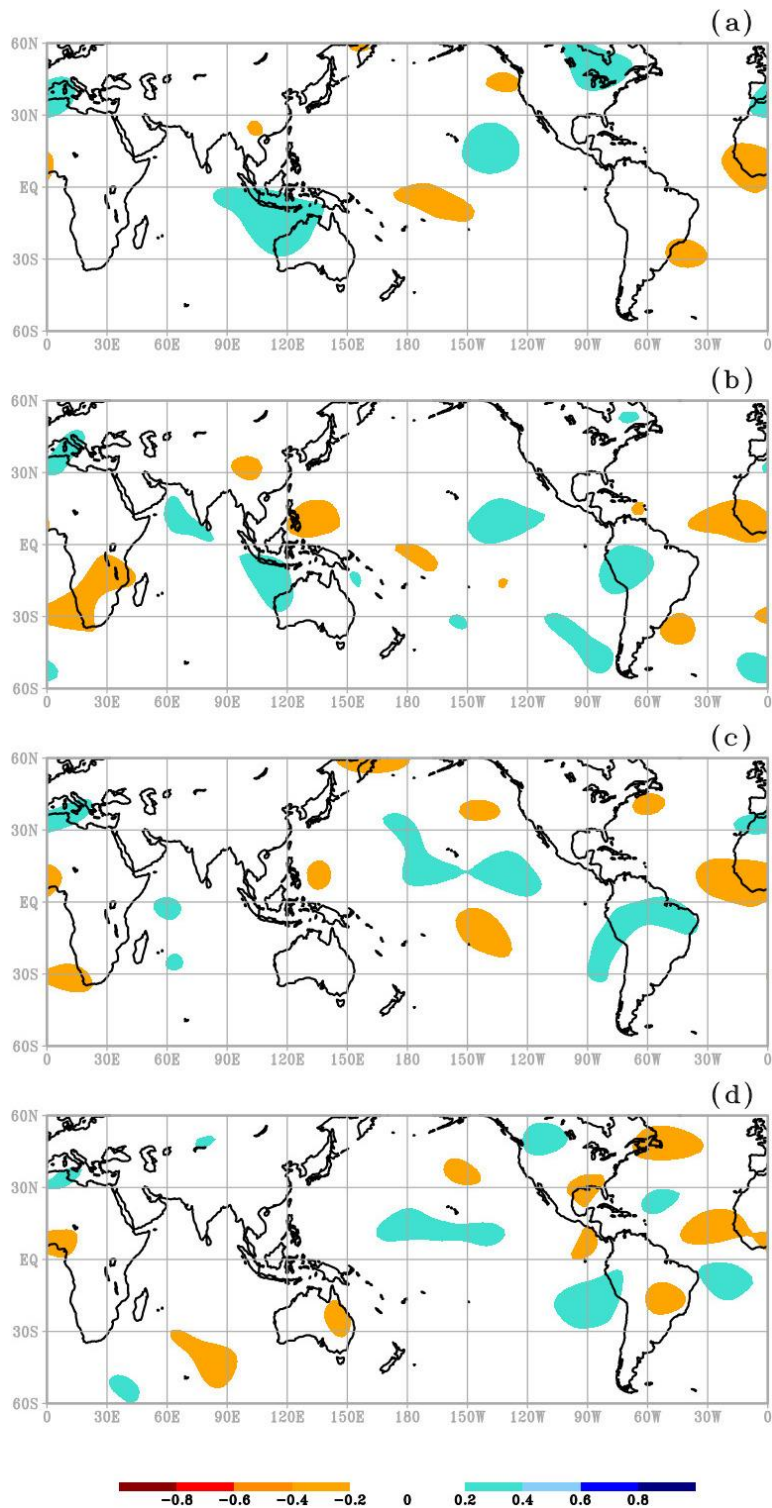
Figura 5.12 - Correlação temporal entre a série temporal do modo-2 e as anomalias semanais de ROL.



Os valores de correlação foram calculados como na Figura 5.5 Porém, para o modo-2.
Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.13 mostra o padrão de correlação entre FOE2 e a anomalia semanal de função de corrente em 200 hPa adiantada três semanas (Figura 5.13a), duas semanas (Figura 5.13b) e uma semana (Figura 5.13c). A correlação sem defasagem temporal é mostrada na Figura 5.13d. Com três semanas de defasagem, padrões com correlação positivo são notados sobre a região entre o Oceano Índico Oeste e o Continente Marítimo, parte da região tropical do Oceano Pacífico Norte (entre 150°W - 120°W), norte da América do Norte e Mediterrâneo. Padrões com correlação negativa são notados sobre a região tropical do Oceano Pacífico Sul (entre 180°W - 150°W), região sudoeste do Oceano Atlântico Sul e sobre parte da região tropical do Oceano Atlântico Norte. No geral, esses padrões persistem na Figura 5.13b (anomalias de função de corrente adiantadas duas semanas). Além disso, a Figura 5.13b mostra um padrão de correlação com valores positivos sobre a região tropical oeste da América do Sul que não foi evidenciado na Figura 5.13a. Com uma semana de defasagem (Figura 5.13c), o padrão com sinal positivo sobre a América do Sul se expande e os padrões sobre a região tropical dos Oceanos Pacífico e Atlântico é notado. Com a correlação simultânea (Figura 5.13d), os padrões sobre os oceanos Atlântico e Pacífico notados a partir da Figura 5.13a persistem com a correlação e estão associados com os padrões de ROL notados na Figura 5.10. As regiões com valores positivas (negativas) de correlação no Hemisfério Sul e negativas (positivas) no Hemisfério Norte indicam que essas regiões apresentam anomalias ciclônicas (anticiclônicas) quando a série FOE2 apresenta valores positivos (i.e., anomalia negativa de precipitação sobre a região equatorial da América do Sul). Os padrões de anomalias ciclônicas e anticiclônicas se invertem quando o FOE2 apresenta valores negativos.

Figura 5.13 - Correlação temporal entre a série temporal do modo-2 e as anomalias semanais da função de corrente em 200 hPa.



Os valores de correlação foram calculados como na Figura 5.6. Porém, para o modo-2.
Fonte: Produção do autor.

Assim como notado no modo-1 (padrão de dipolo), a variabilidade na escala interanual é a que mais se destaca nos padrões de correlação apresentados nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, dada a persistência desses padrões em função da defasagem. Os campos de correlação sugerem que o padrão FOE2 é formado devido a anomalias da atividade convectiva sobre o Oceano Pacífico Oeste. Essas anomalias são responsáveis por teleconexões que alteram o padrão de circulação sobre o Oceano Atlântico tropical. Com isso, anomalias na circulação em altos níveis são observadas sobre a região equatorial da América do Sul, as quais influenciam a atividade convectiva sobre a mesma região, resultando no padrão FOE2 nas anomalias semanais de precipitação.

Para elucidar o mecanismo destacado acima, a Figura 5.14 apresenta os compostos de anomalias semanais de ROL e de circulação em 200 hPa para os eventos com padrão FOE2 com sinal positivo (Figura 5.14a) e negativo (Figura 5.14b). Os eventos foram definidos por meio da série temporal do FOE2 (Figura 5.15) com o critério do valor acima de 1 desvio padrão em módulo. As anomalias de ROL mostradas na Figura 5.14 apresentam significância estatística ao nível de 5%. A Figura 5.14 mostra o padrão de anomalias de ROL opostas entre as regiões equatoriais do Oceano Pacífico Oeste ($150^{\circ}\text{E} - 180^{\circ}$) e América do Sul. Quando a série FOE2 apresenta valores positivos e intensos, anomalias negativas de ROL (i.e., intensificação da atividade convectiva e da precipitação) são notadas sobre o Oceano Pacífico Oeste em simultâneo com anomalias positivas de ROL (i.e., inibição da convecção e precipitação) sobre a região equatorial da América do Sul (Figura 5.14a). Com a intensificação da convecção sobre o Oceano Pacífico Oeste, é notado a formação dos padrões de trens de onda de Rossby sobre os Hemisférios Norte e Sul. Esses padrões são formados em resposta ao aquecimento na média troposfera devido à liberação de calor latente sobre o Oceano Pacífico Oeste. O padrão de onda sobre o Hemisfério Sul ocorre ao longo da região tropical desde o Oceano Pacífico Leste (120°W) até o Oceano Atlântico Sul (30°W). O padrão de onda sobre o Hemisfério Norte apresenta uma trajetória para a região extratropical, a qual se inicia sobre o Oceano Pacífico Tropical em 140°W e segue até $50^{\circ}\text{N}-115^{\circ}\text{W}$, onde apresenta uma trajetória para a região tropical até o Oceano Atlântico Norte. Esses padrões de onda corroboram os valores de correlação encontrados na Figura 5.13d. Por meio desse trem de onda, a circulação sobre a região equatorial da América do Sul e Oceano Atlântico adjacente é alterada. Sobre a região tropical do Oceano Atlântico,

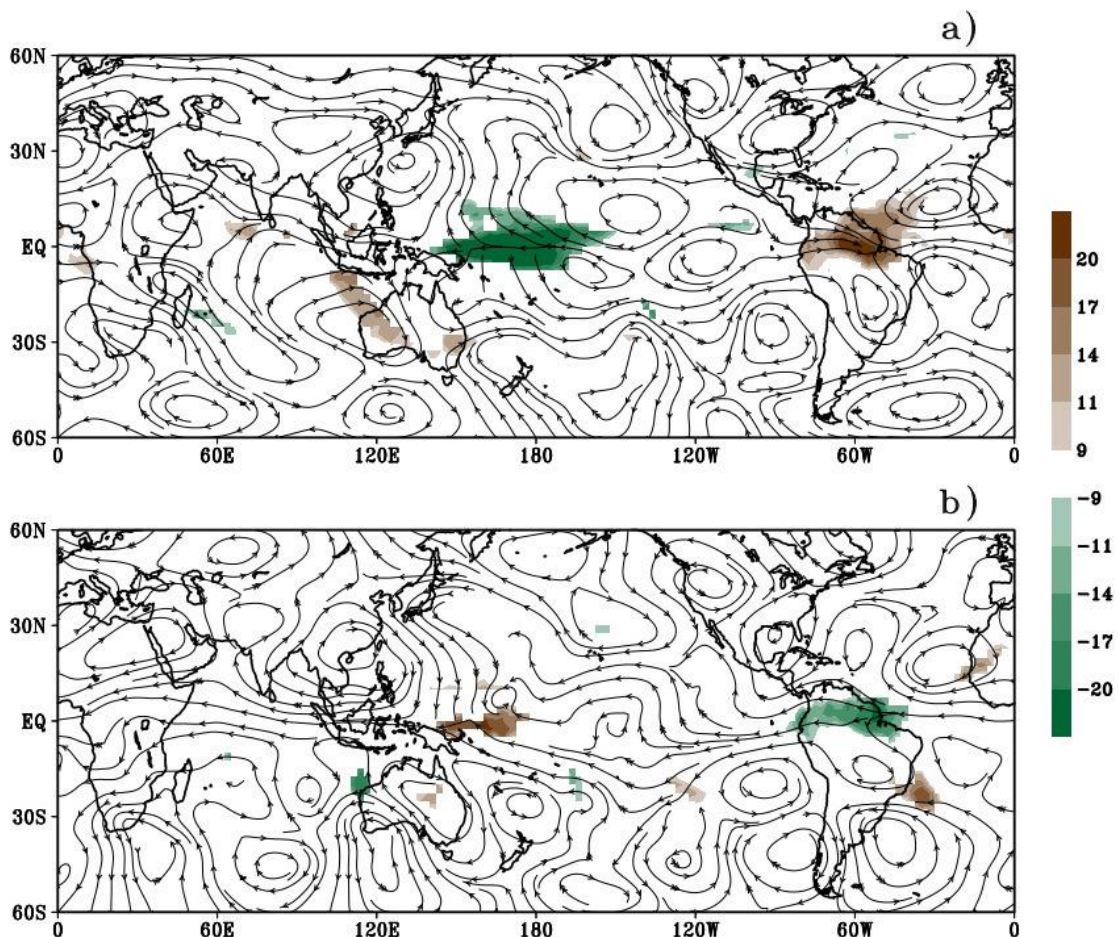
observam-se duas anomalias ciclônicas em altos níveis (uma em cada hemisfério) simetricamente dispostas com relação à latitude. Como consequência, um padrão de convergência na circulação em altos níveis é destacado sobre a região equatorial da América do Sul. Dessa forma, a atividade convectiva e, conseqüentemente, a precipitação são inibidas (Figura 5.14a).

O composto dos eventos de FOE2 intensos e com sinal negativo (Figura 5.14b) mostra o padrão inverso ao composto com sinal positivo (Figura 5.14a). Ou seja, anomalias positivas (negativas) de ROL são notadas sobre a região equatorial do Oceano Pacífico Oeste (equatorial da América do Sul). Dessa forma, o composto de circulação na Figura 5.14b apresenta padrão inverso ao notados na Figura 5.14a. Dessa forma, sobre o Oceano Atlântico tropical, nota-se a formação de duas anomalias anticiclônicas simétricas com relação à latitude. Com isso, a circulação em altos níveis apresenta um padrão de divergência sobre a região equatorial da América do Sul, o qual favorece a convecção/precipitação e a formação do padrão FOE2 com sinal negativo (anomalias de ROL sobre a América do Sul na Figura 5.14b). A resposta da circulação sobre a América do Sul a atividade convectiva sobre o Oceano Pacífico Oeste é representada em estudos numéricos (SARDESHMUKH; HOSKINS, 1988) e observacionais (TEDESCHI, 2013).

Uma característica que chama atenção nos compostos de circulação (Figura 5.14) é a formação de anomalias anticiclônicas (ciclônicas) sobre a região Sudeste de Brasil durante eventos de FOE2 positivos (negativos). As anomalias ciclônicas em altos níveis são acompanhadas por anomalias positivas de ROL sobre o Oceano Atlântico Sudoeste. Isso sugere que o padrão FOE2 exerce influência na atividade convectiva sobre a região da ZCAS, principalmente em sua parte oceânica. Essas anomalias ciclônicas, durante os eventos de FOE2 com sinais negativos, estão associadas com o deslocamento dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCANs) (KOUSKY; GAN, 1981) para a região Sudeste do Brasil e Oceano Atlântico adjacente. Isso pode ser evidenciado por meio de imagens de satélites para as datas (e.g., entre os dias 15-21 de dezembro de 2010) quando a série FOE2 apresenta valores abaixo de -1 desvio padrão (figura não mostrada). Como resultado do VCAN, o ar seco sobre o Oceano Atlântico se propaga para a região sobre o Sudeste do Brasil, o que inibe a convecção sobre essa região. É importante destacar que os valores ROL associados aos VCANs apresentam

significância estatística ao nível de 5% apenas sobre o Oceano Atlântico Sudoeste. Provavelmente, As anomalias de ROL não são significativas sobre o Sudeste do Brasil devido à alta variabilidade espacial dos VCANs.

Figura 5.14 - Compostos de ROL e circulação para os eventos intensos associados à FOE2.



Os compostos de ROL (regiões sombreadas) e circulação (linhas de corrente) em 200 hPa foram computados para os eventos intensos FOE2 com sinais positivos ($FOE2 > 1$ desvio padrão) em (a) e negativos ($FOE2 < -1$ desvio padrão) em (b). As regiões com anomalias positivas e negativas de ROL são estatisticamente significantes ao nível de 5%.

Fonte: Produção do autor.

Como notado na Figura 5.11, a série do FOE2 apresenta valores altos de correlação com sinal positivo sobre a região do ENOS (Oceano Pacífico tropical). Isso sugere que, durante eventos de El-Niño, a série do FOE2 apresenta valores positivos (i.e., anomalias semanais negativas de precipitação sobre a região equatorial da América do Sul). O oposto vale para os eventos de La-Niña, ou seja, a série temporal FOE2 apresenta

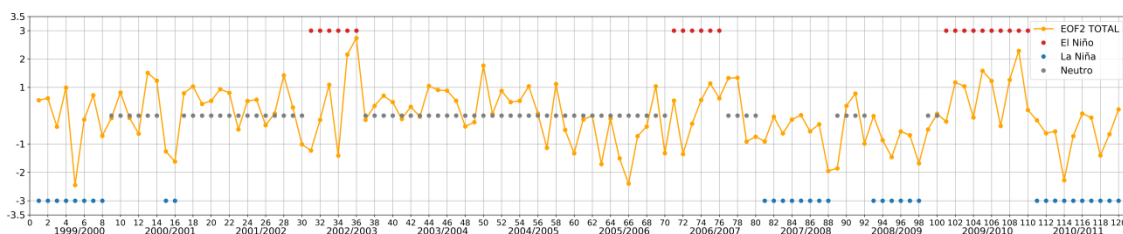
valores negativos (i.e., anomalias semanais positivas de precipitação sobre a região equatorial da América do Sul). Isso ocorre porque as fases do ENOS alteram a posição longitudinal das fontes equatoriais de aquecimento da média troposfera devido à forte atividade convectiva e, conseqüentemente, o padrão de circulação sobre a América do Sul (Figura 5.14).

