



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.28.03.04-TDI

**ESTUDO DAS CAUSAS DA SUBESTIMATIVA DA
PRECIPITAÇÃO EM PREVISÃO DE TEMPO PELO
NOVO MODELO ATMOSFÉRICO GLOBAL DO CPTEC
(VERSÃO 4.1) SOBRE A REGIÃO DA BACIA DO
PRATA**

Graziela Luzia da Costa

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelos Drs.
José Paulo Bonatti, e Silvio Nilo
Figueroa Rivero, aprovada em 29
de maio de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JTUQQS>>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.28.03.04-TDI

**ESTUDO DAS CAUSAS DA SUBESTIMATIVA DA
PRECIPITAÇÃO EM PREVISÃO DE TEMPO PELO
NOVO MODELO ATMOSFÉRICO GLOBAL DO CPTEC
(VERSÃO 4.1) SOBRE A REGIÃO DA BACIA DO
PRATA**

Graziela Luzia da Costa

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelos Drs.
José Paulo Bonatti, e Silvio Nilo
Figueroa Rivero, aprovada em 29
de maio de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JTUQQS>>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Costa, Graziela Luzia da.

C822e Estudo das causas da subestimativa da precipitação em previsão de tempo pelo novo modelo atmosférico global do CPTEC (versão 4.1) sobre a região da Bacia do Prata / Graziela Luzia da Costa. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xx + 63 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.28.03.04-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. José Paulo Bonatti, e Silvio Nilo Figueroa Rivero.

1. AGCM-CPTEC/INPE. 2. Precipitação. 3. Bacia do Prata. I.Título.

CDU 551.577.3(292.86)

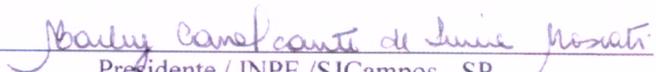


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

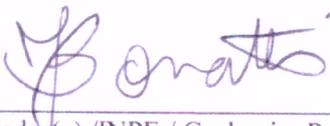
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de **Mestre** em
Meteorologia

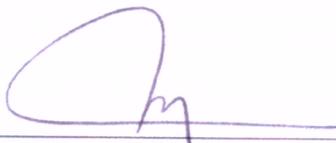
Dra. Marley Cavalcante de Lima
Moscati


Presidente / INPE / SJCampos - SP

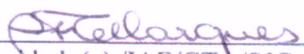
Dr. José Paulo Bonatti


Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Silvio Nilo Figueroa Rivero


Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista- SP

Dra. Rosa de Fátima Cruz
Marques


Convidado(a) / IAE/CTA/SJCampos- SP

Este trabalho foi aprovado por:
 maioria simples.
 unanimidade.

Título: “Estudo das causas da subestimativa da precipitação em previsão de tempo pelo novo modelo Atmosférico Global do CPTEC (versão 4.1) sobre a região da Bacia do Prata”

Aluno (a): Graziela Luzia da Costa

São José dos Campos, 29 de Maio de 2015.

"Perhaps some day in the dim future it will be possible to advance the computations faster than the weather advances and at a cost less than the saving to mankind due to the information gained. But that is a dream."

LEWIS FRY RICHARDSON

À Wilma e à Lisete, duas mães.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e à Coordenação da Pós Graduação em Meteorologia pelo incentivo à participação em eventos dentro e fora da Instituição, enriquecedores a minha formação.

Ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e a todas as pessoas responsáveis pelo espaço e suporte computacional a mim fornecidos.

Aos meus orientadores, Dr. José Paulo Bonatti, pela oportunidade, pelo conhecimento transferido e pelas gentis correções, e ao Dr. Silvio Nilo Figueroa, principal responsável pela minha experiência com a meteorologia e a previsão numérica de tempo, por me abrir as portas para essa linda área do conhecimento e por todo o trabalho realizado nos últimos anos com o MCGA-CPTEC.

À Josiane e ao Saulo, amigos e colegas de trabalho, pela ajuda com as figuras e rodadas do modelo.

A minha turma do mestrado por todos os momentos que compartilhamos dentro e fora das salas de aula. Aos meus amigos do CPTEC e de Cachoeira Paulista, por tornarem mais fácil e agradável este tempo longe de casa, em especial à Helena, pela grande amizade e companheirismo.

A minha família, sobretudo a minha mãe, ao meu padrasto (em memória) e a minha avó, pelo apoio em todas as minhas decisões e pelas lições de independência e proatividade.

Finalmente, agradeço ao Max, que me inspira a fazer o melhor, me incentiva a ir mais longe e tem me acompanhado em quase todos os momentos desde 2007. É a ele que eu dedico este trabalho e todo o meu amor.

RESUMO

O Modelo de Circulação Geral Atmosférico (MCGA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) subestima sistematicamente a previsão de precipitação sobre a região da Bacia do Prata, sobretudo na região sul do Brasil. Esta diferença é observada em rodadas longas, porém, em integrações curtas já é possível notar esta falha, com VIÉS negativo nas previsões de 1 a 5 dias. Neste trabalho, foi proposto investigar as possíveis causas dessa falha na previsão de tempo utilizando-se a nova versão do MCGA (v.4.1) apresentando cinco hipóteses, sendo elas: 1) as falhas em simular a precipitação na região são devidas a baixa resolução do modelo; 2) o esquema de parametrização da superfície não simula adequadamente os processos de troca de umidade próximo a superfície, o que pode gerar um deficit na umidade disponível na camada limite planetária; 3) o modelo de microfísica de nuvens falha ao simular os processos de formação de precipitação; 4) os padrões de circulação da atmosfera na América do Sul, incluindo os Jatos de Baixos Níveis (JBN) e suas consequências na formação de chuva na região da Bacia do Prata, não estão sendo bem simulados e 5) efeitos não-locais, como a má representação de sistemas de escala global atuando sobre o sul do Oceano Pacífico ou Índico, favorecendo precipitação em locais equivocados e seca na região da Bacia do Prata. Os resultados mostraram que a versão em alta resolução do MCGA (T666L64, 20 km de resolução horizontal) sem nenhum ajuste nas parametrizações físicas apresenta muito pouca melhora na previsão de chuva na região de estudo em relação a versão T299L64 (45 km). Da mesma maneira, os testes com diferentes parametrizações de microfísica e de superfície apresentaram pouca diferença em relação ao experimento controle. Os padrões de circulação sobre a América do Sul, no geral, estão sendo bem representados pelo MCGA, embora diferenças na distribuição da umidade tenha sido observada durante o período com ocorrência de JBN. Os resultados obtidos não foram conclusivos sobre a causa da subestimativa da precipitação em estudo, pois em alguns casos o deficit de chuva sobre a região do Prata esteve associado ao erro do modelo em simular o JBN, enquanto em outros não. A avaliação das previsões de bloqueios pelo MCGA mostrou que, para previsões com 24h de antecedência, o modelo apresentou boa destreza, ao contrário das previsões para 120h, em que o modelo não foi capaz de simular tão bem todos os eventos, bem como sua localização e intensidade. Entretanto, não foi encontrada relação entre bloqueios nos oceanos Índico e Pacífico Central e Oeste com a chuva sobre a região do Prata. Existem evidências, embora não conclusivas, de que erros na simulação de bloqueios ao oeste do Chile (Oceano Pacífico leste) podem gerar erros na precipitação sobre a região de estudo.

Palavras-chave: AGCM-CPTEC/INPE. precipitação. Bacia do Prata.

CAUSES OF UNDERESTIMATION OF PRECIPITATION IN FORECASTING BY THE NEW GLOBAL ATMOSPHERIC MODEL (VERSION 4.1) OVER LA PLATA BASIN

ABSTRACT

The Atmospheric General Circulation Model (AGCM) from CPTEC/INPE systematically underestimates the prediction of rainfall over La Plata Basin, especially in southern Brazil. This difference is observed on long simulations, however in short integrations it is already possible to notice this failure with negative BIAS in forecasts for 1-5 days. In this work, it was proposed to investigate the possible causes of failure in forecast using the new version of MCGA (v.4.1) featuring five hypotheses, which are: 1) the failure to simulate the rainfall in the region are due to low resolution model; 2) the surface parameterization scheme does not adequately simulate the moisture exchange processes near the surface, which can generate a deficit in moisture available in the planetary boundary layer; 3) microphysics scheme fails to simulate the cloud precipitation formation process; 4) atmospheric circulation patterns in South America, including the low level jets (LLJ) and its consequences in the rain formation over La Plata Basin region are not well simulated and 5) this failure may be related to non-local effects such as the misrepresentation of global systems acting on the South Pacific or Indian Ocean, favoring precipitation in wrong places and drought in the La Plata Basin. The results showed that the high resolution version of the ACGM (T666L64, 20 km horizontal resolution) shows very little improvement in the rain prediction over the T299 version (45 km), similar the tests with different parameterizations of microphysics and surface. The circulation patterns over South America, in general, are being well represented by the ACGM. meanwhile differences in distribution of humidity have been observed during period with LLJ occurrence. Results for this item were inconclusive as the cause of underestimation because in some cases the rain deficit over la Plata region it was associated with model error in simulating the LLJ, while in others not. The study of atmospheric blockings prediction by ACGM showed that for forecasts 24 hours in advance, the model showed good results, oposite to predictions for 120h, where the model was not able to simulate so well all events as well as its location and intensity. However, it was not found relationship between atmospheric blockings in the Indian Ocean and the Pacific Central and West with rain on the La Plata region. There is evidence, though not conclusive, that errors in the atmospheric blocking simulation over west of Chile (eastern Pacific) can generate errors in precipitation over study area.

Keywords: AGCM-CPTEC/INPE. precipitation. La Plata Basin.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Região da Bacia do Rio da Prata e suas sub-bacias.	2
1.2 VIÉS da precipitação total (mm/mês) do MCGA-CPTEC v. 4.1 em relação a dados de GPCP para a América do Sul de dezembro a fevereiro (DJF) de 1998 a 2012. A região delimitada em verde refere-se à Bacia do Prata. O retângulo azul refere-se a região utilizada para cálculo de médias apresentado nos resultados deste trabalho.	5
2.1 Precipitação média anual (mm) na Bacia do Prata.	7
2.2 Precipitação média sazonal (mm/dia) na Bacia do Prata para a) SON; b) DJF; c) MAM; d) JJA.	8
2.3 Modelo conceitual de JBN na América do Sul.	12
2.4 Índice longitudinal de Bloqueios NOAA (esquerda), DIAO et al. MODIFICADO (direita).	17
3.1 Diagrama esquemático do SSiB. Tr é a temperatura do ar na altura de referência, Tc a temperatura do dossel, Ta a temperatura do ar dentro do dossel, Tgs a temperatura do solo, ra a resistência aerodinâmica entre o ar do dossel e a altura de referência, rb a resistência totalizadora da camada limite, rc a resistência estomática, e rd a resistência aerodinâmica entre o ar do dossel e o solo.	23
4.1 Precipitação total (mm/dia). a) TMPA, b) expCTRL e c) exp20km. . . .	34
4.2 BIAS da Precipitação (mm/dia). a) expCTRL e b) exp20km.	34
4.3 a) Viés médio da precipitação (mm/dia) para expCTRL (vermelho), exp20km (azul) e GFS (verde) e b) RMSE (mm/dia) para os mesmos dados.	35
4.4 Precipitação total (mm/dia) para: a) TMPA, b) expCTRL, c) expSSiB e d) expRASCH.	36
4.5 Viés da Precipitação (mm/dia) para: a) expCTRL, b) expSSiB e c) expRASCH.	36
4.6 Viés médio da precipitação (mm/dia) para expCTRL (vermelho), expSSiB (amarelo), expRASCH (azul) e GFS (verde) e RMSE (mm/dia) para os mesmos dados.	37

4.7	Circulação em 850 hPa (m/s) e umidade específica (g/kg) integrada na vertical (sombreado) com dados de a) CFSR e b) MCGA para DJF/2012-2013. Bacia do Prata destacada em azul.	38
4.8	Composição dos dias identificados com a presença de JBN. Circulação em 850hPa (m/s) e umidade específica (g/kg) integrada na vertical para a) CFSR e b) MCGA. Bacia do Prata destacada em azul.	40
4.9	Diagrama Hovmöller para vento meridional em 850 hPa (m/s) para a) CFSR, c) MCGA e e) GFS; e precipitação (mm/dia) para b) TMPA, d) MCGA e f) GFS	41
4.10	Índice de bloqueio para o HS com dados de CFSR, para o período DJF/2012-2013, calculado a partir do Índice de Bloqueio de Diao et al. (2006) (BINDEX DIAO) adaptado para o HS. As siglas B1 a B7 representam casos de bloqueios com duração maior ou igual a 5 dias.	43
4.11	Índice de bloqueio para HS com dados de a) MCGA 24h, b) MCGA 120h, c) GFS 24h e d) GFS 120h; e diferença entre o índice de bloqueio calculado para modelos e CFSR para e) MCGA 24h, f) MCGA 120h, g) GFS 24h e h) GFS 120h	44
4.12	Caso B1 de bloqueio sobre o PL. a) diferença da precipitação entre TMPA e MCGA (mm/dia), circulação (m/s) e altura geopotencial (m) em 500 hPa para b) CFSR e c) MCGA. Área colorida em (b) indica a região do bloqueio.	46
4.13	Caso B2 de bloqueio triplo. a) diferença da precipitação (mm/dia) entre TMPA e MCGA, circulação (m/s) e altura geopotencial (m) em 500 hPa para b) CFSR e c) MCGA. Área colorida em (b) indica a região do bloqueio.	48
4.14	Precipitacao (mm/dia) durante o caso B6. a) TMPA, b) MCGA e c) GFS.	50
4.15	Caso B6 de bloqueio sobre o Pacífico Oeste. a) CFSR, b) MCGA e c) GFS.	51
4.16	Anomalia de vento meridional (m/s) em 200 hPa durante o caso B6. a) CFSR, b) MCGA e c) GFS.	52

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Esquemas utilizados no MCGA-V.4.1	20
3.2 Tipos de cobertura do solo no SSiB.	22
3.3 Resumo dos dados utilizados	29
3.4 Configuração dos experimentos realizados considerando integração de 90 dias	30
4.1 Bloqueios em 500 hPa, viéses de precipitação sobre a Bacia do Prata e propagação de ondas em 200 hPa. As regiões analisadas são: Oceano Indico (OI), Pacífico Oeste (PO), Pacífico Central (PC) e Pacífico Leste (PL)	45