Para destacar a relação do ENOS com o padrão FOE2, a Figura 5.15 mostra a série temporal da FOE2 (linha laranja) com as fases do ENOS representados pelos pontos vermelhos, azuis e cinza, os quais definem a ocorrência dos eventos de El-Niño, La-Niña e neutros, respectivamente, para cada média semanal da série FOE2 (Ver Figura 5.3 para relembrar a construção das anomalias semanais de precipitação, as quais são dependentes das datas de inicialização do BAM-1.2). A série FOE2 mostra 21 casos (13, 14, 18, 28, 33, 35, 36, 44, 50, 55, 58, 69, 75, 77, 78, 102, 103, 105, 106, 108 e 109) em que esse padrão esteve ativo e com sinal positivo (i.e., valores acima de 1 desvio padrão), enquanto que o padrão FOE2 foi notado com sinal negativo (i.e., valores abaixo de -1 desvio padrão) em 19 casos (5, 15, 16, 30, 31, 34, 57, 60, 63, 65, 66, 70, 72, 88, 89, 95, 98, 114 e 118). Dos 21 casos de FOE2 positivos, 10 casos ocorreram durante eventos de El-Niño (33, 35, 36, 75, 102, 103, 105, 106, 108 e 109) e os outros 11 casos ocorreram durante eventos neutros de ENOS. É importante destacar que nenhum caso com a FOE2 intensa e com sinal positivo ocorreu durante eventos de La-Niña. Dos 19 casos de FOE2 com sinal negativo, 8 ocorreram durante eventos de La-Niña (5, 15, 88, 89, 95, 98, 114 e 118), 8 ocorreram durante a fase neutra do ENOS (16, 30, 57, 60, 63, 65, 66 e 70) e 3 casos ocorreram durante eventos de El-Niño (31, 34 e 32).

O número de casos de FOE2 com sinal positivo que ocorreram durante eventos de El-Niño (10 casos no total) e o número de eventos de FOE2 com sinal negativo que ocorreram durante eventos de La-Niña (8 casos no total) sugerem que o ENOS pode excitar o mecanismo para a formação do padrão FOE2 sobre a América do Sul, o que explica os valores de correlação encontrados na Figura 5.11. Contudo, é interessante notar que alguns eventos de ENOS são mais favoráveis à formação do padrão FOE2 do que outros. Por exemplo, durante o evento de El-Niño que ocorreu no verão estendido de 2009/2010, 6 eventos de FOE2 com sinal positivo foram notados, enquanto que apenas um evento foi notado durante o El-Niño de 2006/2007. Isso pode estar

relacionado com o posicionamento das anomalias de TSM na região tropical do Oceano Pacífico. Os eventos de ENOS que ocorrem próximos à costa oeste da América do Sul não influenciam a atividade convectiva sobre o Oceano Pacífico Oeste. Dessa forma, o padrão de circulação em altos níveis não é alterado como notado na Figura 5.14. Conseqüentemente, o padrão FOE2 não é formado sobre a América do Sul durante esses eventos de ENOS.

Figura 5.15 – Série temporal associada ao padrão FOE2.



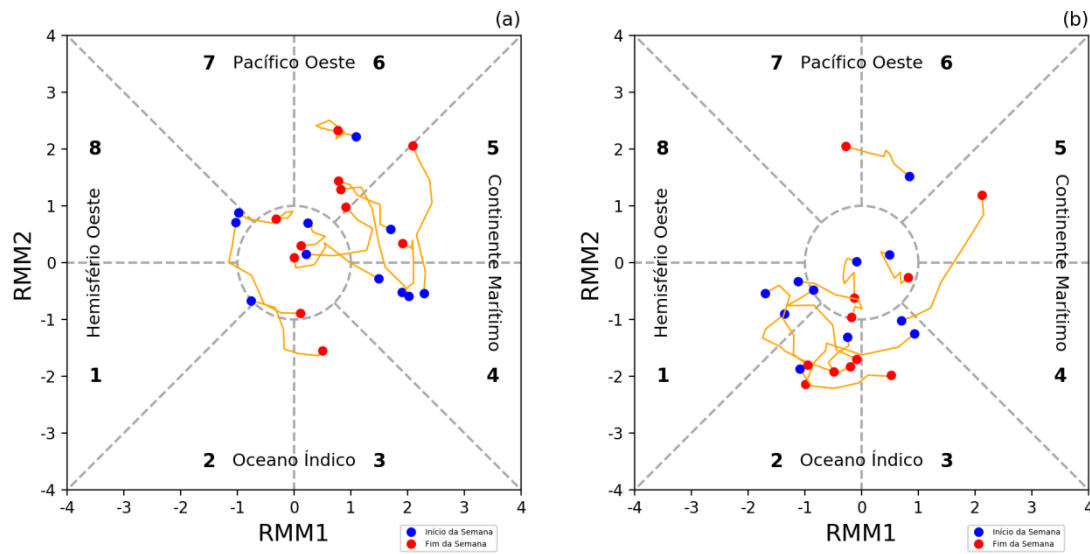
A série FOE2 foi gerada para as anomalias semanais de precipitação do GPCP referentes às semanas-1. Os pontos vermelhos, azuis e cinzas indicam as fases do ENOS (El-Niño, La-Niña e neutro, respectivamente) em cada semana da série temporal.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.15 mostra que a maior parte dos casos de FOE2 ocorre durante a fase neutra do ENOS. Por exemplo, o período durante verão estendido de 2005/2006 (casos 61-70) com valores negativos intensos na série FOE2. Dessa forma, outros fenômenos que excitam a atividade convectiva sobre o Oceano Pacífico Oeste, além do ENOS, podem gerar uma resposta na circulação em altos níveis, a qual influencia a atividade convectiva/precipitação sobre a região equatorial da América do Sul (Figura 5.2b). A OMJ também apresenta um forte impacto na atividade convectiva sobre o Oceano Pacífico Oeste, com as fases 2/3 (6/7) aumentando (diminuindo) a atividade convectiva sobre essa região. Entretanto, essas fases não exercem uma resposta semelhante ao padrão FOE2 sobre a região equatorial da América do Sul (GOTTSCHALCK et al., 2010; GRIMM, 2019). Isso explica o fato do valor de correlação entre a série FOE2 e o RMM2 ser baixo (igual a 0.1). Contudo, ao plotar os eventos de FOE2 com sinal positivo que não ocorreram durante eventos de El-Niño (Figura 5.16a) e os eventos com sinal negativo que não ocorreram durante eventos de La-Niña (Figura 5.16b) no diagrama de fase da OMJ, observa-se uma simetria desses eventos com relação às fases da OMJ. Em outras palavras, é possível notar que os eventos com sinais positivos que não estiveram associados a eventos de El-Niño (13, 14, 18, 28, 44, 50, 55, 58, 69, 77 e

78) ocorreram com mais frequência quando a convecção associada à OMJ se propagou da região do Continente Marítimo para o Oceano Pacífico Oeste (linhas laranja entre as fases 4/5/6 na Figura 5.16a). Do mesmo modo, os eventos de FOE2 com sinais negativos não associados com La-Niña (16, 30, 31, 34, 57, 60, 63, 65, 66, 70 e 72) ocorreram de forma mais frequente quando a OMJ se propagou do Hemisfério Oeste para o Oceano Índico (linhas laranja entre as fases 1/2/3 na Figura 5.16b). É importante destacar que o ENOS e a OMJ não explicam todos os eventos de FOE2 sobre a América do Sul, com outros mecanismos de teleconexão que afetam a atividade convectiva sobre o Oceano Pacífico Oeste podendo influenciar o padrão FOE2 sobre a América do Sul.

Figura 5.16 – Diagrama de fase da OMJ para os eventos de FOE2 sem relação com o ENOS.



O diagrama de fase foi construído como a Figura 5.10. Porém para os eventos de FOE2 que ocorreram durante a fase de neutralidade do ENOS.

Fonte: Produção do autor.

5.3.1.3 Modo-3

A Figura 5.2c mostra o padrão espacial do terceiro modo da FOE das anomalias semanais de precipitação (FOE3) referente às semanas-1 das 120 datas de inicialização (linhas verdes na figura 5.3). Como destacado anteriormente, esse padrão é marcado por centros com sinais positivos sobre o norte do Nordeste do Brasil e sobre a região entre o extremo sul e Uruguai, e por centros com sinais negativos sobre o Norte da América do Sul e sobre a região oceânica da ZCAS. Essa estrutura é definida como padrão de tripolo (VASCONCELLOS, 2008) e é associada a eventos de ZCAS que são desconectados com a atividade convectiva sobre a América do Sul, as quais são conhecidas como ZCAS oceânicas (CARVALHO et al., 2011; DE LIMA et al., 2018), quando o padrão de tripolo apresenta sinais negativos. Esse modo representa 12% da variabilidade total das anomalias semanais de precipitação para o período avaliado. Como destacado em Carvalho et al. (2011), o padrão de tripolo sobre a América do Sul apresenta variabilidade na escala intrassazonal com pico na banda de 15-20 dias e está relacionado, com uma pêntrada de antecedência da formação desse padrão, com uma estrutura de trem de ondas de Rossby extratropicais que se estende da Indonésia em direção a altas latitudes do Hemisfério Sul, a qual se assemelha ao padrão de

teleconexão do PSA. Por brevidade, uma análise mais profunda sobre os mecanismos de teleconexões responsáveis pela formação do padrão de tripolo sobre a América do Sul não será realizada aqui.

5.3.2 Avaliação da representação espaço-temporal das variabilidades sub-sazonais sobre a América do Sul pelos modelos do CPTEC e ECMWF

A habilidade preditiva dos MCGAs na escala sub-sazonal está associada à capacidade desses modelos em representar os principais modos de variabilidade. Com os modos dominantes de variabilidade espaço-temporal das anomalias semanais de precipitação sobre a América do Sul definidos (padrão de dipolo, FOE2 e padrão de tripolo), é possível avaliar a similaridade entre esses padrões de referência (GPCP) e os padrões existentes nos MCGAs. Nesta parte do trabalho, apenas os modelos do CPTEC e ECMWF são avaliados. As estruturas espaciais dos três primeiros modos encontradas com os dados de precipitação do GPCP são comparadas com os correspondentes modos das médias do conjunto (11 membros) dos modelos do CPTEC e ECMWF por meio da correlação espacial (CE), considerando os quatro períodos de validade das previsões (semanas-1, 2, 3 e 4). Dessa forma, a representação das estruturas espaciais desses modos de variabilidade pelos modelos é avaliada. A avaliação das estruturas temporais é realizada por meio da correlação entre as séries temporais (CT) dos modos de FOE dos dois MCGAs e do GPCP (Seção 2.2.5).

A Figura 5.17 mostra o padrão espacial das FOEs das anomalias semanais do GPCP e dos modelos do CPTEC e do ECMWF (determinadas pela média do conjunto composto por 11 membros para cada modelo) para as quatro semanas de previsão (semana-1, semana-2, semana-3 e semana-4 - ver Figura 5.3). A ordem das três primeiras FOE não se altera nos dados do GPCP com relação as quatro semanas. Entretanto, em alguns casos, a ordem dos modos-2 e 3 na análise de FOEs dos modelos do CPTEC e do ECMWF não condiz com a ordem dos modos das FOEs do GPCP. Por conta disso, tais modos foram reordenados com relação aos modos do GPCP para a construção da Figura 5.17. Os modos foram reordenados como em Lee et al. (2011). Dessa forma, a estrutura espacial e a série de um determinado modo do GPCP são correlacionadas com as estruturas espaciais (i.e., CE) e séries temporais (i.e., CT) de todos os modos dos modelos do CPTEC e do ECMWF. Esse procedimento é realizado para cada modelo e

para cada prazo de validade de previsão de forma separada. Com isso, o modo de cada modelo que apresentou o maior valor do resultado da raiz quadrada entre o produto do CE e CT (Equação 2.8 na Seção 2.2.5) é reordenado para a posição do referido modo do GPCP. Por exemplo, o FOE2 do GPCP (Figura 5.2b) aparece como terceiro modo das FOEs do modelo ECMWF. Para a Figura 5.17, esse modo foi reordenado e aparece como o segundo modo.

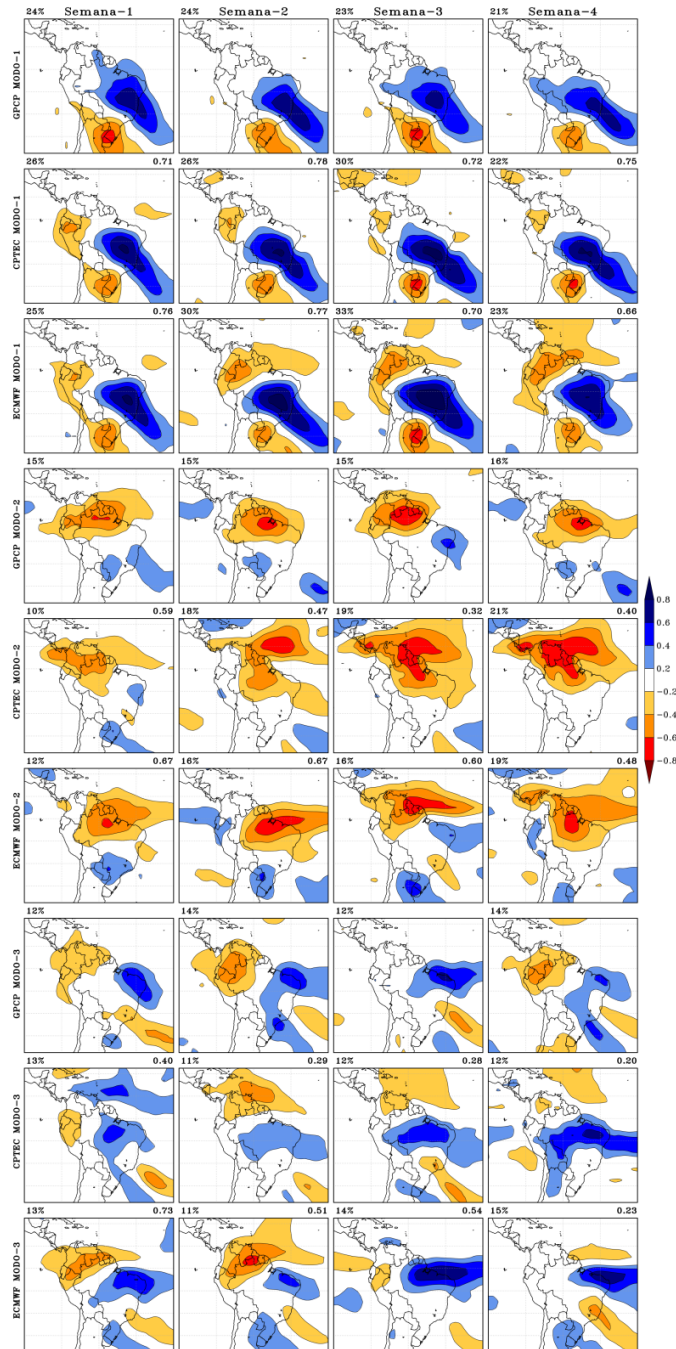
Na Figura 5.17, nota-se que ambos os modelos do CPTEC (segunda linha na Figura 5.17) e do ECMWF (terceira linha na Figura 5.17) são capazes de representar a estrutura espacial do padrão de dipolo sobre a América do Sul (primeira linha na Figura 5.17) nos quatro prazos de validade de previsão (semanas-1, 2, 3 e 4). Os valores de correlação entre as estruturas espaciais do padrão de dipolo encontrados nas anomalias semanais do GPCP e em cada modelo variam de 0.70 a 0.78, para o modelo do CPTEC, e de 0.66 a 0.76, para o modelo do ECMWF, com o prazo de validade da previsão. Ou seja, no geral, a estrutura espacial do padrão de dipolo sobre a América do Sul é melhor representada no modelo do CPTEC do que no modelo do ECMWF. Isso ocorre porque o padrão de dipolo no modelo do ECMWF é acompanhado por sinais de anomalias de precipitação sobre o norte da América do Sul e Oceano Atlântico adjacente, os quais não são notados na estrutura espacial do padrão de dipolo do GPCP. Esses sinais também são notados no padrão espacial do modelo do CPTEC com menos intensidade. Além disso, o polo mais ao norte (região sombreada em tons de azul na segunda linha da Figura 5.17) aparece deslocado ligeiramente para o sul na estrutura do FOE1 do CPTEC. Ambos os modelos capturam de maneira satisfatória a fração da variância referente ao padrão do dipolo que está entre 21% e 24% (dependendo da semana de previsão) nos dados do GPCP e entre 22% e 33% nos modelos do CPTEC e ECMWF.

As estruturas espaciais dos modos-2 e 3 são dos modelos do CPTEC e ECMWF são menos comparáveis aos correspondentes modos encontrados no GPCP do que verificado para o modo-1. Isso é mais evidente no modelo do CPTEC. Com relação ao modo-2, os valores de correlação espacial entre as estruturas dos modos-2 do GPCP modelo do CPTEC variam entre 0.32 e 0.59 (quinta linha na Figura 5.17), dependendo do prazo de validade da previsão, enquanto que esses valores de correlação espacial variam entre 0.48 0.67 para o modelo do ECMWF (sexta linha na Figura 5.17). A estrutura espacial do modo-2 do modelo do CPTEC apresenta forte sinal sobre a região

tropical do Oceano Atlântico Norte, a qual não é notada na estrutura espacial do modo-2 do GPCP. A estrutura espacial do modo-2 do modelo do ECMWF apresenta sinal mais forte sobre a região equatorial da América do Sul, assim como notado na estrutura do GPCP. Por conta disso, o modelo do ECMWF apresenta maiores valores de correlação espacial do que o modelo do CPTEC. Ambos os modelos tendem a formar uma estrutura de tripolo sobre a América do Sul em certos prazos de validade de previsão, a qual não é notada na estrutura espacial do modo-2 do GPCP (e.g., semana-1 no modelo do CPTEC e na semana-3 no modelo do ECMWF). O modo-2 representa em torno de 15% da variância total nos quatro prazos de validade de previsão tanto no modelo do CPTEC como no modelo do ECMWF. Esse valor é próximo à variância representada pelo segundo modo do GPCP.