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Caracterização física e climatológica da região de estudo	7
2.2 Sistemas meteorológicos que afetam a Bacia do Prata	9
2.3 Jatos de Baixos Níveis	11
2.4 Bloqueios	14
3 METODOLOGIA	19
3.1 Modelo de Circulação Geral Atmosférico	20
3.2 Simplified Biosphere Model (SSiB)	21
3.3 Integrated Biosphere Simulator (IBIS)	22
3.4 Microfísica de Rasch e Kristjánsson	25
3.5 Microfísica de Morrison e Gettelman	26
3.6 Dados observados e reanálises	27
3.7 Região e período de estudo	29
3.8 Configuração dos experimentos e análises de dados	30
3.8.1 Resolução	30
3.8.2 Parametrizações de Superfície	31
3.8.3 Parametrizações de Microfísica	31
3.8.4 Jatos de Baixos Níveis	31
3.8.5 Bloqueios	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 Resolução	33
4.2 Parametrizações de Superfície e Microfísica	35
4.3 Jatos de Baixos Níveis	37
4.4 Bloqueios	42
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5.1 Conclusões	53
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1 INTRODUÇÃO

A Bacia do Rio da Prata é a quinta maior bacia hidrográfica do mundo e a segunda maior da América do Sul, com extensão de mais de 3 milhões de km^2 , ficando apenas atrás da Bacia do Rio Amazonas no continente sul-americano (BERECIARTUA; NOVILLO, 2002). Situada em uma área de grande importância econômica e os mais densos centros urbanos, possui porções em 5 países, a saber: Brasil (46 %), Argentina (30%), Paraguai (13%), Bolívia (7%) e Uruguai (4%), incluindo suas capitais federais. Abrangendo uma população de mais de 100 milhões de habitantes, pelo menos 75 das maiores barragens do continente e uma economia que representa o maior percentual do PIB dos cinco países, a bacia possui enorme importância econômica e social para a região (UNESCO, 2007).

É formada por quatro principais sub-bacias: a do Rio Paraná, do Rio Paraguai, do Rio Uruguai, e a própria sub-bacia do Rio da Prata (Figura 1.1). A Bacia do Rio Paraná está situada na parte central do Planalto Meridional brasileiro. Com mais de 4.500 km, o Paraná é o rio mais significativo da bacia (COMITE INTERGUBERNAMENTAL COORDINADOR DE LOS PAISES DE LA CUENCA DEL PLATA, 2013). Apresenta grande potencial hidráulico utilizado para geração de energia elétrica por meio de várias usinas hidrelétricas, entre elas a Usina de Itaipú, instaladas ao longo do curso do rio, principalmente sobre solo brasileiro. Ao receber as águas do Rio Paraguai em solo argentino, torna-se totalmente navegável, sendo, economicamente, um dos rios mais importantes da América do Sul. A Bacia do Paraguai é tipicamente de planície, pois em grande parte está situada sobre o Pantanal. O Rio Paraguai tem aproximadamente 2.500 km de extensão e é um rio próprio para navegação, sendo uma importante via de transporte para o Paraguai e o Brasil. A Bacia do Uruguai possui um trecho planáltico e outro de planície. O Rio Uruguai, com extensão de aproximadamente 1.500 km, faz o papel de limite geográfico entre Argentina e Brasil e entre Argentina e Uruguai. Também desenha o limite entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Possui bom, porém menos expressivo, potencial hidrelétrico e de navegação quando comparado as demais sub-bacias do complexo.

As águas da Bacia do Prata são também largamente utilizadas para abastecimento de água potável para a população, a pecuária e para o setor industrial e servem de irrigação em campos dos mais diversos tipos de cultivos existentes na região. A Bacia do Prata é uma das maiores regiões produtoras de alimentos (cereais, soja e pecuária) do mundo e os estados brasileiros na bacia produzem mais de 30% do arroz, soja, trigo e milho do país, e criam aproximadamente 10% do gado (MECHOSO



Figura 1.1 - Região da Bacia do Rio da Prata e suas sub-bacias.

Fonte: Comitê Intergovernamental Coordenador (CIC) de los Países de La Cuenca del Plata. Disponível em www.cicplata.org

et al., 2001). A agricultura no sul da Bacia do Prata se desenvolveu devido ao solo fértil da região denominada de Pampas, um ecossistema cuja vegetação nativa (de pradaria subtropical e temperada) tem sido sistematicamente convertida em plantações. A agricultura no sul do Brasil é altamente mecanizada, o que resulta em alta produtividade e, ao mesmo tempo, sérios problemas ambientais, como compactação e erosão do solo, contaminação de águas e devastação vegetal (MECHOSO et al., 2001).

A região abriga uma grande biodiversidade. São mais de 350 espécies de peixes, sendo que 85 destas espécies não são encontradas em nenhum outro lugar (INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE (IWMI), 2003). O Pantanal da Bacia do Prata, parte localizado no oeste do Brasil, parte no sudeste da Bolívia e norte

do Paraguai, é a maior planície alagável do mundo, cobrindo uma área variável de até 140.000 km^2 e abrigando uma vasta diversidade biológica de 650 espécies de pássaros, 260 espécies de peixes, 90 espécies de répteis, 80 espécies de mamíferos e mais de 1.600 espécies de plantas (HULME, 1999). O Sistema Aquífero Guarani, um dos maiores e mais importantes reservatórios de água doce subterrânea do mundo, está sob território transnacional (Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai) da Bacia do Prata. Com extensão de aproximadamente 1,2 milhões de km^2 , sua capacidade está estimada em 40.000 km^3 de água.

Em resumo, a Bacia do Rio do Prata, além de grande importância ecológica, é fonte natural de capital para a crescente população destes cinco países sobre os quais se localiza, e é fundamental para a economia local como um centro agricultor, de transporte hidroviário e de produção primária de energia elétrica. A alta dependência em energia hidrelétrica faz com que o abastecimento de eletricidade pela bacia seja vulnerável a secas e escassez de água.

Avanços feitos em previsões climáticas e hidrológicas melhoram potencialmente as tomadas de decisão em setores como gerenciamento de recursos de água e agricultura. Adicionalmente, os habitantes da Bacia do Prata, que representam em torno de 60% da população total dos cinco países da bacia, se beneficiam por um sistema eficiente de alertas para mitigar o impacto de eventos extremos, como secas e inundações (MECHOSO et al., 2001). Inundações severas, com grande prejuízo para a infra-estrutura e produção econômica, são frequentes, principalmente nas sub-bacias dos rios Paraná e Uruguai. Cidades ribeirinhas do Rio Paraná e afluentes, como Resistencia, Corrientes, Rosario e Santa Fe, são frequentemente alagadas (UNESCO, 2007). Em relação ao aspecto ambiental, existe uma necessidade de se mensurar a degradação no ambiente que a Bacia do Prata vem sofrendo nas últimas décadas em função do uso da terra e o impacto que isto gera nas características climáticas da região, e também as alterações devido a mudanças climáticas globais. Todas estes aspectos são de extrema importância para o desenvolvimento econômico e social da região e dependem do bom desempenho dos modelos numéricos de previsão de tempo e clima.

Dentre todas as variáveis meteorológicas, a precipitação possui grande influência sobre as mais diversas áreas de atividade. O conhecimento sobre os sistemas precipitantes e o domínio de sua variabilidade e previsibilidade é fundamental para o desenvolvimento de inúmeras áreas de pesquisa, que vão desde a hidrologia a mudanças climáticas, dos estudos sobre saúde e qualidade de vida ao gerenciamento

de riquezas naturais. Com base nessas afirmações, justifica-se a motivação para este estudo.

Diversos modelos globais falham na previsão sazonal da precipitação na Bacia do Prata (FIGUEROA, comunicação pessoal), incluindo o Modelo de Circulação Geral Atmosférico do CPTEC/INPE. Este modelo, a partir deste momento referido apenas como MCGA, passou por diversas modificações nos últimos cinco anos, incluindo melhorias significativas na dinâmica e nos processos físicos. Entretanto, o MCGA em sua atual versão 4.1 (FIGUEROA et al., 2015a) ainda não é capaz de simular, em sua totalidade, a precipitação sobre a região da Bacia do Prata. A Figura 1.2 mostra o VIÉS da precipitação total sazonal com dados do MCGA para a América do Sul em uma rodada climática (15 anos), na qual é possível notar que, para a região sul do Brasil, parte do sudeste e centro-oeste brasileiro, norte da Argentina, território do Uruguai e Paraguai, onde está localizada praticamente toda a área da bacia, o modelo subestima a precipitação em valores de 30 a 120 mm/mês. Recente estudo de avaliação do novo MCGA para a previsão de tempo com 1 a 7 dias de antecedência mostra que os erros apresentados na Figura 1.2 aparecem já nos primeiros 5 dias de integração (FIGUEROA et al., 2015a), e sugere que não são necessárias rodadas longas para se identificar estas falhas. Demais erros evidentes nesta figura, como a subestimativa na Amazônia e outras regiões do norte da América do Sul, e o excesso de precipitação centrada no estado da Bahia, norte de Minas Gerais e Mato Grosso e sobre o Oceano Atlântico, entre outros erros, não serão discutidos neste trabalho. O objetivo deste estudo é investigar as possíveis causas da falha do MCGA em representar a precipitação sobre a Bacia do Prata.

Na próximo capítulo, a revisão bibliográfica é apresentada. No capítulo 3, são apresentados os dados utilizados, a configuração do modelo e a metodologia empregada nos experimentos realizados. No capítulo 4, os resultados obtidos neste trabalho são apresentados e discutidos e, finalmente, no capítulo 5 são expostas as conclusões acerca deste trabalho e sugestões para investigações futuras.

MCGA-CPTEC/INPE DJF 1998-2012

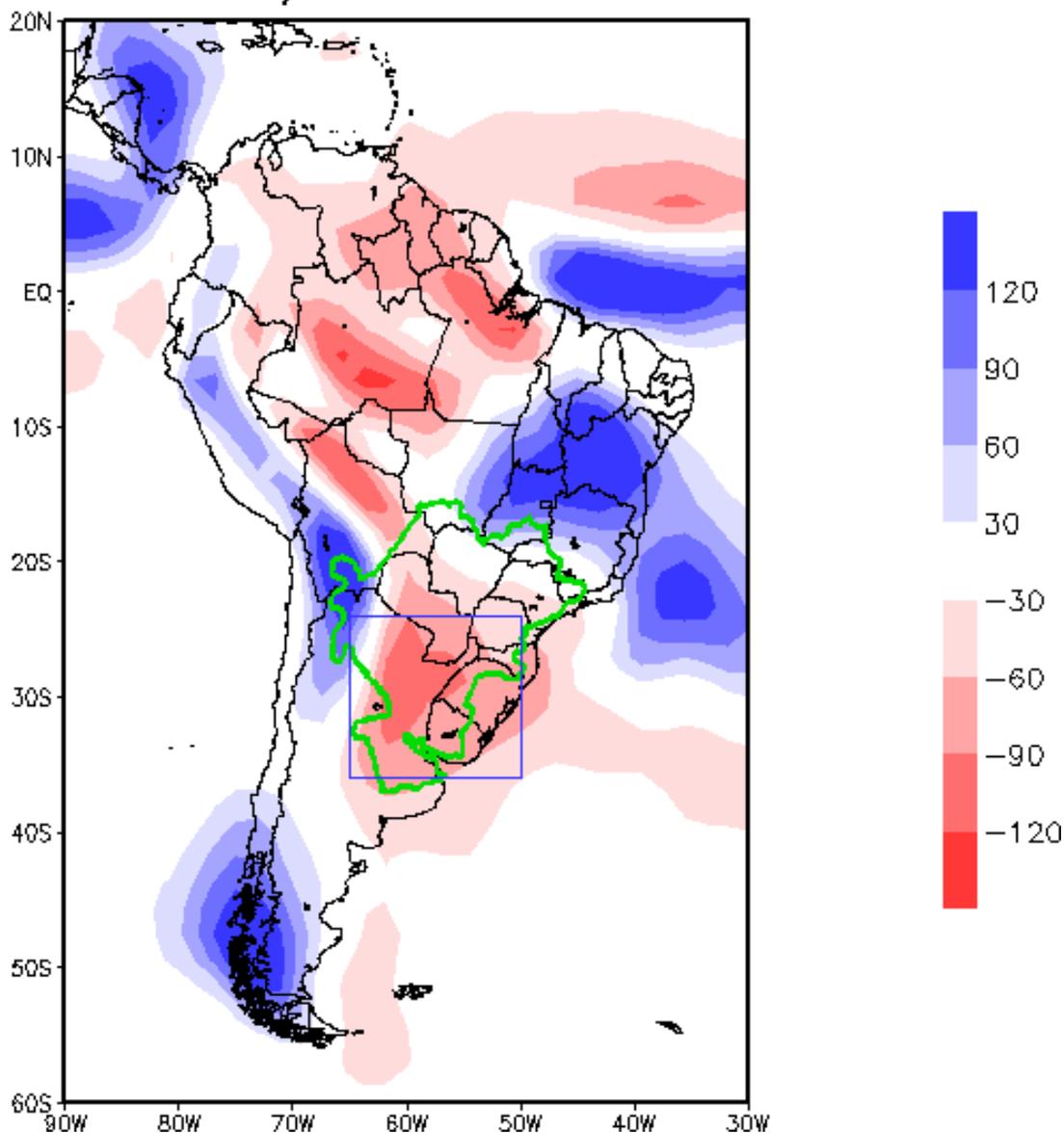


Figura 1.2 - VIÉS da precipitação total (mm/mês) do MCGA-CPTEC v. 4.1 em relação a dados de GPCP para a América do Sul de dezembro a fevereiro (DJF) de 1998 a 2012. A região delimitada em verde refere-se à Bacia do Prata. O retângulo azul refere-se a região utilizada para cálculo de médias apresentado nos resultados deste trabalho.

Fonte: adaptado de Figueroa et al. (2015b).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita uma breve revisão bibliográfica acerca dos principais assuntos abordados nesta dissertação.

2.1 Caracterização física e climatológica da região de estudo

A precipitação média anual na Bacia do Prata é de 1100 mm e apresenta aproximadamente um gradiente oeste-leste e dois picos de precipitação, um localizado mais ao norte, quase na fronteira da bacia (aproximadamente em 15°S de latitude) e outra na região mais central (aproximadamente 28°S de latitude) conforme Figura 2.1. Estes dois máximos são resultados de diferentes regimes de precipitação, com diferentes ciclos sazonais. Segundo Berbery e Barros (2002), o máximo mais ao norte da região da Bacia do Prata acontece preferencialmente durante o verão, enquanto que a região central apresenta este pico de precipitação durante o ano todo, como pode ser visto na Figura 2.2.