Com relação ao modo-3, o modelo do CPTEC (linha 8 na Figura 5.17) apresenta sinais sobre a região tropical do Oceano Atlântico Norte, os quais não são notados na estrutura espacial do GPCP (linha 7 na Figura 5.17). As estruturas sobre a região tropical da América do Sul não são capturadas de maneira satisfatória nas quatro semanas de previsão se comparado ao GPCP. Além disso, o padrão de tripolo não é notado nas semanas-2 e 4 no modo-3 do CPTEC. Devido a essas diferenças, os valores de correlação entre as estruturas espaciais do modo-3 do GPCP e do modo-3 do modelo do CPTEC variam entre 0.2 e 0.4, dependendo do prazo de validade de previsão (oitava linha na Figura 5.17). Assim como no modo-2, a estrutura espacial do modo-3 é melhor representada pelo modelo do ECMWF do que no modelo do CPTEC. Entretanto, o modelo do ECMWF apresenta mais dificuldade em representar a estrutura espacial do modo-3 do que as estruturas espaciais dos modos-1 e 2. Isso pode ser notado com os valores de correlação espacial que variam entre 0.23 e 0.73. Por outro lado, tanto o modelo do CPTEC como o modelo do ECMWF apresentam valores de fração da variância próximos aos dos valores do GPCP (em torno de 13%). É interessante destacar que, para o modo-1, os valores de CE não variam com relação ao prazo de validade da previsão. Isso mostra que os modelos do CPTEC e do ECMWF conseguem reproduzir a estrutura espacial do padrão de dipolo em prazos de entrega mais longos (semanas-3 e 4) de maneira similar que as estruturas espaciais nos prazos de validade mais curtos (semanas-1 e 2). Essa característica não é notada para os modos-3 e 3.

Figura 5.17 - Padrões espaciais dos três primeiros modos encontrados para o dado do GPCP e para as previsões retrospectivas dos modelos do CPTEC e ECMWF.



Os padrões espaciais foram determinados a partir da análise de FOEs para os dados do GPCP e da média do conjunto (11 membros) dos modelos do CPTEC e ECMWF (linhas) para as quatro semanas de previsão (colunas). Os valores no canto superior esquerdo de cada padrão indicam a porcentagem da variância explicada por cada modo. Os valores no canto superior direito representam a correlação espacial entre os modos (padrões espaciais) dos modelos e os correspondentes modos de referência (GPCP).

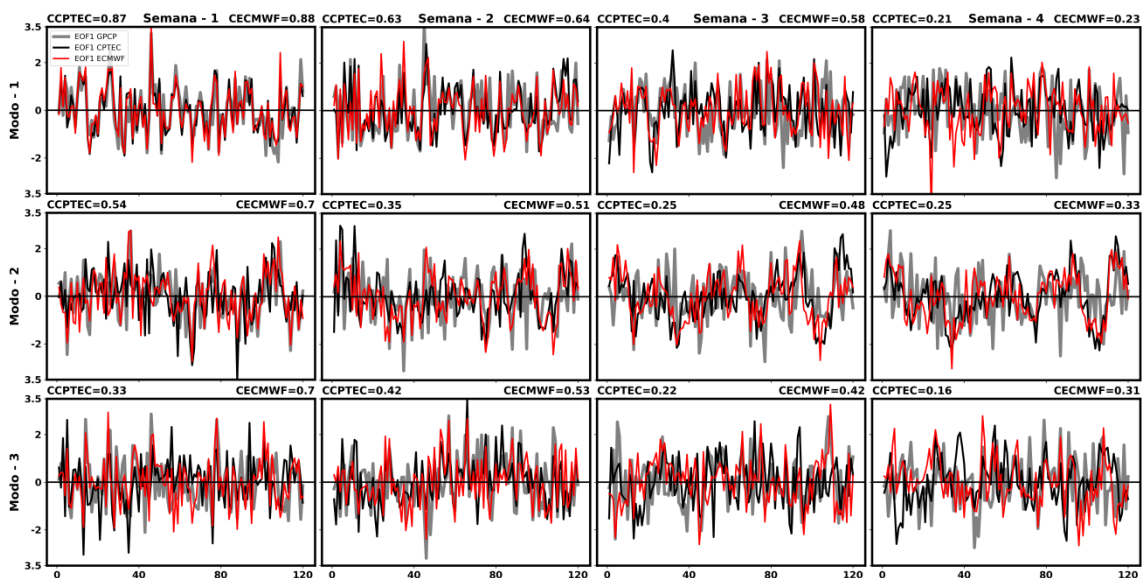
Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.18 mostra as séries temporais dos três primeiros modos (linhas) para as quatro semanas de previsão (colunas) do GPCP (linhas cinza nos gráficos) e dos modelos do CPTEC (linhas pretas nos gráficos) e ECMWF (linhas vermelhas nos gráficos). Os valores de CT entre o modelo do CPTEC e o GPCP (CCPTEC – valores no canto superior esquerdo de cada gráfico) e entre o modelo do ECMWF e o GPCP (CECMWF – valores no canto superior direito de cada gráfico) mostram que, diferentemente da correlação do padrão espacial (Figura 5.17), os modelos apresentam uma dependência com relação ao prazo de previsão para representar a evolução temporal desses modos. Ou seja, os valores das CT diminuem com o aumento no prazo de validade da previsão. Os valores de CT também apresentam dependência com relação aos modos de variabilidade. Exceto na quarta semana de previsão, ambos os modelos apresentam maiores valores de CT para o modo-1, o qual apresenta a maior parte da variância representada (em torno de 23%). Esta constatação pode explicar os valores pronunciados de correlação sobre a região do dipolo da América do Sul nas semanas-1, 2 e 3 (Figura 4. 2) encontrados na avaliação dos modelos para as previsões sub-sazonais de precipitação. Ainda com relação ao modo-1, os modelos do CPTEC e do ECMWF apresentam praticamente o mesmo nível de correlação com relação ao GPCP nas duas primeiras semanas de previsão (CCPTEC igual a 0.87 e 0.63 e CECMWF igual a 0.88 e 0.64 nas semanas-1 e 2, respectivamente). Entretanto, para as previsões com três semanas de antecedência, o modelo do ECMWF apresenta valor de CT maior do que o modelo do CPTEC (CCPTEC=0.40 e CECMWF=0.58). Para as previsões do modo-1 com quatro semanas de antecedência, os dois modelos apresentam valores de CT semelhantes (em torno de 0.2).

Com relação ao modo-2, o modelo do ECMWF apresenta maiores valores de CT do que o modelo do CPTEC nas quatro semanas de validade de previsão. Especificamente para a quarta semana de previsão, ambos os modelos apresentam os maiores valores de CT para o modo-2 (CCPTEC= 0.25 e CECMWF=0.33). Isso pode ser uma explicação para o fato dos MCGAs avaliados apresentarem os maiores valores de correlação (Figura 4.2) sobre a região equatorial da América do Sul e Oceano Atlântico adjacente na semana-4. Com relação ao modo-3, o modelo do CPTEC apresenta os menores valores de CT (CCPTEC) em comparação aos demais modos (exceto para a semana-2, onde o

valor de CCPTEC é menor no modo-2). O modelo do ECMWF apresenta valores de CECMWF para o modo-3 em torno dos valores de CECMWF para o modo-2.

Figura 5.18 - Séries temporais dos três primeiros modos das FOEs para os dados do GPCP e para as previsões do CPTEC ECMWF nas quatro semanas de previsão.



As séries temporais dos três primeiros modos das FOEs (linhas) para os dados do GPCP e para as previsões retrospectivas nas quatro semanas de previsão (colunas) foram computadas por meio da análise de FOEs. As linhas cinza indicam as séries temporais encontradas com as anomalias semanais do GPCP. As linhas pretas (vermelhas) indicam as séries temporais encontradas com a média do conjunto (11 membros) do modelo do CPTEC (ECMWF). Os valores de CCPTEC (CECMWF) representam as correlações temporais entre as séries temporais do GPCP e CPTEC (ECMWF) para cada modo e semana de previsão.

Fonte: Produção do autor.

Embora os modelos do CPTEC e do ECMWF representem melhor a estrutura espacial do modo-1 do que as estruturas espaciais dos modos-2 e 3 (Figura 5.17), de modo geral, ambos os modelos conseguem reproduzir de maneira satisfatória as estruturas espaciais desses três modos nas quatro semanas de previsão. Além disso, as estruturas espaciais dos três modos encontradas nos dois modelos não variam com relação ao prazo de validade da previsão. Essa característica é mais clara no modo-1 (i.e., padrão de dipolo sobre a América do Sul), onde os modelos do CPTEC e ECMWF apresentam valores de correlação espacial (CE) com relação ao GPCP em torno de 0.70 em todos os prazos de validade de previsão. Por outro lado, como esperado, os valores de correlação entre as séries temporais dos modelos e a série temporal do GPCP (CT) são maiores para

previsões com prazo de previsão mais curto (e.g., CCPTEC=0.87 na semana-1 e CCPTEC=0.21 na semana-4 para o modo-1). Ou seja, embora os modelos do CPTEC e ECMWF represente consistentemente a estrutura espacial desses três modos nas quatro semanas de previsão, a habilidade desses modelos em prever a ocorrência dessas variabilidades depende do prazo de validade da previsão. Isso ocorre porque os MCGAs perdem a capacidade de representar as variações de frequência relativamente mais altas com o aumento do prazo de validade da previsão. Isso é notado, principalmente, nas semanas-3 e 4 do modo-2 na Figura 5.18 (duas últimas colunas da segunda linha), onde ambos os modelos acompanham a oscilação de baixa frequência observada no final das séries temporais do GPCP (linhas cinza) associada aos eventos de El-Niño e La-Niña, os quais ocorreram durante os verões estendidos de 2009/2010 e 2010/2011, respectivamente. Dessa forma, a habilidade preditiva dos modelos do CPTEC e ECMWF em representar as variações na precipitação sub-sazonal associadas ao modo-2 com três a quatro semanas de antecedência está associada com as manifestações de mais baixa frequência desse modo.

Com relação ao modo-1, os modelos do CPTEC e ECMWF apresentam valores altos de CT nas duas primeiras semanas de previsão (gráficos das duas primeiras colunas da primeira linha na Figura 5.18), dado que ambos conseguem reproduzir as variabilidades intrassazonais (10-30 e 30-90 dias) e baixa frequência (>120 dias) do padrão de dipolo sobre a América do Sul devido à previsibilidade oriunda das condições iniciais da atmosfera. Entretanto, na semana-3, o modelo do CPTEC apresenta valor de CT menor do que o valor de CT do ECMWF (CCPTEC=0.40 e CECMWF=0.58), porque a habilidade em representar as variabilidades intrassazonais (e.g., Figura 4.12) diminui de forma mais intensa no modelo do CPTEC do que no modelo do ECMWF. Dessa forma, o modelo do CPTEC apresenta maior dificuldade em representar as variabilidades intrassazonais do padrão de dipolo sobre a América do Sul na semana-3 do que o modelo do ECMWF. Isso pode estar ligado à falta de acoplamento atmosfera-oceano no modelo do CPTEC. Além disso, como o padrão de dipolo apresenta estruturas de teleconexão trópico-extratropical, a resolução espacial relativamente baixa do modelo do CPTEC também pode ser um dos motivos para esse resultado.

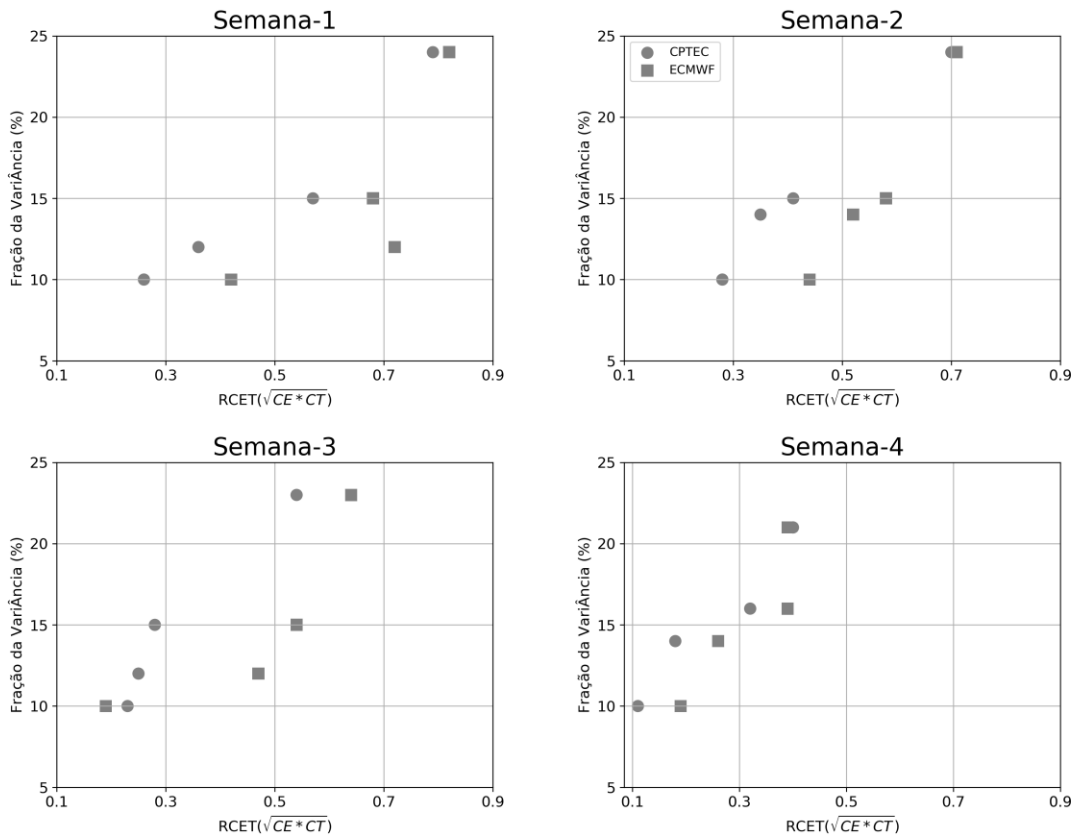
Uma informação da Figura 5.18 que merece ser destacada é que o valor de CT do modelo do ECMWF na terceira semana de previsão (CECMWF=0.58) é maior do que o

valor de CT entre as séries de FOE1 total e FOE1 120 (0.49 – ver Tabela 5.1). Esse último valor mostra o valor de CT de um modelo hipotético, o qual consegue reproduzir perfeitamente a variabilidade interanual do padrão de dipolo. Dessa forma, podemos concluir que o modelo do ECMWF apresenta habilidade preditiva associada às oscilações intrassazonais (10-30 e 30-90), além da habilidade preditiva oriunda da variabilidade de baixa frequência (interanual), para as previsões das anomalias semanais de precipitação sobre a América do Sul com três semanas de antecedência. Entretanto, o valor de CT do modelo do CPTEC (CCPTEC=0.40) é menor que 0.49. Isso sugere que a habilidade preditiva do modelo do CPTEC está associada, em grande parte, com a variabilidade de baixa frequência. Contudo, o fato do modelo do CPTEC apresentar valores de CT próximos ao do ECMWF nas duas primeiras semanas de previsão sugere que melhorias relacionadas ao aumento da resolução espacial e a inclusão do acoplamento com o componente oceânico podem contribuir para que o modelo do CPTEC apresente habilidade preditiva associada não apenas com a variabilidade de baixa frequência. Na quarta semana de previsão, ambos os modelos apresentam valores similares de CT, em torno de 0.2, devido à ineficiência desses modelos em representar os eventos de dipolo sobre a América do Sul que não são influenciados pela variabilidade interanual. Isso sugere que melhorias nos MCGAs, além do aumento da resolução espacial e do acoplamento com o componente oceânico, são necessárias para que os MCGAs possam apresentar fontes de habilidade preditiva além da variabilidade intrassazonal.

Segundo Lee et al. (2011), os modos previsíveis podem ser determinados por dois critérios. No primeiro, tais modos devem representar uma grande parte da variabilidade total dos dados. No segundo, um determinado MCGA deve ser capaz de representar a estrutura espaço-temporal desses modos, cuja habilidade preditiva é medida pela raiz quadrada do produto entre o CE e CT (RCET) (Eq. 2.8). Para analisar se os três modos estudados (padrão de dipolo, FOE2 e tripolo), mais o quarto modo (o qual não foi analisado) podem ser considerados como modos previsíveis para a escala sub-sazonal, a Figura 5.19 mostra o diagrama de dispersão entre a porcentagem da variância explicada por cada modo (determinadas por meio do dado do GPCP), no eixo y, e o valor de RCET dos modelos do CPTEC (círculo cinza) e do ECMWF (quadrado cinza), no eixo x, para cada modo e para as quatro semanas de previsão. A ordem dos modos na Figura

5.19 é dada pela posição da variância representada de forma decrescente. Ou seja, o primeiro modo representa a maior porção da variância dos dados, a qual diminui com o aumento do número do modo da FOE.

Figura 5.19 – Diagrama de dispersão.



O diagrama de dispersão é dado pelos valores da variância explicada (eixo y) por cada um dos quatro primeiros modos das anomalias semanais do GPCP e os valores de RCET (eixo x) para o modelo do CPTEC (círculos) e ECMWF (quadrados) para as quatro semanas de previsão analisadas.

Fonte: Produção do autor.