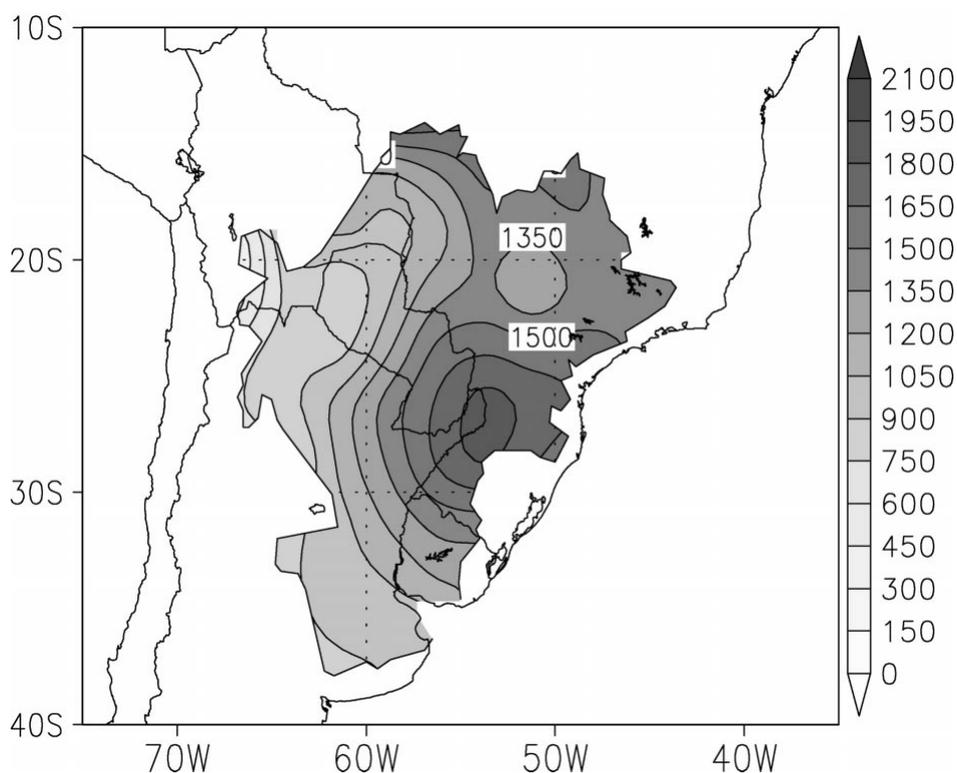


Figura 2.1 - Precipitação média anual (mm) na Bacia do Prata.

Fonte: Berbery e Barros (2002).

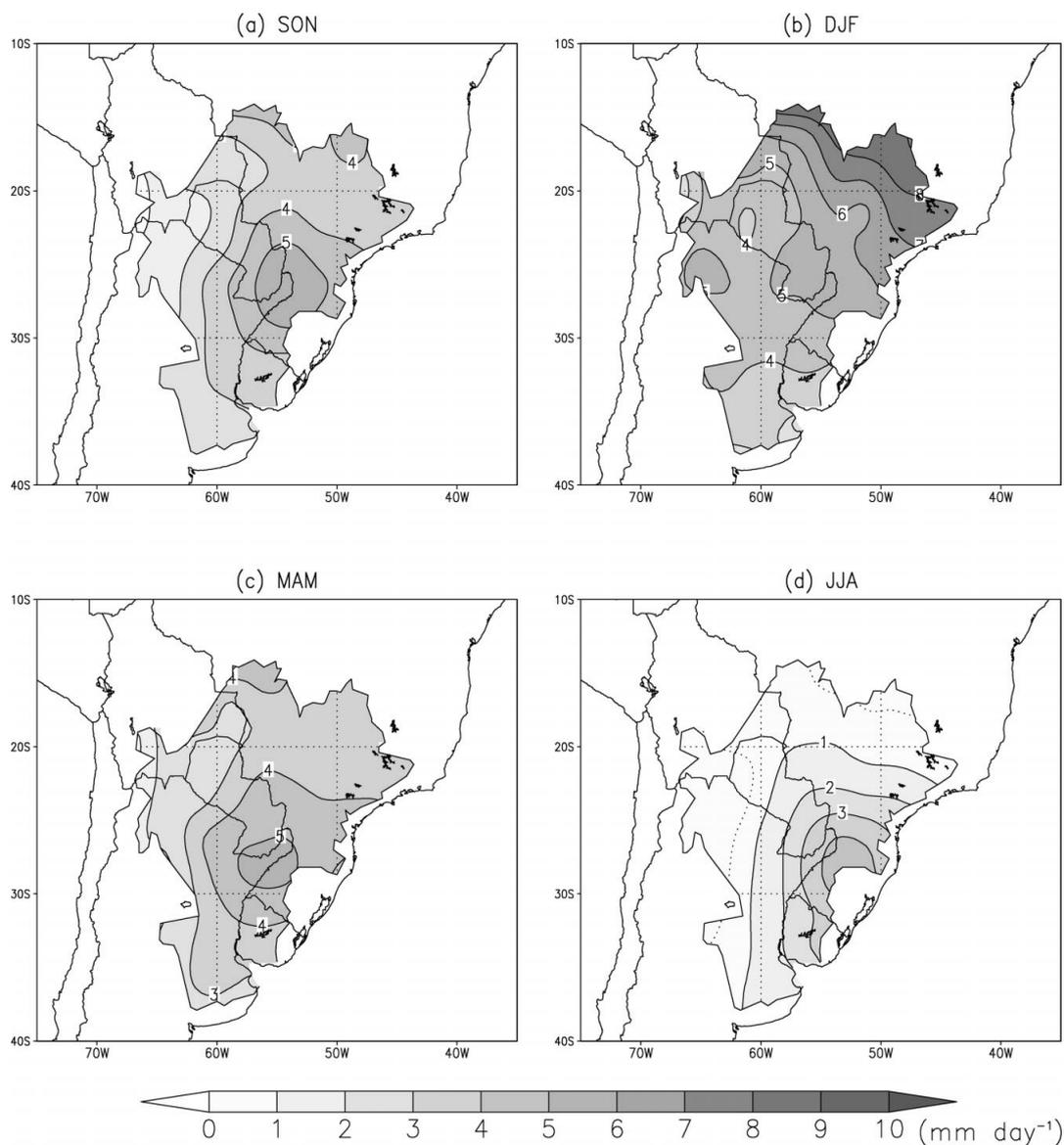


Figura 2.2 - Precipitação média sazonal (mm/dia) na Bacia do Prata para a) SON; b) DJF; c) MAM; d) JJA.

Fonte: Berbery e Barros (2002).

Durante as estações mais quentes (outubro a abril), Sistemas Convectivos de Mesoscala (SCM) são frequentes e contribuem para o montante de chuva (VELASCO; FRITSCH, 1987), bem como a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) mais ao leste da bacia, entre 20° e 25° S nos meses do verão (dezembro a fevereiro). Durante a estação fria (maio a setembro), a forçante mais relevante é devido a atividades transientes, que são responsáveis por boa parte da precipitação total do sudeste da América do Sul (VERA et al., 2002). No inverno e na primavera,

sobretudo, a precipitação intensa é assinatura do aumento da atividade baroclínica. Entretanto, enquanto a frequência de ciclogênese é quase a mesma nestas duas estações (GAN; RAO, 1991), o conteúdo de vapor de água da atmosfera é mais alto e a precipitação é maior na primavera (setembro a novembro) (RAO et al., 1996).

O ciclo anual da precipitação varia do norte para o sul da bacia, uma vez que a região mais ao norte possui um ciclo anual bem definido, com um máximo durante o verão, e a região mais central, que compreende o nordeste da Argentina e sul do Brasil, possui uma distribuição sazonal de precipitação mais uniforme, com máximos relativos ocorrendo durante a primavera e o outono (MECHOSO et al., 2001).

A temperatura média do ar na Bacia do Prata varia em torno de 15°C no sul para 25°C na região mais ao nordeste. Muitos locais a leste dos Andes, a menos de 800 km do Oceano Atlântico Sul, possuem temperatura média anual menor do que 20°C. Altas altitudes na parte mais ao leste dos estados de São Paulo (SP), Paraná (PR) e Santa Catarina (SC), são substancialmente mais frias do que as regiões no entorno. No inverno, a temperatura média mensal tem um gradiente sul-norte. Em julho, por exemplo, a temperatura média sobre a parte nordeste da bacia é maior do que 20°C, enquanto que na Província de Buenos Aires e no Rio Grande do Sul chega a ser 10°C mais frio. No verão, o gradiente de temperatura é mais zonal em função do efeito da distribuição continente-oceano. Em janeiro, a temperatura média máxima é de 27°C na região do Chaco e oeste da Argentina, enquanto na região mais costeira do sul do Brasil, Uruguai e Província de Buenos Aires, ela é menor do que 22°C (MECHOSO et al., 2001).

O comportamento hidrológico dos principais rios que drenam a Bacia do Prata é fortemente influenciado pela topografia, um produto da geologia e do clima, e pela atividade humana. A topografia apresenta variações zonais e meridionais, obviamente acompanhadas da direção geral de drenagem. A fronteira leste da bacia tem altitude média de 1000 m, embora tenha regiões de altitudes tão elevadas quanto 1500 m no leste e tão baixas como 200 m no sul. A fronteira oeste inclui as montanhas dos Andes, cujas altitudes atingem entre 1000 m e 4000 m. Existem, no entanto, locais com altitudes variando de apenas 500 m a 300 m pelo noroeste e sudoeste da região, respectivamente (MECHOSO et al., 2001).

2.2 Sistemas meteorológicos que afetam a Bacia do Prata

Durante o inverno, o jato subtropical é mais intenso e menos distante do equador e a precipitação na Bacia do Prata é principalmente associada a ciclones extratropicais.

Sistemas ciclônicos viajando de oeste para leste e que se desenvolvem sobre o Oceano Pacífico podem se intensificar depois de atingir o continente sul-americano e seguir trajetórias ao longo da costa (MECHOSO et al., 2001). Gradientes da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) podem influenciar significativamente nas trajetórias destes ciclones e seus fluxos de calor sensível e latente (SARAIVA; Silva Dias, 1997).

Outra característica da região da Bacia do Prata, principalmente da parte mais central da bacia, é o desenvolvimento de SCMs (VELASCO; FRITSCH, 1987). Estes sistemas são predominantemente noturnos, organizados de maneira aproximadamente circular, têm um tempo de vida mínimo de 6 horas e podem apresentar deslocamentos de vários km durante seu ciclo de vida. São alimentados por intensos fluxos de umidade em baixos níveis.

A circulação sobre a América do Sul durante o verão é dominada por um sistema de monção e um dos maiores esquemas sazonais de circulação de monção nesta região é a ZCAS, que se estende no sentido noroeste-sudeste ao longo da fronteira da Bacia do Prata durante o verão austral (MECHOSO et al., 2001). Climatologicamente a ZCAS pode ser identificada, na composição de imagens de satélite, como uma banda de nebulosidade estendendo-se desde o sul da região Amazônica até a região central do Atlântico Sul (KOUSKY, 1988).

A variabilidade da ZCAS é importante para a variabilidade da precipitação sobre a Bacia do Prata durante o verão (MECHOSO et al., 2001). Estudos mostraram que anomalias de precipitação na região da ZCAS tendem a estar fora de fase com anomalias de precipitação nas regiões adjacentes ao sul (NOGUES-PAEGLE; MO, 1997). Os autores afirmam que a variabilidade da convecção sobre a América do Sul é caracterizada por um padrão do tipo dipolo entre região de formação da ZCAS e região de planícies subtropicais. Quando a ZCAS é intensificada e a precipitação aumenta nesta região, então a precipitação diminui e a subsidência aumenta no sul, e vice-versa. A Oscilação Madden-Julian propagando ao longo dos trópicos modula a componente norte do dipolo associado com a variabilidade da ZCAS (NOGUES-PAEGLE; MO, 1997). A componente sul do dipolo da ZCAS é modulado por ondas de alta frequência (22-28 dias) que se estendem do Oceano Pacífico Central para leste e para o sul a partir de latitudes médias antes de descreverem uma curva em direção ao nordeste da América do Sul. A variabilidade na Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) pode estar relacionada a variabilidade da ZCAS através da propagação de ondas que se deslocam até a América do Sul (KILADIS; WEICKMANN, 1992; GRIMM; SILVA DIAS, 1995; LIEBMANN et al., 1999).

Além destes sistemas meteorológicos que afetam o tempo e o clima da região da Bacia do Prata, outros sistemas como Jatós de Baixos Níveis e Bloqueios podem afetar as condições meteorológicas e influenciar na distribuição de precipitação sobre esta localização. A ineficácia na representação destes sistemas pelo MCGA foi sugerida, neste trabalho, como umas das causas da falha do modelo em prever chuva na região de estudo. Nas seguintes seções, a revisão bibliográfica sobre estes temas é apresentada.

2.3 Jatós de Baixos Níveis

O JBN é um fenômeno que, gerado ou modificado pela presença de montanhas, ocorre em uma região estreita de ventos máximos localizados nos primeiros quilômetros da atmosfera. Na maioria das vezes, está associado a intenso gradiente de temperatura entre continente e oceano e com grandes cadeias de montanhas (STENS-RUD, 1996). Este sistema tem sido observado em várias regiões do globo, com destaque para a América do Norte (BONNER, 1968; DOUGLAS et al., 1993), a África (FINDLATER, 1969), a Europa (BROWNING; PARDOE, 1973), a Austrália (WILLSON, 1975; GUNN et al., 1989; KEENAN et al., 1989) e a América do Sul (VIRJI, 1981; BERRI; INZUNZA, 1993; SALIO et al., 2002; MARENGO et al., 2004).