Em geral, os valores de RCET (Figura 5.19) são maiores para os modos que representam a maior parte da variância em ambos os modelos. A porcentagem da variância explicada por cada modo (encontrada com as anomalias semanais do GPCP) não apresenta forte variação com prazo de validade de previsão. Por outro lado, os valores de RCET diminuem com o aumento do prazo de validade da previsão devido, principalmente, ao comportamento dos valores de CT discutidos na Figura 5.18. No mesmo sentido, os valores de RCET dos modelos do CPTEC e ECMWF são similares nas semanas-1, 2 e 4 para o modo-1. Com relação aos demais modos, os valores de

RCET do modelo do ECMWF são maiores do que os valores de RCET do modelo do CPTEC. Dessa forma, como o segundo critério definido por Lee et al. (2011) leva em conta a habilidade preditiva dos MCGAs, a definição dos modos previsíveis varia com relação ao tempo de previsão e modelo utilizado. Com essas características em mente, pode-se destacar que os modos-1 e 2 são os que contribuem em maior parte para a habilidade dos modelos do CPTEC e do ECMWF sobre a América do Sul durante as semanas-3 e 4 de previsão, devidos aos altos valores de RCET e da fração da variância desses modos. Por conta disso, os modelos avaliados no Capítulo-4 apresentam os maiores valores de correlação sobre as regiões que estão sob a influência desses dois modos (i.e., regiões de manifestação do padrão de dipolo e região equatorial da América do Sul). Uma característica importante é que nas semanas-1 e 2, os modelos do CPTEC e do ECMWF apresentam praticamente os mesmos valores de RCET para o modo-1, diferentemente dos modos-2 e 3, onde os valores de RCET são maiores para o modelo do ECMWF. Entretanto, os valores de correlação na região do dipolo sobre a América do Sul notados na Figura 4.2 são maiores para o modelo do ECMWF do que para o modelo do CPTEC. Isso sugere que a representação dos modos-2 e 3 também influencia na habilidade preditiva sobre a região do dipolo, dado que esses modos também apresentam sinais sobre a região leste da América do Sul tropical.

5.3.3 Novo produto de previsão sub-sazonal para a América do Sul

Como destacado anteriormente, a fase positiva do padrão de dipolo sobre a América do Sul é associada, em grande parte, com a presença da ZCAS (NOGUÉS-PAEGLE; MO, 1997; LIEBMANN et al., 1999; GONZALEZ; VERA, 2014), a qual é o mecanismo de precipitação do sistema de monção da América do Sul. Por outro lado, a fase negativa pode causar eventos conhecidos como período inativo de precipitação do sistema de monção da América do Sul (NOGUÉS-PAEGLE; MO, 1997; MUZA et al. 2009; BOERS et al., 2014), os quais podem gerar eventos de escassez de precipitação nas regiões sob o domínio do regime de monção quando ocorrem com elevada frequência e intensidade (e.g., verões de 2000/2001 e 2013/2014). Portanto, a variabilidade do padrão de dipolo exerce papel importante na qualidade da estação chuvosa sobre a América do Sul, influenciando atividades socioeconômicas dessa região. Dado a importância do padrão de dipolo, é encorajador o fato desse modo de variabilidade, o qual é o mais dominante, apresentar destreza de previsão elevada na escala sub-sazonal

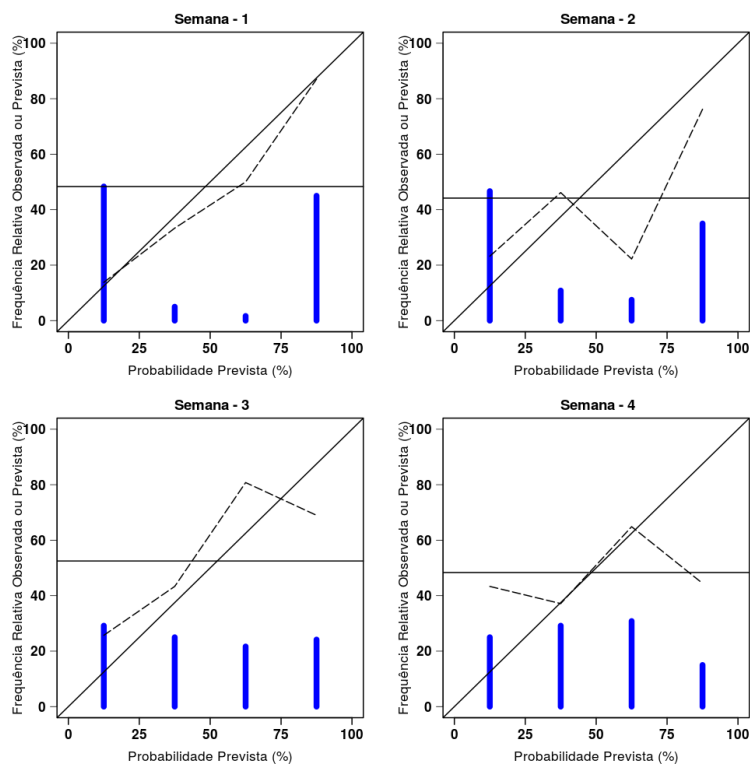
(Figura 5.19). Além disso, destaca-se também o fato dos índices de destreza apresentarem maiores valores para a previsão do padrão de dipolo do que os índices de destreza para a previsão das anomalias semanais de precipitação nas regiões sob a influência desse modo. Em outras palavras, os modelos do CPTEC e do ECMWF apresentam maior habilidade preditiva para prever o padrão de dipolo do que para prever as anomalias semanais da precipitação em cada ponto de grade influenciado pelo padrão de dipolo. Por exemplo, para a terceira semana de previsão, os valores de CT associado ao modo de variabilidade que representa o padrão de dipolo são da ordem de 0.5 ($CCPTEC=0.40$ e $CECMWF=0.58$, ver Figura 5.8), enquanto que os valores de correlação das anomalias semanais de precipitação encontrados sobre grande parte do leste da América do Sul tropical são da ordem de 0.2-0.4. Dessa forma, desenvolver um produto para o prognóstico do padrão de dipolo pode ser de grande valor para centros de previsão operacionais como o CPTEC.

Até o presente momento, o padrão de dipolo sobre a América do Sul foi determinado com os dados do GPCP para o dado de referência e com a média do conjunto (11 membros) para os modelos do CPTEC e ECMWF por meio da análise de FOEs. Entretanto, para a previsão do padrão de dipolo na escala sub-sazonal, visando também uma perspectiva probabilística, é necessário determinar a previsão do padrão de dipolo para cada membro do conjunto de forma separada. Para isso, as previsões das anomalias semanais de precipitação para a região da América do Sul e oceanos adjacentes ($23^{\circ}N-37^{\circ}S$ e $100^{\circ}W-20^{\circ}W$) de cada membro foram projetadas no padrão espacial do modo-1 (padrão de dipolo), encontrado com o dado do GPCP para a semana-1 (Figura 5.2a), para as quatro semanas de previsão. Dessa forma, a série temporal do modo-1 é construída para cada membro. Esse procedimento foi realizado apenas para o modelo do CPTEC, dado que a intenção aqui é mostrar o quão a previsão do padrão do dipolo é mais hábil que a previsão das anomalias semanais de precipitação. Após obter a série temporal de cada membro, foi possível calcular as métricas de avaliação para as previsões probabilísticas do padrão de dipolo do modelo do CPTEC. Antes de mostrar esses resultados, é importante destacar que os valores de correlação para as quatro semanas de previsão entre as séries temporais da média do conjunto (11 membros) - construídas com a projeção das previsões de cada membro no FOE1 do GPCP - e as

séries temporais do GPCP (linhas cinza na Figura 5.18) são similares aos valores de CCPTEC encontrados na Figura 5.18.

A Figura 5.20 mostra o diagrama de confiabilidade para as previsões probabilísticas do evento da série temporal do modo-1 maior do que 0 (ou seja, previsões de probabilidade de ocorrência do índice representativo da série temporal do modo do dipolo com valor positivo) para as quatro semanas de previsão. Os diagramas de confiabilidade foram construídos utilizando 4 intervalos de probabilidade (0-25%, 25-50%, 50-75% e 75-100%) para cada prazo de validade de previsão.

Figura 5.20 – Diagrama de confiabilidade do modelo do CPTEC para as previsões retrospectivas do índice representativo do padrão de dipolo.



O diagrama de confiabilidade foi computado para as previsões probabilísticas do evento valor positivo do índice representativo do padrão de dipolo (i.e., índice > 0). As previsões foram realizadas para os 11 membros do conjunto do modelo do CPTEC para as quatro semanas de previsão. As previsões compreendem o mesmo período das avaliações do Capítulo-4.

Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.20, nota-se que as previsões probabilísticas são confiáveis (linha tracejada próxima da linha contínua na diagonal do diagrama) nas quatro semanas de previsão, exceto para as previsões com intervalos de 50-75% na semana-2 e para as previsões

com intervalos de 0-25% e 75-100% na semana-4. Os histogramas das previsões probabilísticas (barras azuis no diagrama de confiabilidade) apresentam um formato de “u”, ou seja, maior frequência para as probabilidades com maior distinção (0-25% e 75-100%), nas duas primeiras semanas de previsão e uma forma de platô nas duas últimas semanas de previsão (i.e., frequência de ocorrência semelhante entre as probabilidades de previsão). Ao comparar as características encontradas na Figura 5.20 com a primeira linha da Figura 4. 8 (diagrama de confiabilidade do modelo do CPTEC computado sobre a região 0-30°S e 55°W-35°W da América do Sul) é notado que os atributos do diagrama de confiabilidade são mais intensos para a previsão do padrão de dipolo. Isso é evidenciado também ao comparar os valores da AROC do modelo do CPTEC computados para a previsão probabilística do padrão de dipolo, os quais são iguais a 0.90 na semana-1, 0.79 na semana-2, 0.73 na semana-3 e 0.57 na semana-4; com os valores de AROC computados para as anomalias de precipitação sobre a mesma região da Figura 4. 8, os quais são iguais a 0.76 na semana-1, 0.67 na semana-2, 0.61 na semana-3 e 0.57 na semana-4 (linha preta na Figura 4. 6b). Dessa forma, um produto que englobe o prognóstico do padrão de dipolo apresenta potencial para agregar valor nas previsões sub-sazonais sobre a América do Sul dado que as métricas apresentam índices de destreza melhores para a previsão probabilística do padrão de dipolo do que para a previsão probabilística das anomalias semanais de precipitação, assim como evidenciado na Seção 5.3.2 para as previsões determinísticas.

5.4 Sumário

Os modos dominantes de variabilidade espaço-temporal das anomalias semanais de precipitação sobre a América do Sul (padrão de dipolo, FOE2 e padrão de tripolo) foram determinados. As estruturas espaciais desses três modos coincidem com o padrão espacial da habilidade preditiva dos MCGAs encontrado no Capítulo-4 (e.g., Figura 4. 2). Essa característica é mais evidenciada com respeito aos padrões de dipolo e de FOE2. Dessa forma, as relações desses dois modos com fenômenos atmosféricos/oceânicos foram investigadas.

O padrão de dipolo sobre a América do Sul aparece como o primeiro modo na análise das FOEs (i.e., o modo dominante de variabilidade espaço-temporal). Como destacado por Paegle e Mo (2000) e, mais recentemente, por Gonzalez e Vera (2014), o padrão de

dipolo sobre a América do Sul pode ser gerado por distintos mecanismos dinâmicos na escala intrassazonal relacionados com teleconexões trópico-trópico e trópico-extratropical. O padrão de teleconexão trópico-trópico tem sido relacionado à propagação da OMJ, o qual pode atuar na formação do dipolo com sinal positivo (negativo) quando se encontra nas fases 8/1 (4/5). Embora a OMJ apresente pico de variabilidade entre 30-60 dias, a maior parte dos trabalhos estudam o papel dessa oscilação na modulação do padrão de dipolo na banda temporal de 30-90 dias. O padrão de teleconexão trópico-extratropical pode ser responsável pela formação do dipolo com sinal positivo (negativo) a partir de condições favoráveis para o desenvolvimento de episódios de ZCAS (anti-ZCAS). A teleconexão trópico-extratropical ocorre, principalmente, na banda de 10-30 dias. Contudo, eventos do padrão de dipolo dentro da banda de 30-90 dias podem ser modulados por teleconexões trópico-extratropical. Além dessas oscilações dentro do espectro de variabilidade intrassazonal, observa-se a influência da variabilidade interanual no padrão de dipolo sobre a América do Sul (NOGUÉS-PAEGLE; MO, 1997; DRUMOND; AMBRIZZI, 2006; DE LIMA et al., 2018). Em geral, o padrão de dipolo é influenciado pelo ENOS, com sinal positivo (e.g., ZCAS) ocorrendo com mais frequência durante a fase fria do ENOS (La-Niña) e o padrão de dipolo negativo (e.g., anti-ZCAS) ocorrendo mais frequentemente na fase quente do ENOS (El-Niño). Entretanto, é possível observar a influência da variabilidade interanual no padrão de dipolo sem a presença de eventos clássicos de ENOS, como, por exemplo, no evento extremo de déficit de precipitação no regime de monção da América do Sul no verão de 2000/2001, devido à predominância do padrão de dipolo com sinal negativo.

Desse modo, não é possível atribuir a formação do principal modo de variabilidade espaço-temporal das anomalias semanais de precipitação sobre a América do Sul a apenas um determinado fenômeno atmosférico/oceânico, o qual seria, nesse caso, a principal fonte de previsibilidade sub-sazonal de precipitação sobre essa região. Ou seja, o padrão de dipolo é formado devido à influência de vários fenômenos oscilatórios, os quais podem atuar construtiva e destrutivamente e, até mesmo, em escala temporais diferentes (interação entre escalas). Essa característica pode ser uma possível explicação para os resultados encontrados por Klingaman et al. (2020), os quais mostraram que as previsões sub-sazonais inicializadas durante eventos intensos da OMJ apresentam

habilidade preditiva semelhante às previsões inicializadas durante eventos inativos da OMJ. Esta constatação pode também ajudar a compreender o fato de que o padrão de habilidade preditiva dos modelos do S2S permanece apresentando características do padrão de dipolo sobre a América do Sul após a remoção dos padrões de teleconexão do ENOS e OMJ, assim como realizada por de Andrade et al. (2019).

O modo-2 (padrão FOE2) apresenta, principalmente, sinais de anomalias semanais de precipitação sobre a região equatorial da América do Sul. O padrão FOE2 apresenta relação com a atividade convectiva anômala sobre o Oceano Pacífico Oeste tropical. Anomalias negativas (positivas) de ROL sobre essa região provocam a formação de dois ciclones (anticiclones) em altos níveis latitudinalmente simétricos sobre o Oceano Atlântico Tropical. A formação desses ciclones (anticiclones) gera um padrão de convergência (divergência) da circulação sobre a região equatorial da América do Sul. Dessa forma, a precipitação/convecção é inibida (intensificada) sobre a região equatorial da América do Sul, formando o padrão FOE2 com sinal positivo (negativo). As anomalias da atividade convectiva sobre o Oceano Pacífico Oeste que geram o padrão FOE2 estão associadas, principalmente, com os eventos de ENOS. Entretanto, outros fenômenos que influenciam a atividade convectiva sobre o Oceano Pacífico Oeste (e.g., OMJ) podem excitar a formação do padrão FOE2 sobre a América do Sul.

O modo-1 (padrão de dipolo sobre a América do Sul) é o modo que mais contribui para a habilidade preditiva dos MCGAs até a semana-3 de previsão. Por conta disso, as regiões sob a influência do padrão de dipolo são as que os modelos apresentam a maior habilidade preditiva sobre a América do Sul, como visto no Capítulo-4. A contribuição dos modos-2 e 3 para a habilidade preditiva depende do modelo avaliado. Os índices de avaliação mostram que o modelo do CPTEC apresenta uma capacidade menor em representar os padrões espaciais e as séries temporais desses dois modos do que o modelo do ECMWF. Entretanto, o modo FOE2 é o que mais contribui para a habilidade preditiva, tanto para o modelo do CPTEC quanto para o modelo do ECMWF, para a semana-4 de previsão. Isso pode ser uma possível explicação para o fato de que, em geral, a habilidade preditiva dos MCGAS é limitada a região equatorial da América do Sul na quarta semana de previsão (Capítulo-4).

Por último, dada a alta habilidade preditiva do modelo do CPTEC em prever a formação do padrão de dipolo sobre a América do Sul, um produto que explore os benefícios das previsões determinísticas e probabilísticas da formação desse padrão é sugerido neste trabalho. Para esses dois tipos de prognósticos, os índices de habilidade preditiva do modelo do CPTEC são maiores do que os índices de habilidade preditiva para as previsões das anomalias semanais da precipitação sobre as regiões que são influenciadas pelo padrão de dipolo. Dessa forma, esse produto tem o potencial de agregar mais valor para as previsões sub-sazonais de precipitação na América do Sul.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O presente trabalho de tese, dividido em três partes, contemplou um estudo da configuração e avaliação do BAM-1.2 (modelo atmosférico global do CPTEC) para a produção de prognósticos sub-sazonais, assim como uma investigação das principais fontes de previsibilidade na escala sub-sazonal sobre a América do Sul. Na primeira parte, sete configurações do BAM-1.2 (em termos de resolução vertical, inicializações da atmosfera e da superfície, e processos físicos parametrizados associados com a convecção profunda e camada limite planetária) foram avaliadas para determinar qual configuração apresenta o melhor desempenho para o prognóstico sub-sazonal. Na segunda parte do trabalho, a habilidade preditiva do modelo do CPTEC na escala sub-sazonal em relação a quatro modelos do projeto S2S foi examinada. Isso foi realizado a partir de métricas de avaliação das previsões sub-sazonais determinísticas e probabilísticas. A terceira parte do trabalho apresentou uma análise dos fenômenos atmosféricos/ocêânicos (fontes de previsibilidade) responsáveis por modular os modos dominantes de variabilidade espaço-temporal das anomalias semanais de precipitação sobre a América do Sul, os quais estão associados ao padrão de habilidade preditiva dos MCGAs. Além disso, foi realizada uma avaliação da capacidade dos modelos do CPTEC e ECMWF em representar esses modos de variabilidade.