Baseado em dados de vento e umidade específica em dois conjuntos de dados de radiossondagem, Bonner (1968) estabeleceu uma primeira climatologia do JBN que tinha como objetivo verificar a ocorrência de ventos máximos na região central dos Estados Unidos e determinar a real frequência dos jatós. Utilizando um critério conforme descrito em Blackadar (1957) sobre o conjunto de dados de vento com quatro horários sinóticos, de outubro de 1959 a setembro de 1960, calculou-se a frequência de ocorrência de JBN em cada nível e em cada estação meteorológica através da análise do vento em 5 níveis. Assim foi determinado o nível do vento máximo e de maior frequência deste sistema como sendo entre os primeiros 1,5 km acima da superfície. Com uma quantidade robusta de dados obtidos com este trabalho, Bonner foi capaz de estabelecer um critério para identificação de JBN, o mesmo que será utilizado neste trabalho. A metodologia de Bonner (1968) consistiu em três critérios restritivos e progressivos monitorados por sondagens verticais do vento, a saber: 1) vento em 850 hPa deve ter o módulo da velocidade maior ou igual a 12 m/s; 2) a componente meridional do vento deve ser de norte e maior do que a componente zonal e 3) o módulo do cisalhamento do vento entre os níveis de 850 hPa e 700 hPa deve ser igual ou superior a 6 m/s.

Wippermann (1973), conforme citado por Nascimento (2008), definiu o JBN do

ponto de vista cinemático como sendo um escoamento que apresenta um máximo na velocidade do vento entre os 2 km acima da superfície. Do ponto de vista dinâmico, o JBN pode ser considerado uma resposta do escoamento ao ciclo diurno da forçante térmica na Camada Limite Planetária (CLP), apresentando um máximo bem definido no perfil vertical da velocidade do vento. Na literatura há diversas definições para JBN, porém apenas os jatos que se estendem além da CLP e possuem apreciável cisalhamento vertical do vento horizontal são assim chamados de JBN.

A questão do transporte de umidade pelo JBN começou a ser estudada na década de 1960, quando o norte-americano William Bonner relacionou os jatos do golfo do México ao clima úmido das planícies centrais dos Estados Unidos. Finalmente o tanzaniano Hassan Virji, radicado nos Estados Unidos, demonstrou a existência dos jatos também na América do Sul, no início dos anos 80 (VIRJI, 1981).

Salio et al. (2002) e Marengo et al. (2004) demonstraram que o máximo de ocorrência dos JBN na América do Sul varia de acordo com a latitude. Para áreas com latitudes inferiores (superiores) a 20° S, o máximo de ocorrência tende a acontecer no período do verão (inverno). No verão, a maior intensidade do JBN na América do Sul ocorre entre as 06 UTC e às 12 UTC ao norte de 20° S. Para o inverno e ao sul de 20° S a ocorrência de JBN é mais frequente entre 00 UTC e 06 UTC. A Figura 2.3 apresenta um modelo conceitual proposto por Marengo et al. (2004).

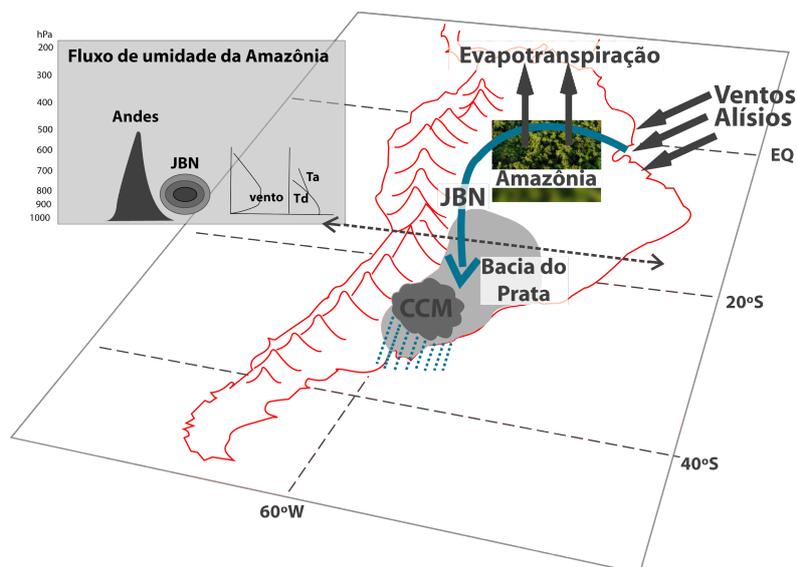


Figura 2.3 - Modelo conceitual de JBN na América do Sul.

Fonte: Adaptado de Marengo et al. (2004).

O JBN da América do Sul é menos estudado do ponto de vista observacional e de modelagem numérica quando comparado com o JBN das Grandes Planícies dos Estados Unidos. Contudo, nos experimentos de campo do South America Low-Level Jet Experiment (SALLJEX) (VERA et al., 2006), foram coletados dados observados com alta resolução espacial e temporal associados à modelagem numérica da atmosfera. Ainda assim, a variabilidade do JBN da América do Sul tanto no espaço quanto no tempo é relativamente pouco entendida em função da pequena disponibilidade de observações de ar superior na América do Sul atualmente, sobretudo a leste dos Andes. Em substituição e para amenizar o problema, modelagem numérica e reanálises são usadas como aproximações razoáveis do estado verdadeiro da atmosfera na América do Sul a leste dos Andes (MARENGO et al., 2004).

Na América do Sul, os JBN são formados pela canalização dos ventos alísios oriundos do Oceano Atlântico, que invadem o território brasileiro pelo nordeste da Amazônia e, ao chegarem à fronteira do Acre com a Bolívia, encontram a Cordilheira dos Andes, são desviados e acelerados para o sul. Sobre a Amazônia, estes jatos transportam vapor de água proveniente da evapotranspiração da vegetação. Quando chegam à Bacia do Prata, interagem com o relevo e com frentes frias formadas em altas latitudes, contribuindo para a formação de SCM. Os SCMs são conhecidos por causar danos nas áreas de ocorrência, pois são geralmente acompanhados de intensa precipitação, rajadas de vento e granizo (NASCIMENTO, 2008).

Nascimento (2008) analisou o impacto do JBN no regime de precipitação da Bacia do Prata. Diferenciando as ocorrências de jatos em dois tipos, de acordo com Nicolini et al. (2004), que são os do tipo Eventos de Jato do Chaco (CJE) e Não Eventos de Jato do Chaco (NCJE), relacionados com a região de saída do jato (latitudes superiores a 25° S para CJE e inferiores a 25° S para NCJE), a autora concluiu que jatos do tipo CJE apresentam as máximas taxas acumuladas de precipitação em latitudes superiores a 25° S e são frequentemente relacionadas com a atuação de sistemas frontais, enquanto os NCJE acontecem praticamente sobre a latitude de 25° S e estão mais relacionados com a ocorrência de sistemas convectivos. Sazonalmente, o tipo CJE apresentou maiores taxas de precipitação durante os meses de verão, enquanto os NCJE apresentaram os maiores acumulados de chuva durante a primavera.

Sendo o JBN responsável por parte da formação de precipitação nesta região, era esperado que uma má representação deste sistema produzisse erros nas previsões de precipitação sobre a região de estudo. Por este motivo, escolheu-se a modelagem deste sistema pelo MCGA para ser analisado neste trabalho.

2.4 Bloqueios

De acordo com [Marques \(1996\)](#), citando o artigo pioneiro de [Rex \(1950\)](#), a circulação em latitudes médias tende a ser caracterizada por um escoamento zonal de oeste. Na presença de uma situação de bloqueio, este escoamento torna-se preferencialmente meridional, normalmente associado a uma bifurcação em dois ramos do jato subtropical pela formação de um anticiclone quase estacionário em latitudes mais altas do que aquelas onde se localiza o cinturão subtropical de altas pressões.