A partir das três etapas destacadas acima, foi possível responder às duas questões centrais desta tese:

- 1) Qual é o desempenho do modelo global do CPTEC (BAM-1.2) na escala sub-sazonal (prognósticos da OMJ, das anomalias semanais da precipitação e T2M e das anomalias quinzenais e mensais da precipitação) comparado ao desempenho dos modelos de outros centros de meteorologia (incluindo o modelo do ECMWF)?
- 2) Quais são as principais fontes de previsibilidade para a previsão sub-sazonal da precipitação sobre a América do Sul?

Com respeito à primeira questão, os resultados mostraram que o modelo do CPTEC apresentou um padrão espacial global de habilidade preditiva semelhante ao padrão dos modelos do JMA, ECCC, ECMWF e BoM para a previsão sub-sazonal da precipitação. De modo geral, todos os modelos apresentaram índices de destreza (correlação linear e

REQM) satisfatórios nas duas primeiras semanas de previsão. Entretanto, a habilidade preditiva dos modelos avaliados diminui de forma intensa com o aumento do prazo de previsão. Por conta disso, a habilidade preditiva dos modelos é restrita às regiões tropicais para previsões com prazo mais longo (semanas-3 e 4). Essa característica também foi notada em outros trabalhos (LI; ROBERTSON, 2015; DE ANDRADE et al., 2019). Embora o padrão de habilidade preditiva seja semelhante entre os modelos avaliados, os valores de correlação e REQM variam entre os modelos avaliados. Em geral, o modelo do ECMWF apresentou os melhores índices de destreza para a previsão sub-sazonal da precipitação. Além das características como alta resolução espacial e acoplamento atmosfera-oceano, o melhor desempenho do modelo do ECMWF pode ser atribuído principalmente ao constante aprimoramento das parametrizações físicas (VITART, 2014; WHEELER et al., 2017; VITART, 2017).

O modelo do CPTEC apresentou desempenho satisfatório, com habilidade preditiva similar a habilidade preditiva dos modelos do JMA, ECCC e BoM para a previsão sub-sazonal da precipitação. Por exemplo, assim como os modelos do JMA, ECCC e ECMWF, o modelo do CPTEC mostrou valores de correlação positivos sobre a região leste da América do Sul, região influenciada pelo padrão de dipolo meridional de precipitação/convecção (CASARIN; KOUSKY, 1986), para previsões com prazo de validade de até três semanas. Comparando o modelo do CPTEC com os modelos do ECCC e do JMA (modelos que não apresentam acoplamento com o oceano), o modelo do CPTEC apresentou índices de destreza ligeiramente menores do que os modelos do JMA e ECCC nas duas primeiras semanas de previsão. Entretanto, essa característica foi alterada nas duas últimas semanas de previsão (semanas-3 e 4), dado que o modelo do CPTEC apresentou índices de destreza mais elevados do que o modelo do ECCC e praticamente o mesmo nível de destreza que o modelo do JMA. Esse resultado sugere um possível impacto da resolução espacial na habilidade preditiva dos MCGAs para previsões sub-sazonais com prazo de entrega mais curto, dado que os modelos do JMA e ECCC apresentam maior resolução espacial do que o modelo do CPTEC. No geral, o modelo do CPTEC apresenta índices de destreza superiores aos índices de destreza do modelo do BoM nas quatro semanas de previsão avaliadas. Entretanto, a diferença na habilidade preditiva desses dois modelos diminui nas duas últimas semanas de previsão. Isso sugere uma possível influência do acoplamento atmosfera-oceano na habilidade

preditiva, dado que, diferentemente do modelo do CPTEC, o modelo do BoM apresenta essa característica. Portanto, habilidade preditiva da previsão sub-sazonal do CPTEC pode ser aprimorada com o incremento na resolução espacial do BAM-1.2, acoplamento com o componente oceânico e melhorias nos esquemas de parametrizações físicas e de geração dos membros para inicialização do modelo.

No que diz respeito à habilidade preditiva para o prognóstico da OMJ, o modelo do CPTEC se mostrou competitivo aos demais modelos avaliados. O modelo do CPTEC alcançou o prazo de validade de previsão útil em torno de 19-20 dias, definido pelo tempo entre a data de inicialização da previsão até a data de validade da previsão em que o índice de correlação bivariada (EQMB) cruza o limiar de 0.5 (2.0). Esse prazo foi alcançado em prazos de previsão semelhantes na avaliação dos modelos do JMA, ECCC e BoM. No entanto, esse nível de desempenho é consideravelmente distante do ECMWF, que ultrapassou o limiar acima mencionado em torno de 33 dias de previsão.

Com relação à segunda questão abordada nesta tese, o padrão de dipolo, o modo-2 e o padrão de tripolo foram os principais modos de variabilidade espaço-temporal identificados nas anomalias semanais de precipitação sobre a América do Sul, sendo o padrão de dipolo o modo dominante. Assim como destacado em trabalhos anteriores, por exemplo, Gonzalez e Vera (2014), foi identificado que o padrão de dipolo sobre a América do Sul é modulado por distintos mecanismos dinâmicos, os quais influenciam a variabilidade desse padrão nas bandas de 10-30 dias, 30-90 dias e de frequência mais baixa, associada a variabilidade interanual. Dessa maneira, não é possível determinar a influência de apenas um determinado fenômeno atmosférico/oceânico, o qual seria a principal fonte de previsibilidade na escala sub-sazonal sobre a América do Sul, na formação do padrão de dipolo. Esta talvez seja uma possível explicação para os resultados encontrados por Klingaman et al. (2020), os quais mostraram que as previsões sub-sazonais inicializadas durante eventos intensos da OMJ apresentam habilidade preditiva semelhante às previsões inicializadas durante eventos inativos da OMJ. Esta constatação pode também ajudar a compreender o fato de que o padrão de habilidade preditiva dos modelos do S2S sobre a América do Sul, assim como realizada por de Andrade et al. (2019), permanece apresentando características do padrão de dipolo sobre a América do Sul após a remoção dos padrões de teleconexão do ENOS e OMJ.

O modo-2 parece contribuir para a habilidade preditiva sobre a região equatorial da América do Sul. Essa região é a única que apresenta valores expressivos de correlação até a quarta semana de previsão na maioria dos modelos avaliados, incluindo o BAM-1.2. O modo-2 apresenta uma relação inversa com a atividade convectiva sobre o Oceano Pacífico Oeste. A convecção anômala sobre essa região é responsável por alterar o padrão de circulação sobre o Oceano Atlântico tropical e sobre a região equatorial da América do Sul por meio de teleconexões trópico-extratropic-tropic. As anomalias da atividade convectiva sobre o Oceano Pacífico Oeste que geram o padrão FOE2 estão associadas, principalmente, com os eventos de ENOS. Entretanto, outros fenômenos que influenciam a atividade convectiva sobre o Oceano Pacífico Oeste podem excitar a formação desse padrão sobre a América do Sul, como, por exemplo, a OMJ.

A contribuição dos três modos de variabilidade espaço-temporal (padrão de dipolo, o modo-2 e o padrão de tripolo) para a habilidade preditiva dos MCGAs analisados depende do modelo e do prazo de validade da previsão avaliados. O padrão de dipolo sobre a América do Sul é o modo que mais contribui para a habilidade preditiva dos MCGAs até a semana-3 de previsão. Por conta disso, as regiões sob a influência desse modo são as que os MCGAs apresentam a maior habilidade preditiva sobre a América do Sul. Entretanto, o modo-2 é o que mais contribui para a habilidade preditiva na quarta semana de previsão, tanto para o modelo do CPTEC quanto para o modelo do ECMWF. Por esta razão, em geral, a habilidade preditiva dos MCGAs é limitada a região equatorial da América do Sul na quarta semana de previsão. Os modelos do CPTEC e ECMWF apresentam o mesmo grau de destreza (espaço-temporal) na representação do padrão de dipolo, exceto na terceira semana de previsão, onde o modelo do ECMWF apresenta desempenho melhor do que o modelo do CPTEC. Para a semana-3, o índice de destreza para a previsão do padrão de dipolo do modelo do ECMWF ultrapassa a contribuição da variabilidade interanual para a formação desse padrão. Esse resultado mostra que o modelo do ECMWF é capaz de representar as variações intrassazonais, além da variabilidade interanual, para a formação do padrão de dipolo com três semanas de antecedência. Esta é uma característica importante, dado que alguns trabalhos destacam que a habilidade preditiva dos MCGAs na escala sub-sazonal é limitada apenas a variabilidade de baixa frequência para o prognóstico a partir

de três semanas (PEGION et al., 2019; SCHRECK et al., 2020). Com relação ao modo-2 e ao padrão de tripolo, os índices de avaliação mostram que o modelo do CPTEC apresenta uma menor capacidade em representar esses dois modos de variabilidade espaço-temporal sobre a América do Sul do que o modelo do ECMWF nas quatro semanas de previsão.

Por último, uma alternativa para o aprimoramento da habilidade das previsões sub-sazonais foi sugerida. De modo geral, os modelos do CPTEC e do ECMWF mostram ser mais hábeis em prever a ocorrência do padrão de dipolo sobre a América do Sul do que prever as anomalias semanais de precipitação sobre o leste da América do Sul tropical. Este é um resultado interessante, dado que o padrão de dipolo sobre a América do Sul é responsável por variações importantes na precipitação do sistema de monção da América do Sul (GAN et al., 2004; VERA et al., 2006; MUZA et al., 2009; BOERS et al., 2014). Dessa maneira, um produto que explore a previsão determinística e probabilística da formação do padrão de dipolo pode vir a agregar informações mais acuradas para a previsão sub-sazonal da precipitação sobre a América do Sul.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Alguns aspectos relativos à investigação da habilidade preditiva do modelo do CPTEC (BAM-1.2) e da investigação das fontes de previsibilidade das condições meteorológicas na escala sub-sazonal sobre a América do Sul não puderam ser estudados durante o desenvolvimento do presente trabalho e, portanto, são sugeridos para serem abordados em trabalhos futuros. Entre eles, destacam-se:

- Realizar testes de sensibilidade com o BAM-1.2 a partir de diferentes esquemas de parametrizações de radiação de onda longa e de onda curta e estudar o impacto na habilidade preditiva das previsões produzidas;
- Avaliar o impacto do aumento da resolução espacial (horizontal e vertical, além dos testes realizados no presente trabalho para a resolução vertical) na habilidade preditiva do BAM-1.2;
- Explorar as causas do não incremento da habilidade preditiva do BAM-1.2 com inicialização da umidade do solo na escala sub-sazonal (e.g., efeito do *spinup*);

- Investigar a habilidade preditiva da versão do modelo BAM-1.2 acoplada ao modelo de camada de mistura oceânico *multi-Column K Profile Parameterization* (MC-KPP) (Hirons et al., 2015);
- Analisar a habilidade preditiva da versão BAM-2.1, a qual apresenta o desenvolvimento da coordena vertical híbrida;
- Definir o papel do padrão de dipolo sobre a América do Sul para as previsões das anomalias quinzenais e mensais de precipitação;
- Determinar os sistemas atmosféricos/oceânicos responsáveis pela variabilidade no padrão de dipolo sobre a América do Sul na banda de 10-30 dias a partir de técnicas alternativas (e.g., análise de FOEs multivariadas e *machine learning*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, M. S. et al. Assessment of ECMWF subseasonal temperature predictions for an anomalously cold week followed by an anomalously warm week in central and Southeastern South America during July 2017. **Weather and Forecasting**, v. 35, n. 5, p. 1871–1889, 2020.
- ARAKAWA, A.; SCHUBERT, W. H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, part I. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 3, p. 674–701, abr. 1974.
- BLACK, J. et al. The predictors and forecast skill of Northern Hemisphere teleconnection patterns for lead times of 3-4 weeks. **Monthly Weather Review**, v. 145, n. 7, p. 2855–2877, 2017.
- BOERS, N. et al. The South American rainfall dipole: a complex network analysis of extreme events. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 20, p. 7397–7405, 2014.
- BOYLE, J. S. et al. The parametric sensitivity of CAM5's MJO. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, n. 4, p. 1424–1444, 27 fev. 2015.
- BRETHERTON, C. S.; PARK, S. A new moist turbulence parameterization in the community atmosphere model. **Journal of Climate**, v. 22, n. 12, p. 3422–3448, 2009.
- CARVALHO, L. M. V et al. Moisture transport and intraseasonal variability in the South America monsoon system. **Climate Dynamics**, v.36, p. 1865–1880, 2011.
- CASARIN, D.P.; KOUSKY, V.E. Anomalias de precipitação no sul do Brasil e variações na circulação atmosférica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 1, n. 2, p. 83-90, 1986.
- CUNNINGHAM, C. A.; CAVALCANTI, I. F. Intraseasonal modes of variability affecting the South Atlantic Convergence Zone. **International Journal of Climatology**, v. 26, n. 9, p. 1165–1180, jul. 2006.
- CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Drought in Brazil during summer and fall 2001 and associated atmospheric circulation features. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2001. (INPE-11894-PRE/7241).
- CHEN, M.; WANG, W.; KUMAR, A. Prediction of monthly-mean temperature: the roles of atmospheric and land initial conditions and sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 23, n. 3, p. 717–725, 2010.
- CHOU M.D; SUAREZ M.J; LIANG X.Z; YAN M.M; COTE C. **A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies**. Washigton: NASA, 2001. (NASA/TM-2001-104606).

CHOU M.D.; SUAREZ, M.J. **A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies**. Washigton: NASA, 1999. 40p. (NASA/TM-1999-104606).

COELHO, C. A. S. et al. Evaluation of climate simulations produced with the Brazilian global atmospheric model version 1.2. **Climate Dynamics**, n. 0123456789, 2020.

COELHO, C. A. S. et al. Forecast verification for S2S timescales. In: ROBERTSON, A. W.; VITART, F. (Ed.). **Sub-seasonal to seasonal prediction**. [S.l.]: Elsevier, 2019. p.337-361.

COELHO, C. A. S. et al. 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.; FIRPO, M. A. F.; DE ANDRADE, F. M. A verification framework for South American sub-seasonal precipitation predictions. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 27, n. 6, p. 503–520, 2018.

COHEN, A. E. et al. A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern U.S. cold season severe weather environments. **Weather and Forecasting**, v. 30, n. 3, p. 591–612, 2015.

CONNELLY, T. L. et al. Printing from here is disabled. **Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 118, n. 1, p. 1–13, 2019.

COUTINHO, M.M. **Previsão por conjuntos utilizando perturbações baseadas em componentes principais**. 1999. 136p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

COWAN, T. et al. Forecasting the extreme rainfall, low temperatures, and strong winds associated with the northern Queensland floods of February 2019. **Weather and Climate Extremes**, v. 26, p. 100232, 2019.

CUNNINGHAM, C.; BONATTI, J. P.; FERREIRA, M. Assessing improved CPTEC probabilistic forecasts on medium-range timescale. **Meteorological Applications**, v. 22, n. 3, p. 378–384, jul. 2015.

DE ALMEIDA, R. A. F. et al. Negative ocean-atmosphere feedback in the South Atlantic Convergence Zone. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 18, 2007.

DE ANDRADE, F. M.; COELHO, C. A. S.; CAVALCANTI, I. F. A. Global precipitation hindcast quality assessment of the Subseasonal to Seasonal (S2S) prediction project models. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 9–10, p. 5451–5475, 2019.

DE LIMA, A. A.; ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Sub-monthly variability of the South American summer precipitation under El Niño and La Niña backgrounds during

the 1998–2012 period. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 5, p. 2153–2166, 2018.

DEE, D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553–597, 2011.

DERBER, J.; BOUTTIER, F. A reformulation of the background error covariance in the ECMWF global data assimilation system. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 51, n. 2, p. 195–221, 1999.

DIRMEYER, P. A. et al. Land surface processes relevant to sub-seasonal to seasonal (S2S) prediction. In: ROBERTSON, A. W.; VITART, F. (Ed). **Sub-seasonal to Seasonal prediction**. [S.l.]: Elsevier, 2019. p.165-181.

DOMEISEN, D. I. V. et al. The role of the stratosphere in subseasonal to seasonal prediction: 2. predictability arising from stratosphere-troposphere coupling. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 2, p. 1–20, 2020.

DONG, S. et al. The most predictable patterns and prediction skills of subseasonal prediction of rainfall over the Indo-Pacific regions by the NCEP Climate Forecast System. **Climate Dynamics**, 2020.

DREWITT, G. et al. Effect of realistic soil moisture initialization on the Canadian CanCM3 seasonal forecast model. **Atmosphere-Ocean**, v. 50, n. 4, p. 466–474, 2012.

DRUMOND, A. R. M.; AMBRIZZI, T. Inter ENSO variability and its influence over the South American monsoon system. **Advances in Geosciences**, v. 6, p. 167–171, 2006.

DUCHON, C. E. Lanczos filtering in one and two dimensions. **Journal of Applied Meteorology**, v. 18, n. 8, p. 1016–1022, 1979.

FIGUEROA, S. N. et al. The Brazilian Global Atmospheric Model (BAM): performance for tropical rainfall forecasting and sensitivity to convective scheme and horizontal resolution. **Weather and Forecasting**, v. 31, n. 5, p. 1547–1572, 2016.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F. The South America Monsoon circulation and its relationship to rainfall over west-central Brazil. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 47–66, 2004.

GARREAUD, R. D.; WALLACE, J. M. The diurnal march of convective cloudiness over the Americas. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 12, p. 3157–3171, 1997.

GONZALEZ, P. L. M.; VERA, C. S. Summer precipitation variability over South America on long and short intraseasonal timescales. **Climate Dynamics**, v. 43, n. 7–8, p. 1993–2007, 20 out. 2014.

GOTTSCHALCK, J. et al. A framework for assessing operational Madden–Julian Oscillation forecasts. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 9, p. 1247–1258, 2010.

GREEN, B. W. et al. Evaluation of MJO predictive skill in multiphysics and multimodel global ensembles. **Monthly Weather Review**, v. 145, n. 7, p. 2555–2574, 2017.

GRELL, G. A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 3, p. 764–787, mar. 1993.

GRELL, G. A.; DÉVÉNYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 14, p. 10–13, 2002.

GRIMM, A. M. Madden–Julian Oscillation impacts on South American summer monsoon season: precipitation anomalies, extreme events, teleconnections, and role in the MJO cycle. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 1–2, p. 907–932, 2019.

GRIMM, A. M.; SILVA DIAS, P. L. Use of barotropic models in the study of the extratropical response to tropical heat sources. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 73, n. 4, p. 765–780, 1995.

GUIMARAES, B. D. S.; COELHO, C. A. D. S.; WOOLNOUGH, S. J.; KUBOTA, P. Y.; BASTARZ, C. F.; FIGUEROA, S. N.; BONATTI, J.P.; DE SOUZA, D. C. An inter-comparison performance assessment of a Brazilian global sub-seasonal prediction model against four Sub-seasonal to Seasonal (S2S) prediction project models. **Climate Dynamics**, 2021. Aceito.

GUIMARÃES, B. S. et al. Configuration and hindcast quality assessment of a Brazilian global sub-seasonal prediction system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, p. qj.3725, 2020.

HAN, J.; PAN, H. L. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP Global Forecast System. **Weather and Forecasting**, v. 26, n. 4, p. 520–533, 2011.

HANNACHI, A.; JOLLIFFE, I. T.; STEPHENSON, D. B. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 9, p. 1119–1152, 2007.

HERDIES, D. L. et al. Moisture budget of the bimodal pattern of the summer circulation over South America. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. 20, p. LBA 42-1-LBA 42-10, 2002.

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020.

- HIRONS, L. C.; KLINGAMAN, N. P.; WOOLNOUGH, S. J. MetUM-GOML1. A near-globally coupled atmosphere–ocean-mixed-layer model. **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 2, p. 363–379, 2015.
- HU, W. et al. Dominant patterns of winter-time intraseasonal surface air temperature over the CONUS in response to MJO convections. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 7–8, p. 3917–3936, 2019.
- HUDSON, D.; ALVES, O.; HENDON, H. H.; WANG, G. The impact of atmospheric initialisation on seasonal prediction of tropical Pacific SST. **Climate Dynamics**, v.36, p. 1155–1171, 2011b.
- HUDSON, D. et al. Bridging the gap between weather and seasonal forecasting: intraseasonal forecasting for Australia. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 673–689, 2011a.
- HUFFMAN, G. J. et al. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. **Journal of Hydrometeorology**, v. 2, n. 1, p. 36–50, 2001.
- HURRELL, J. W. et al. An overview of the north atlantic oscillation. **Geophysical Monograph Series**, v. 134, p. 1–35, 2003.
- KEPPENNE, C. L.; GHIL, M. Adaptive filtering and prediction of the Southern Oscillation index. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D18, p. 449–454, 1992.
- KIDSON, J. W. Principal modes of Southern Hemisphere low-frequency variability obtained from NCEP-NCAR reanalyses. **Journal of Climate**, v. 12, n. 9, p. 2808–2830, 1999.
- KLINGAMAN N.P.; YOUNG M.; CHEVUTURIA.; GUIMARÃES B.S.; GUOL.; WOOLNOUGH S.J.; COELHO C.A.S.; KUBOTA P.Y.; HOLLOWAY C.E. Subseasonal prediction performance for austral summer South American rainfall. **Weather and Forecasting**. 2020.
- KOBAYASHI, C.; IWASAKI, T. Brewer-Dobson circulation diagnosed from JRA-55. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.121, n.4, p.1493-1510, 2016.
- KOSTER, R. D. et al. Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 2, p. 1–6, 2010.
- KOSTER, R. D. et al. The second phase of the global land–atmosphere coupling experiment: soil moisture contributions to subseasonal forecast skill. **Journal of Hydrometeorology**, v. 12, n. 5, p. 805–822, 2011.
- KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 33, n. 6, p. 538–551, dez. 1981.

KOUSKY, V. E.; KAGANO, M. T.; CAVALCANTI, I. F. A. The Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. **Tellus A**, v. 36, p. 490–504, 1984.

KUBOTA, P. Y. **Variabilidade da energia armazenada na superfície e o seu impacto na definição do padrão de precipitação na América do Sul**. 2012. 309 p. IBI: <8JMKD3MGP7W/3CCP5R2>. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/08.02.02.42-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP7W/3CCP5R2>>.

KUMAR, A.; CHEN, M.; WANG, W. An analysis of prediction skill of monthly mean climate variability. **Climate Dynamics**, v. 37, n. 5–6, p. 1119–1131, set. 2011.

LEE, J. Y. et al. How predictable is the northern hemisphere summer upper-tropospheric circulation? **Climate Dynamics**, v. 37, n. 5, p. 1189–1203, 2011.

LI, S.; ROBERTSON, A. W. Evaluation of submonthly precipitation forecast skill from global ensemble prediction systems. **Monthly Weather Review**, v. 143, n. 7, p. 2871–2889, 2015.

LIANG, P.; LIN, H. Sub-seasonal prediction over East Asia during boreal summer using the ECCO monthly forecasting system. **Climate Dynamics**, v. 50, n. 3–4, p. 1007–1022, 6 fev. 2018.

LIEBMANN, B. et al. Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 12, n. 7, p. 1877–1891, 1999.

LIEBMANN, B.; SMITH, C.A. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.77, p.1275-1277, 1996.

LIM, Y.; SON, S. W.; KIM, D. MJO prediction skill of the subseasonal-to-seasonal prediction models. **Journal of Climate**, v. 31, n. 10, p. 4075–4094, 2018.

LIN, H. et al. GEPS-based monthly prediction at the Canadian Meteorological Centre. **Monthly Weather Review**, v. 144, n. 12, p. 4867–4883, 2016.

LIN, H. Subseasonal forecast skill over the Northern Polar Region in Boreal Winter. **Journal of Climate**, v. 33, n. 5, p. 1935–1951, 1 mar. 2020.

LIU, X. et al. MJO prediction using the sub-seasonal to seasonal forecast model of Beijing Climate Center. **Climate Dynamics**, v. 48, n. 9–10, p. 3283–3307, 2017.

LINDZEN, R. S.; FOX-RABINOVITZ, M. Consistent Vertical and Horizontal Resolution. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 11, p. 2575–2583, 1989.

- LIU, X. et al. Subseasonal forecast skills and biases of global summer monsoons in the NCEP Climate Forecast System version 2. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 5–6, p. 1487–1508, 2014.
- MADDEN, R.; JULIAN, P. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 29, p. 1109–1123, 1972.
- MASTRANGELO, D. et al. First outcomes from the CNR-ISAC monthly forecasting system. **Advances in Science and Research**, v. 8, n. 1, p. 77–82, 2012.
- MATTHEWS, A. J.; HOSKINS, B. J.; MASUTANI, M. The global response to tropical heating in the Madden-Julian oscillation during the northern winter. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 130, n. 601 PART B, p. 1991–2011, 2004.
- MATTHEWS, A.; KILADIS, G. The tropical – extratropical interaction between high-frequency transients and the Madden – Julian Oscillation. **Monthly weather review**, v. 127, p. 661–677, 1999.
- MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics**, v. 20, n. 4, p. 851, 1982.
- MENDONÇA, A. M. **Estudo das características das perturbações EOF extratropicais e seu impacto na previsão de tempo de médio prazo por conjunto**. 2008. 237 p. IBI: <8JMKD3MGP8W/33R236S>. (INPE-15480-TDI/1423). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008.
- MENDONÇA, A. M. **Estudo das características das perturbações EOF extratropicais e seu impacto na previsão de tempo de médio prazo por conjunto**. 2008. 237 p. IBI: <8JMKD3MGP8W/33R236S>. (INPE-15480-TDI/1423). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008.
- MENDONÇA, A. M.; BONATTI, J. P. Experiments with EOF-based perturbation methods and their impact on the CPTEC/INPE ensemble prediction system. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 4, p. 1438–1459, 2009.
- MIYAKODA, K. et al. Simulation of a blocking event in January 1977. **Monthly Weather Review**, v. 111, n. 4, p. 846–869, abr. 1983.
- MO, K. C.; GHIL, M. Statistics and dynamics of persistent anomalies. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 44, n. 5, p. 877–902, mar. 1987.
- 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.; PAEGLE, J. N. The Pacific-South American modes and their downstream effects. **International Journal of Climatology**, v. 21, n. 10, p. 1211–1229, 2001.

MORRISON, H.; THOMPSON, G.; TATARSKII, V. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: comparison of one- and two-moment schemes. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 3, p. 991–1007, 2009.

MUZA, M. N. et al. Intraseasonal and interannual variability of extreme dry and wet events over southeastern South America and the subtropical Atlantic during austral summer. **Journal of Climate**, v. 22, n. 7, p. 1682–1699, 2009.

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL PREDICTION - NCEP. NCEP FNL operational model global tropospheric analyses, continuing from July 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>. Acesso em: 14 out. 2019.

NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 2, p. 279–291, 1997.

OSMAN, M.; ALVAREZ, M. S. Subseasonal prediction of the heat wave of December 2013 in Southern South America by the POAMA and BCC-CPS models. **Climate Dynamics**, v. 50, n. 1–2, p. 67–81, 2018.

PAEGLE, J. N.; BYERLE, L. A.; MO, K. C. Intraseasonal modulation of South American summer precipitation. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 3, p. 837–850, mar. 2000.

REGION, K. et al. The subseasonal experiment (SUBX). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 100, n. 10, p. 2043–2060, 2019.

PHELPS, M. W.; KUMAR, A.; O'BRIEN, J. J. Potential predictability in the NCEP CPC dynamical seasonal forecast system. **Journal of Climate**, v. 17, n. 19, p. 3775–3785, out. 2004.

RAIA, A.; DE ALBUQUERQUE CAVALCANTI, I. F. The life cycle of the South American monsoon system. **Journal of Climate**, v. 21, n. 23, p. 6227–6246, 2008.

RAO, J. et al. Sub-seasonal to Seasonal hindcasts of stratospheric sudden warming by BCC_CSM1.1(m): a comparison with ECMWF. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 36, n. 5, p. 479–494, 2019.

REICHLER, T.; ROADS, J. O. Long-range predictability in the tropics. Part I: monthly averages. **Journal of Climate**, v. 18, n. 5, p. 619–633, 2005.

ROBERTSON, A. W. et al. Toward identifying subseasonal forecasts of opportunity using North American weather regimes. **Monthly Weather Review**, v. 148, n. 5, p. 1861–1875, 2020.

ROSA, E. B. **Desempenho de um método automático para detecção de episódios de ZCAS**. 2017. 131 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3NAANGP>. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/02.02.17.50-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3NAANGP>>.

ROSSO, F. V. et al. Influence of the Antarctic Oscillation on the South Atlantic convergence zone. **Atmosphere**, v. 9, n. 11, 2018.

RUI, H.; **BEAUDOING, H. Readme document for GLDAS Version 2 data products**. [S.l.]: NASA Goddard Space Flight Center, 2017.

SAHA, S. et al. The NCEP climate forecast system version 2. **Journal of Climate**, v. 27, n. 6, p. 2185–2208, 2014.

SARDESHMUKH, P. D.; HOSKINS, B. J. The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 45, n.7, p.1228–1251, 1988.

SCHRECK III, C. J.; JASON, M. C.; DAVID, M. Which MJO events affect North American temperatures ? **Monthly Weather Review**, v.141, n.11, p.3840-3850, 2013.

SCHRECK, C. J.; JANIGA, M. A.; BAXTER, S. Sources of tropical subseasonal skill in the CFSv2. **Monthly Weather Review**, p. MWR-D-19-0289.1, 2020.

STAN, C. et al. Review of tropical-extratropical teleconnections on intraseasonal time scales. **Reviews of Geophysics**, v. 55, n. 4, p. 902–937, dez. 2017.

SUN, S. et al. Subseasonal forecasting with an Icosahedral, vertically quasi-Lagrangian coupled model. part II: probabilistic and deterministic forecast skill. **Monthly Weather Review**, v. 146, n. 5, p. 1619–1639, 2018.

TARASOVA, T. A.; FOMIN, B. A. Solar radiation absorption due to water vapor: advanced broadband parameterizations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 11, p. 1947–1951, 2000.

TEDESCHI, R. G. **As influências de tipos diferentes de ENOS na precipitação e nos seus eventos extremos sobre a América do Sul** - observações, simulações e projeções. 2013. 254 p. IBI: <8JMKD3MGP7W/3DTKRF2>. (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.16.16.57-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP7W/3DTKRF2>>.

TYRLIS, E.; HOSKINS, B. J. Aspects of a northern hemisphere atmospheric blocking climatology. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 65, n. 5, p. 1638–1652, 2008.

VASCONCELLOS, F. C. **Variabilidade atmosférica associada a casos extremos de precipitação na Região Sudeste do Brasil**. 2008. 110 p. IBI:

<6qtX3pFwXQZGivnK2Y/SLTHT>. (INPE-15226-TDI/1318). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/6qtX3pFwXQZGivnK2Y/SLTHT>>.

VERA, C. et al. Toward a unified view of the American monsoon systems. **Journal of Climate**, v. 19, n. 20, p. 4977–5000, 2006.

VITART, F. et al. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 1, p. 163–173, 2017.

VITART, F. Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 140, n. 683, p. 1889–1899, jul. 2014.

VITART, F. Madden—Julian Oscillation prediction and teleconnections in the S2S database. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 143, n. 706, p. 2210–2220, 2017.

VITART, F. Monthly forecasting at ECMWF. **Monthly Weather Review**, v. 132, n. 12, p. 2761–2779, 2004.

VITART, F.; ROBERTSON, A. W. Introduction: why sub-seasonal to seasonal prediction (S2S)? In: In: ROBERTSON, A. W.; VITART, F. (Ed.). **Sub-Seasonal to Seasonal prediction**. [S.l.]: Elsevier, 2019. p.3-15.

WANG, B. et al. Dynamics-oriented diagnostics for the Madden-Julian Oscillation. **Journal of Climate**, p. JCLI-D-17-0332.1, 16 jan. 2018.

WANG, B.; CHEN, G. A general theoretical framework for understanding essential dynamics of Madden–Julian oscillation. **Climate Dynamics**, v. 49, n. 7–8, p. 2309–2328, 2017.

WEBER, N. J.; MASS, C. F. Evaluating CFSv2 subseasonal forecast skill with an emphasis on tropical convection. **Monthly Weather Review**, v. 145, n. 9, p. 3795–3815, 2017.

WHEELER, M. C. et al. Seamless precipitation prediction skill comparison between two global models. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 143, n. 702, p. 374–383, 2017.

WHEELER, M. C.; HENDON, H. H. An all-season real-time multivariate MJO index: development of an index for monitoring and prediction. **Monthly Weather Review**, v. 132, n. 8, p. 1917–1932, 2004.

WHITE, C. J. et al. Potential applications of subseasonal-to-seasonal (S2S) predictions. **Meteorological Applications**, v. 24, n. 3, p. 315–325, 2017.

WILKS, S.D. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. San Diego: Academic Press, 1995.

WILLMOTT, C. J.; ROWE, C. M.; MINTZ, Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, v. 5, n. 6, p. 589–606, nov. 1985.

WOOLNOUGH, S. J. The Madden-Julian Oscillation. In: ROBERTSON, A. W.; VITART, F. (Ed.). **Sub-Seasonal to Seasonal prediction**. [S.l.]: Elsevier, 2019. p.93-117.

YIN, Y; ALVES, O; OKE, P.R. An ensemble ocean data assimilation system for seasonal prediction. **Monthly Weather Review**, v.139, p.786-808, 2011..

ZHANG, C. Madden-Julian Oscillation. **Reviews of Geophysics**, v. 43, n. 2, 2005.

ZHANG, F. et al. What is the predictability limit of midlatitude weather? **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 76, n. 4, p. 1077–1091, 2019.

ZHANG, Z.; KRISHNAMURTI, T.N. A perturbation method for hurricane ensemble predictions. **Monthly Weather Review**, v. 127, p. 447-469, 1999.

ZHU, H. et al. Seamless precipitation prediction skill in the tropics and extratropics from a global model. **Monthly Weather Review**, v. 142, n. 4, p. 1556–1569, 2014.

ZUO, H.; BALMASEDA, M.A.; TIETSCHKE, S.; MOGENSEN, K.; MAYER, M. The ECMWF operational ensemble reanalysis–analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment. **Ocean Science**, v. 15, n. 3, 2019.

APÊNDICE A - INFORMAÇÕES SOBRE OS SISTEMAS DE PREVISÃO SUB-SAZONAL E DAS PREVISÕES RETROSPECTIVAS DOS MODELOS DO PROJETO S2S AVALIADOS

A versão do sistema de previsões sub-sazonais do ECMWF utilizada é a CY43R1, a qual esteve em operação durante o período de 2016 a 2017. Essa versão apresenta um modelo espectral com resolução horizontal Tco639 (cerca de 16 km), nos primeiros 15 de integração do modelo, e Tco319 (aproximadamente 32 km) a partir da 16ª dia de integração, e resolução vertical de 91 níveis. O modelo atmosférico do ECMWF foi inicializado com a reanálise do ERA-Interim. Esse sistema apresenta o componente de acoplamento atmosfera-oceano, sendo o modelo oceânico *Nucleus for European Modeling of the Ocean version 3.4.1*, o qual apresenta resolução espacial de 0.25 na horizontal e 75 níveis na vertical. O modelo oceânico foi inicializado com a reanálise *Ocean Re-Analysis System version 5* (ZOU et al. 2019). As previsões retrospectivas do ECMWF são compostas por um conjunto de 11 membros.

O sistema de previsão sub-sazonal do BoM, o qual esteve em operação até o ano 2020, é composto por um modelo espectral, com resolução horizontal T47 (cerca de 250 km) e 17 níveis na vertical, acoplado ao modelo oceânico *Australian Community Ocean Model version 2* (ACOM2), o qual é baseado no *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) *Modular Ocean Model version 2*. O componente atmosférico do BoM foi inicializado com análise gerada pelo esquema *Atmosphere and Land Initialization* (Hudson et al. 2011b). O componente oceânico foi inicializado com a reanálise *Predictive Ocean Atmosphere Model for Australia Ensemble Ocean Data Assimilation System* (Yin et al. 2011). O conjunto das previsões retrospectivas do BoM é composta por três versões similares do modelo atmosférico (24a, 24b e 24c), onde cada versão é composta por um conjunto de condições iniciais com 11 membros. Dessa maneira, o conjunto total do BoM é composto por 33 membros. Entretanto, apenas o conjunto formado pela versão 24a foi utilizado nesta tese.

A versão do sistema de previsão sub-sazonal do JMA (GEPS1707), a qual esteve em operação entre 2017 e 2020, é composta por um modelo espectral com resolução horizontal TL479 (cerca de 40 km) nos primeiros 18 dias de integração e TL319 (aproximadamente 55 km) após 18ª dia, e resolução vertical de 100 níveis. O sistema do

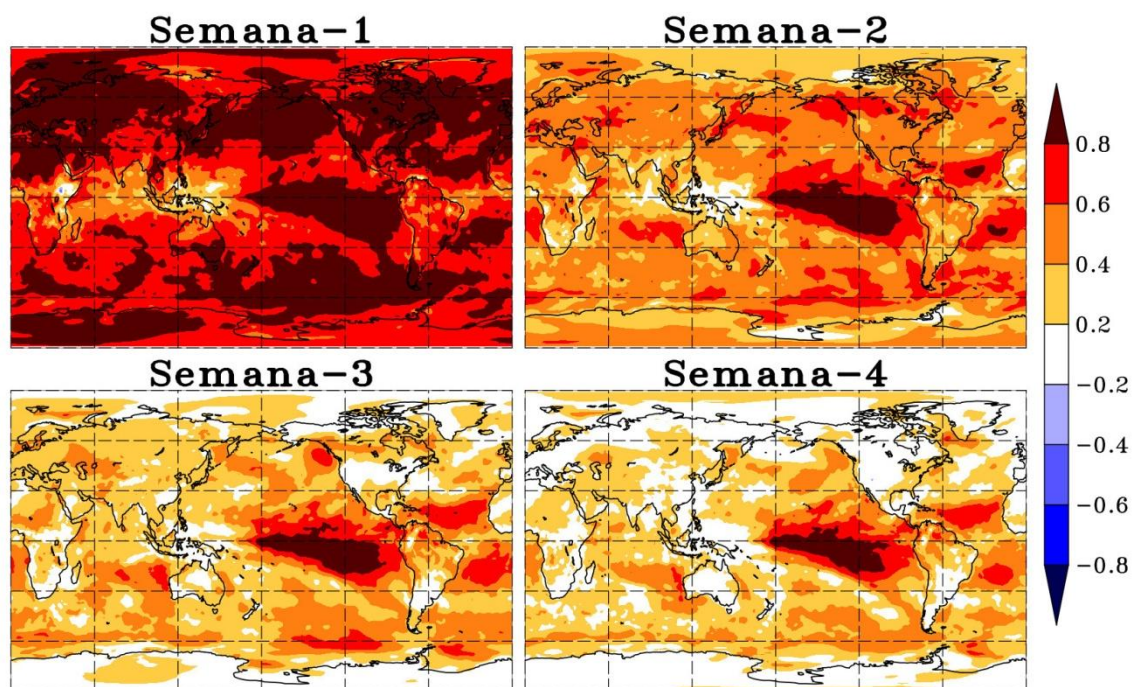
JMA não apresenta o componente de acoplamento atmosfera-oceano e foi inicializado com a reanálise Japanese 55-year reanalysis (KOBAYASHI; IWASAKI, 2016). O conjunto das previsões retrospectivas é composto por um conjunto com 5 membros.

A versão do sistema de previsão sub-sazonal do ECCC (GEPS5, a qual esteve em operação entre 2018 e 2019) é composto por um modelo de diferenças finitas, com uma grade Yin-Yang com resolução horizontal de 0.35° (cerca de 40 km) e 45 níveis na vertical. As previsões retrospectivas do ECCC foram inicializadas com a reanálise do ERA-Interim. Assim como o sistema japonês, o ECCC não possui acoplamento atmosfera-oceano. As previsões retrospectivas do ECCC são compostas por um conjunto com 4 membros.

Informações adicionais sobre os sistemas de previsão do S2S e sobre as previsões retrospectivas podem ser encontradas em <https://confluence.ecmwf.int/display/S2S/>.

APÊNDICE B – ÍNDICES DE DESTREZA PARA AS PREVISÕES DA T2M EMITIDAS COM MÉDIA DO CONJUNTO FORMADA POR 11 MEMBROS

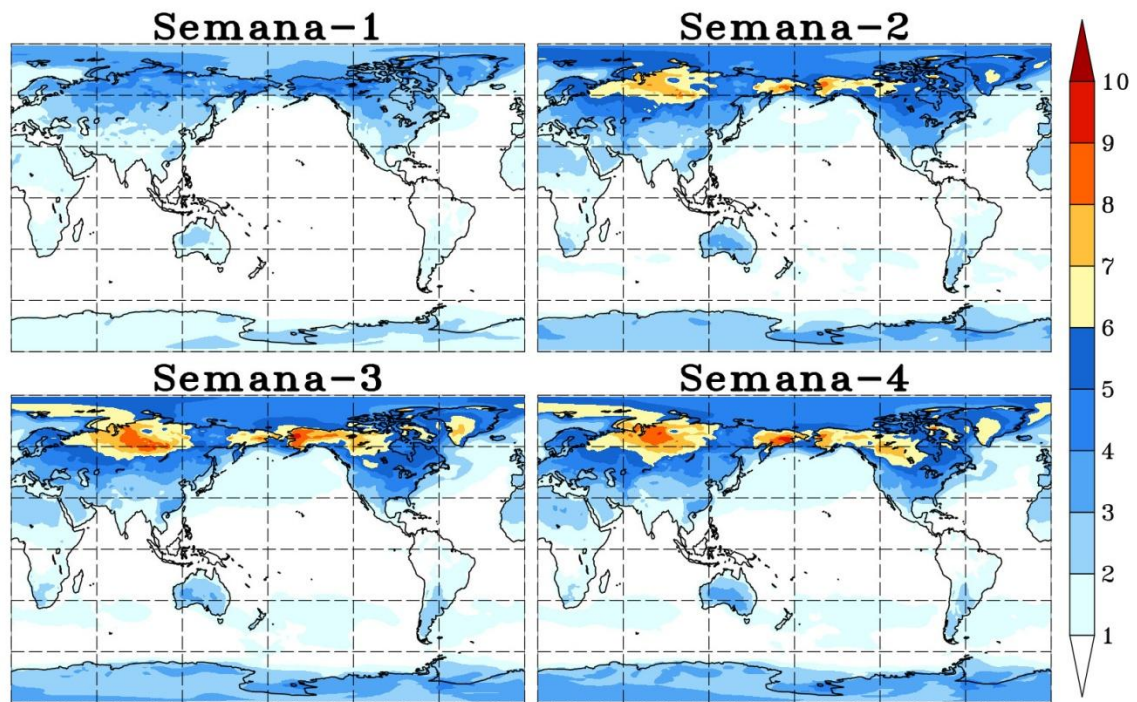
Figura B.1 - Correlação entre as anomalias semanais de T2M das previsões retrospectivas e a reanálise do ERA-Interim para a média do conjunto (11 membros) do BAM-1.2.



Os valores de correlação foram computados para a média do conjunto (11 membros) do BAM-1.2 na configuração 42ABCE para as quatro semanas de previsão. As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011 (como na Tabela 2.1), formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada configuração.

Fonte: Produção do autor.

Figura B.2 – REQM das previsões retrospectivas de T2M do conjunto do BAM-1.2.

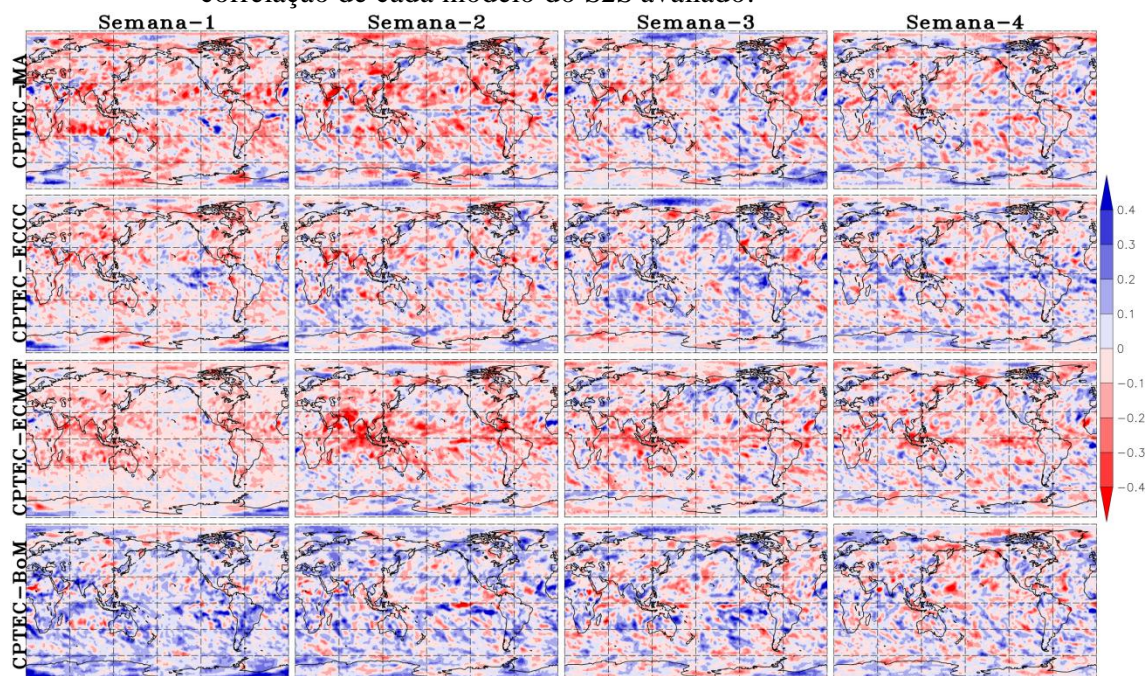


Como a Figura B.1. Porém, para os valores de REQM.

Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE C – DIFERENÇA ENTRE OS ÍNDICES DE DESTREZA DO MODELO DO CPTEC E CADA MODELO DO S2S AVALIADO

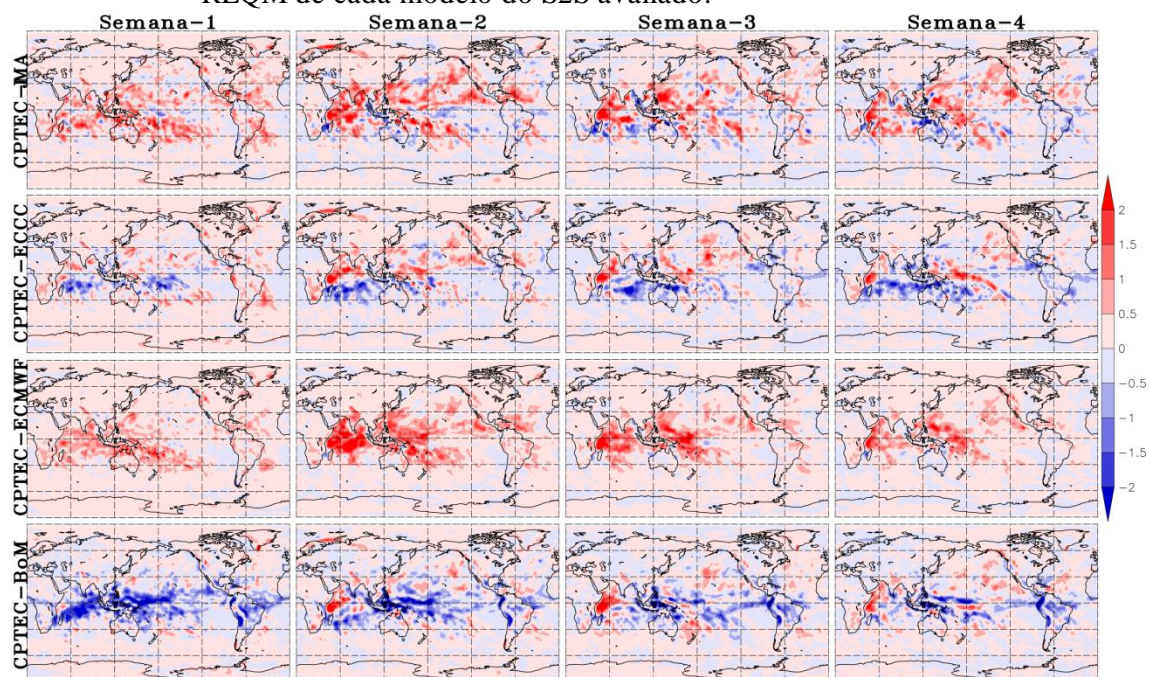
Figura C.1 – Diferenças entre os valores de correlação do modelo do CPTEC e os valores de correlação de cada modelo do S2S avaliado.



As diferenças dos valores de correlação foram calculadas entre os modelos do CPTEC e do JMA (primeira linha), CPTEC e ECCC (segunda linha), CPTEC e ECMWF (terceira linha) e CPTEC e BoM (quarta linha) para as semanas-1, 2, 3 e 4 (colunas). Os valores de correlação foram calculados entre as anomalias semanais de precipitação geradas pela média do conjunto com 4 membros para cada modelo e as anomalias semanais de precipitação dos dados do GPCP, da mesma forma como na Figura 4.1.

Fonte: Produção do autor.

Figura C.2 - Diferenças entre os valores de REQM do modelo do CPTEC e os valores de REQM de cada modelo do S2S avaliado.

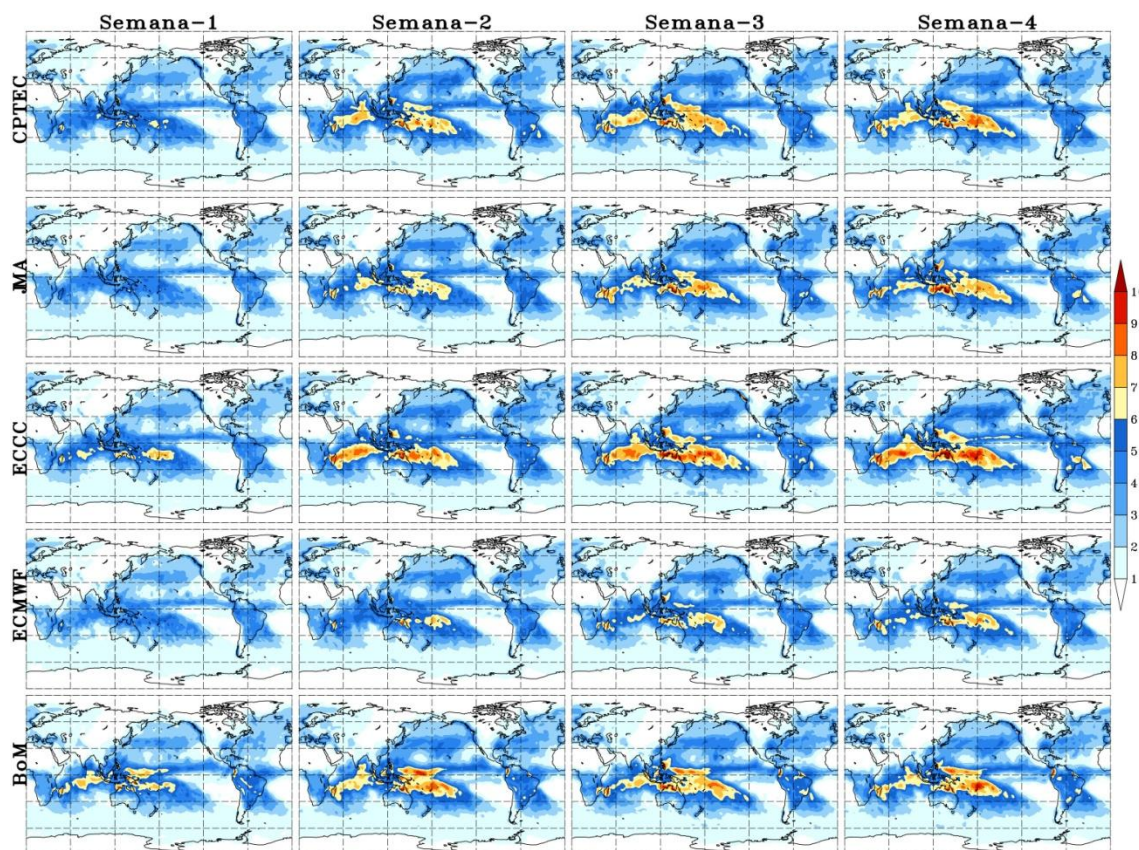


Assim como a Figura C.1. Porém, para os valores de REQM.

Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE D – REQM DAS PREVISÕES DAS ANOMALIAS SEMANAIS DE PRECIPITAÇÃO COMPUTADOS PARA O NÚMERO MÁXIMO DE MEMBROS DE CADA CONJUNTO AVALIADO

Figura D.1 - REQM das previsões retrospectivas dos modelos avaliados.

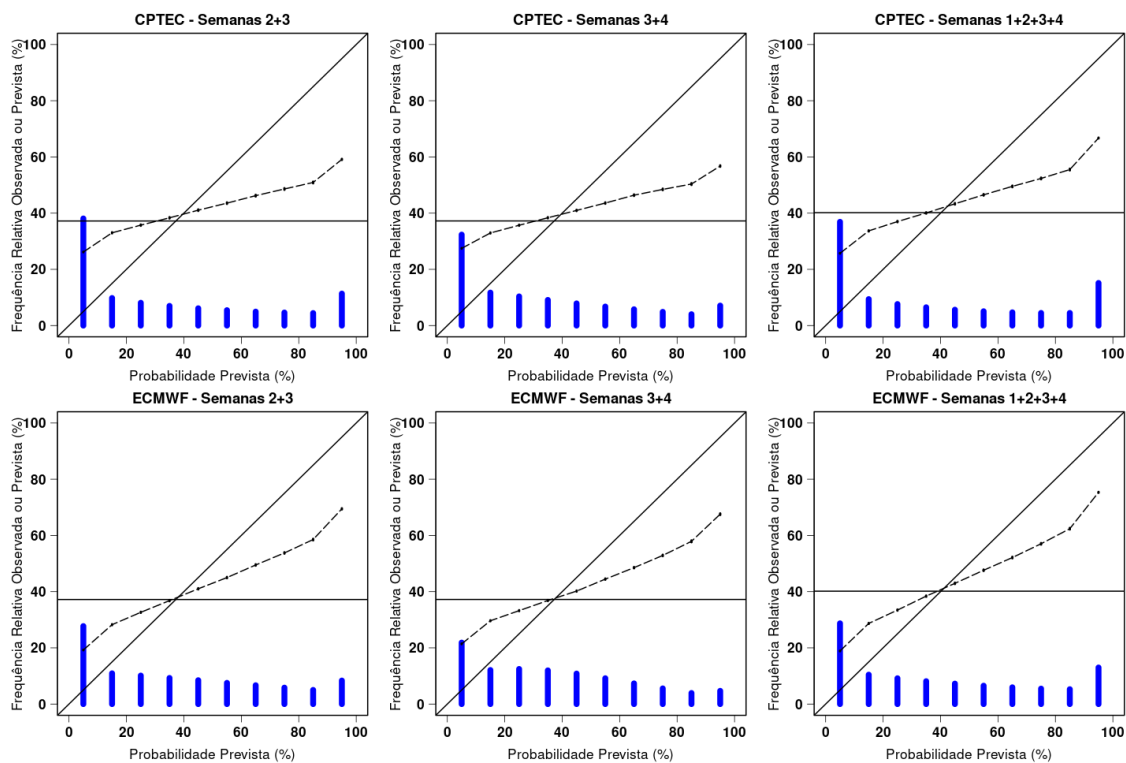


Os valores de REQM foram calculados para as anomalias semanais de precipitação ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$), com o número total de membros disponível de cada modelo (11 membros para o modelo do CPTEC, 5 membros para o modelo do JMA, 4 membros para o modelo do ECCC, 11 membros para o modelo do ECMWF e 11 membros para o modelo do BoM) (linhas) e para as quatro semanas de previsão (colunas). As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada modelo.

Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE E – MÉTRICAS PROBABILÍSTICAS COMPUTADAS PARA AS PREVISÕES DAS ANOMALIAS QUINZENAIS E MENSAS.

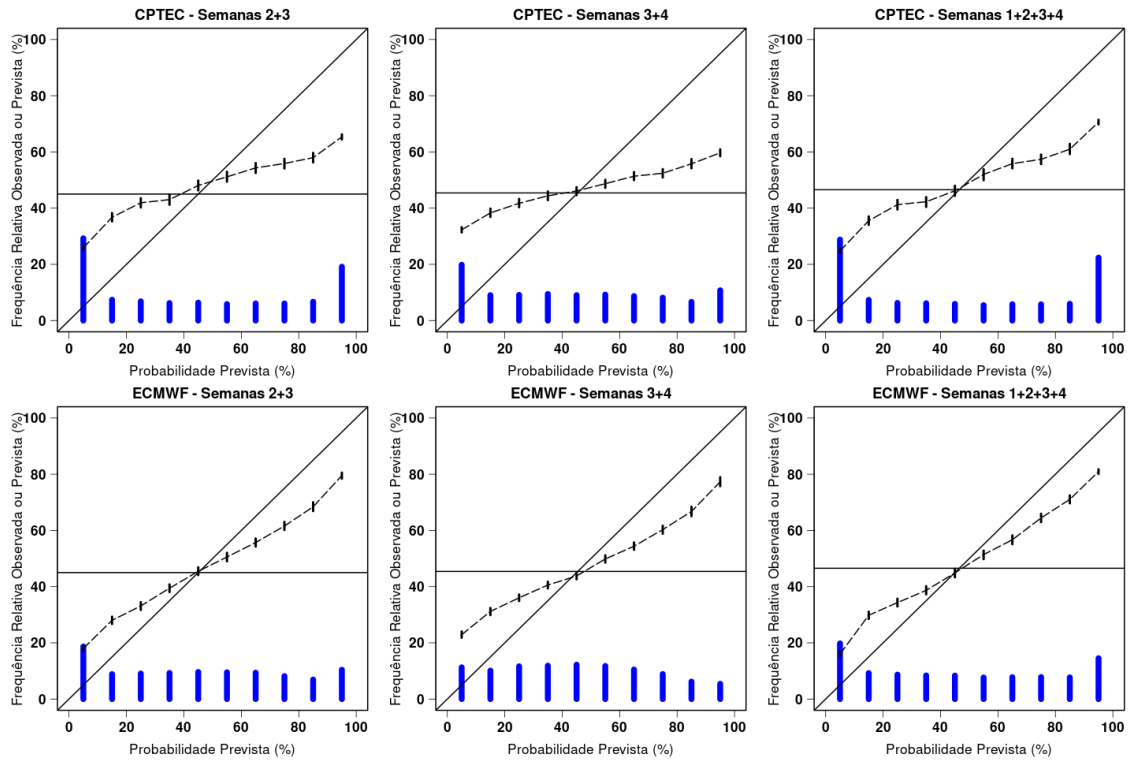
Figura E.1 - Diagrama de confiabilidade dos modelos do CPTEC, ECMWF e BoM para as anomalias de precipitação quinzenais e mensais sobre a região tropical.



Os diagramas dos modelos do CPTEC, ECMWF e BoM (linhas), foram calculados para a previsão probabilística, produzidas com os 11 membros de cada um dos modelos avaliados, de ocorrência de anomalias quinzenal (semanas-2 e 3 combinadas, semanas-3 e 4 combinada) e mensal (semanas-1, 2, 3 e 4 combinadas) (colunas) positivas de precipitação para os pontos de grade agregados sobre a região tropical (30°N-30°S). As barras verticais azuis representam o histograma da frequência relativa das previsões. As barras sobre a linha tracejada (linha de confiabilidade) representam o intervalo de confiança de 95% para a frequência relativa observada calculada com reamostragem (bootstrap) com 1000 amostras. As previsões retrospectivas foram inicializadas duas vezes para cada mês do verão estendido (novembro-março) dos anos 1999/2000-2010/2011, formando uma amostra com tamanho de 120 previsões para cada modelo.

Fonte: Produção do autor.

Figura E.2 - Diagrama de confiabilidade dos modelos do CPTEC, ECMWF e BoM para as anomalias de precipitação quinzenais e mensais sobre a região leste da América do Sul.

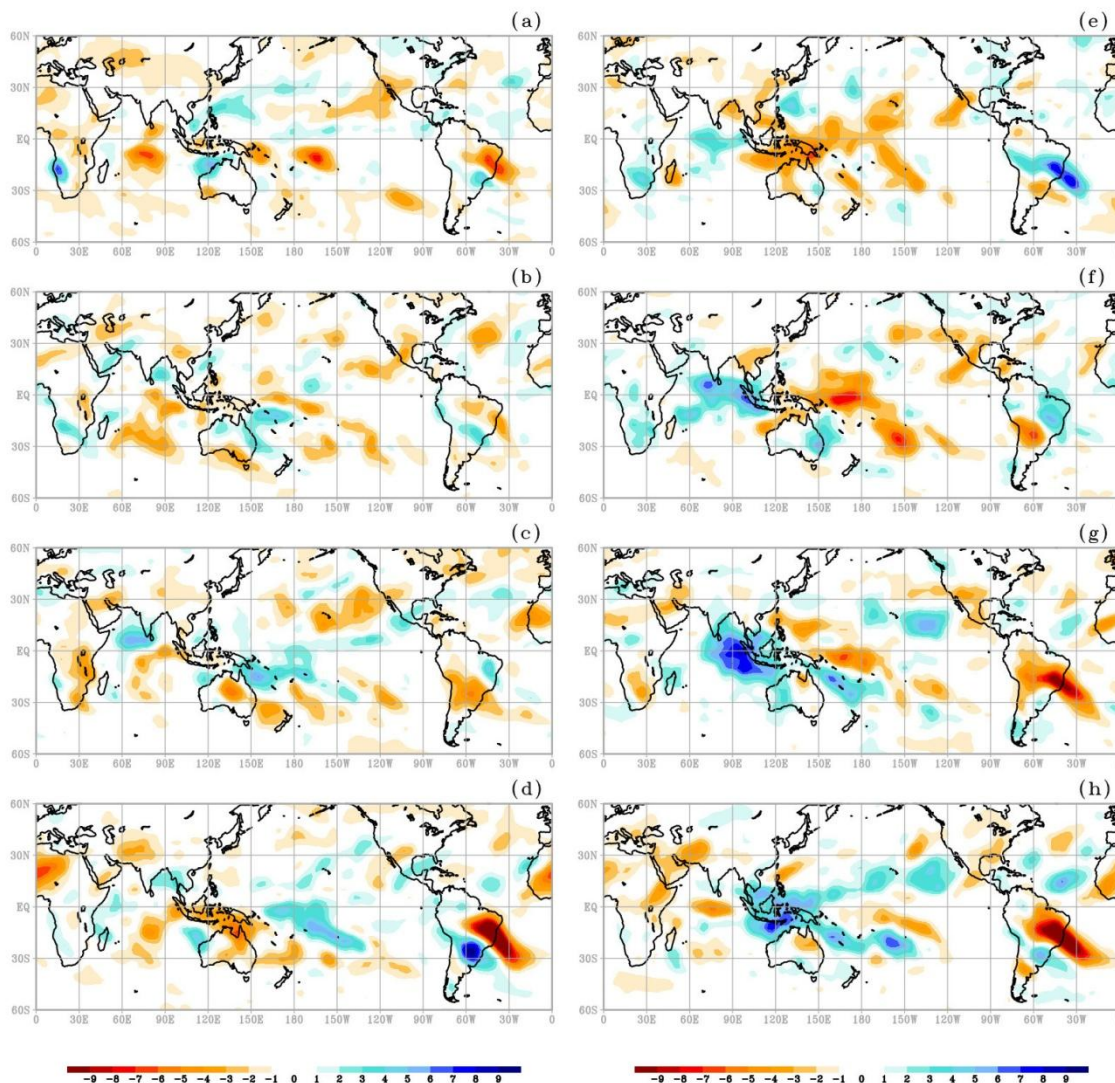


Como a Figura E.1. Porém os diagramas de confiabilidade foram calculados para os pontos de grade agregados sobre a região da América do Sul (0-30°S e 55°W-35°W). Além disso, os pontos de grade sobre o oceano adjacente foram removidos.

Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE F – MAPAS DE REGRESSÃO LINEAR

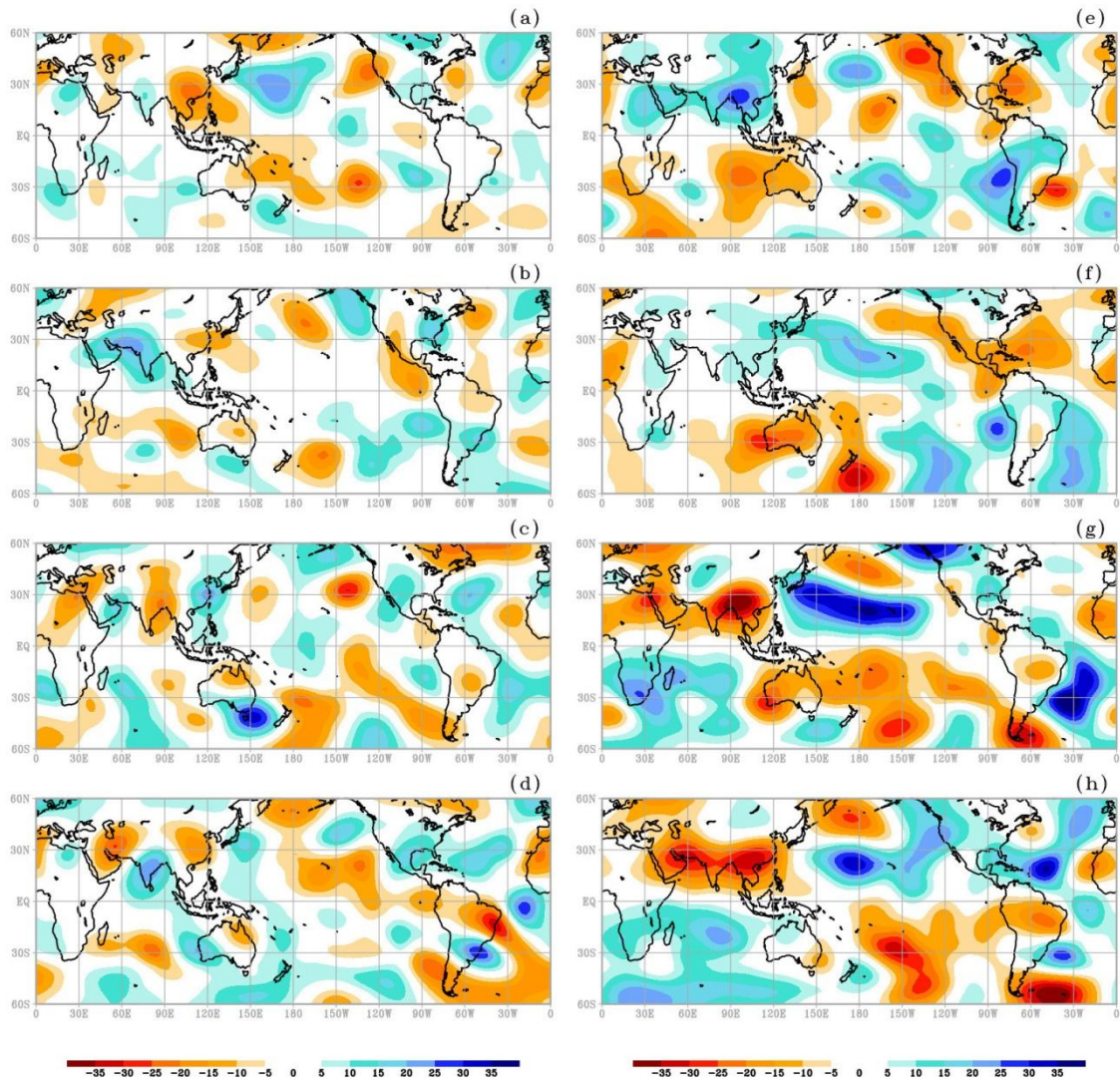
Figura F.1 – Regressão linear das séries temporais FOE1 10-30 e FOE1 30-90 com os campos das anomalias semanais de ROL.



As regressões lineares foram computadas para a FOE1 10-30 com os campos de anomalias de ROL (NOAA) adiantados três semanas no painel (a), duas semanas no painel (b), uma semana no painel (c) e de forma simultânea no painel (d). Do mesmo modo, as regressões lineares foram computadas para a FOE1 30-90 com os campos de anomalias de ROL adiantados três semanas no painel (e), duas semanas no painel (f), uma semana no painel (g) e de forma simultânea no painel (h).

Fonte: Produção do autor.

Figura F.2 - Regressão linear das séries temporais FOE1 10-30 e FOE1 30-90 com os campos das anomalias semanais de função de corrente em 200 hPa.



As regressões lineares foram computadas como a Figura F.2. Porém, para as anomalias semanais da função de corrente em 200 hPa. As anomalias de função de corrente foram calculadas a partir dos componentes zonal e meridional do vento em 200 hPa do ERA-Interim.

Fonte: Produção do autor.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o International Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São as sequências de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.