[Rex \(1950\)](#) definiu uma situação de bloqueio como sendo um conjunto de características ocorrendo no nível de 500 hPa, sendo elas: a) a corrente básica é quebrada em dois ramos; b) cada ramo da corrente deve transportar uma considerável quantidade de massa; c) o sistema de duplo-jato deve se estender por pelo menos 45° de longitude; d) uma transição do escoamento de zonal para meridional deve ser observado próximo à quebra do escoamento e e) o padrão deve persistir com reconhecida continuidade por pelo menos 10 dias.

Ao longo dos anos, várias definições de bloqueios foram propostas, mas uma comumente utilizada é a partir da metodologia de [Tibaldi e Molteni \(1990\)](#) derivada de [Lejenas \(1984\)](#). Segundo estes autores, uma situação de bloqueio é definida pela determinação de dois gradientes de altura geopotencial em 500 hPa. Cada um destes gradientes refere-se a diferenças na altura geopotencial entre duas latitudes de referência, sendo um mais ao sul (GHGS) e outro mais ao norte (GHGN) e uma determinada faixa de longitude é considerada bloqueada se, em um dado momento, estes dois gradientes satisfizerem condições pré-estabelecidas ($\text{GHGS} > 0$ e $\text{GHGN} < -10\text{m}/^\circ\text{latitude}$).

A importância de se estudar a presença dos bloqueios advém do fato destes permanecerem estacionários por vários dias ocasionando ondas de frio/calor e períodos de estiagens, afetando de forma significativa as características da variabilidade climática sobre as regiões onde se apresentem. A discrepância na qualidade da previsão de tempo e clima estão associados a erros sistemáticos dos modelos em reproduzir corretamente os eventos meteorológicos. Uma vez formado uma situação de bloqueio, a previsibilidade da atmosfera, nas regiões por ele afetadas, apresenta, em geral, um aumento significativo na qualidade das previsões ([TRENBERTH; MO, 1985](#); [TIBALDI; MOLTENI, 1990](#)).

Devido ao caráter meridional do escoamento, os sistemas transientes, como frentes frias por exemplo, são desviados da sua trajetória original, podendo permanecer

estacionário por vários dias ou deslocar-se na periferia do anticiclone. Os bloqueios apresentam deslocamento bastante lentos, podendo permanecer estacionado em uma posição ou retroceder (movimento de leste). No Hemisfério Sul (HS), geralmente só os anticiclones com grandes durações se deslocam para oeste (DAMIAO, 2007).

Alguns estudos sobre os bloqueios foram publicados particularmente interessados em fornecer uma climatologia das áreas preferenciais de atividade de bloqueios em diferentes áreas do HS. Marques (1996) e Sinclair (1996) encontraram uma nova área preferencial de formação de bloqueios próximo a costa sudoeste da América do Sul, além das regiões anteriormente definidas, a oeste da Austrália e Nova Zelândia (LEJENAS; OKLAND, 1983; LEJENAS, 1984; TRENBERTH; MO, 1985) e leste da América do Sul (CASARIN, 1982; MARQUES, 1996; SINCLAIR, 1996).

Apesar do avanço dos estudos sobre bloqueios no HS, ainda existe a necessidade de se avaliar a capacidade dos modelos de circulação geral da atmosfera (MCGA) em reproduzir as principais características deste evento, como localização, amplitude, frequência e impactos. A falta de habilidade dos modelos em prever os bloqueios é um fator limitante para previsões de longo prazo (TRACTON et al., 1989), onde as consequências destes erros são amplificadas pela integração longa (TIBALDI et al., 1994).

Gerber et al. (2010) e Barnes e Hartmann (2010) afirmaram que, apesar do aumento da resolução dos modelos e da complexidade dos processos representados, os MCGAs em estado da arte atualmente, produzem vieses bem conhecidos nos jatos de médias latitudes, normalmente posicionando os jatos muito distantes do equador. Estes vieses afetam um grande número de fenômenos, incluindo a frequência de anticiclones de bloqueio (SCAIFE et al., 2010).

Devido ao caráter meridional do escoamento, os sistemas transientes, como frentes frias por exemplo, são desviados da sua trajetória original, podendo permanecer estacionário por vários dias ou deslocar-se na periferia do anticiclone. Os bloqueios apresentam deslocamento bastante lentos, podendo permanecer estacionado em uma posição ou retroceder (movimento de leste). No HS, geralmente só os anticiclones com grandes durações se deslocam para oeste (DAMIAO, 2007).

Uma vez que não existe ainda uma definição única para bloqueio, diversos trabalhos apresentam propostas de metodologias para identificar uma situação de bloqueio. O método escolhido para este trabalho consiste em analisar o campo de altura geopotencial em 500hPa, semelhantemente a Tibaldi e Molteni (1990). Trata-se do

esquema proposto por [Diao et al. \(2006\)](#). Este índice foi desenvolvido para o hemisfério norte e utiliza um gradiente de altura geopotencial em 500 hPa entre duas latitudes de referência. Um diferencial deste índice, é que, diferentemente de outros índices mais antigos, em que só era possível indicar a longitude onde existe um bloqueio (1D) e o tempo de duração, ele também permite analisar a evolução espacial do bloqueio (2D), ou seja, latitude e longitude de onde está ocorrendo o sistema, além do tempo de duração do mesmo, o que permite observar sua evolução. Para adaptá-lo ao hemisfério sul, foi preciso gerar um programa no software GrADS capaz de calcular o índice semelhantemente ao método descrito no trabalho de [Diao et al. \(2006\)](#), porém com as devidas modificações. Uma destas modificações é a latitude de referência, que segundo os autores é determinada como sendo a faixa latitudinal onde ocorre a maior diferença de altura geopotencial em relação as demais latitudes. Para determinar este valor, ainda segundo os autores, é preciso analisar a media climatológica destes campos de geopotencial e verificar a mais freqüente. Para o hemisfério norte, este valor depende da faixa longitudinal (Oceano Atlântico, Europa, Rússia, etc) e da época do ano. Os autores apresentam estes valores tabelados para 5 regiões diferentes e para os quatro trimestres do ano.

Não existe na literatura um índice 2D para o hemisfério sul e um trabalho de validação deste novo índice está sendo preparado pela autora desta dissertação. Para este estudo, limitou-se apenas a validar alguns casos com dados conhecidos de bloqueios e com um índice 1D disponível na página da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/blocking/real_time_sh/real_time_index_nrm.shtml). A Figura 2.4 mostra essa validação utilizando-se a adaptação do Índice de [Diao et al. \(2006\)](#), a partir de agora referenciado como BINDEX Diao-adaptado, e com dados disponível na página da NOAA para geração da figura de índice de bloqueios a partir do método de [Tibaldi e Molteni \(1990\)](#).

A página da NOAA disponibiliza a visualização do índice de bloqueio dos últimos 90 dias. Conforme imagem mais atual visualizada (13março2015), os bloqueios mais expressivos dos 90 dias, iniciando em 11 de dezembro de 2014 a 13 de março de 2015, aconteceram em torno dos dias 26/dez, 11/jan, 26/jan e 08/mar. E o local preferencial para a ocorrência dos bloqueios é próximo a linha internacional da data (180°). Esta última informação está de acordo como trabalho de [Damiao \(2007\)](#), que define esta longitude como a de maior freqüência de ocorrência de bloqueios no HS.

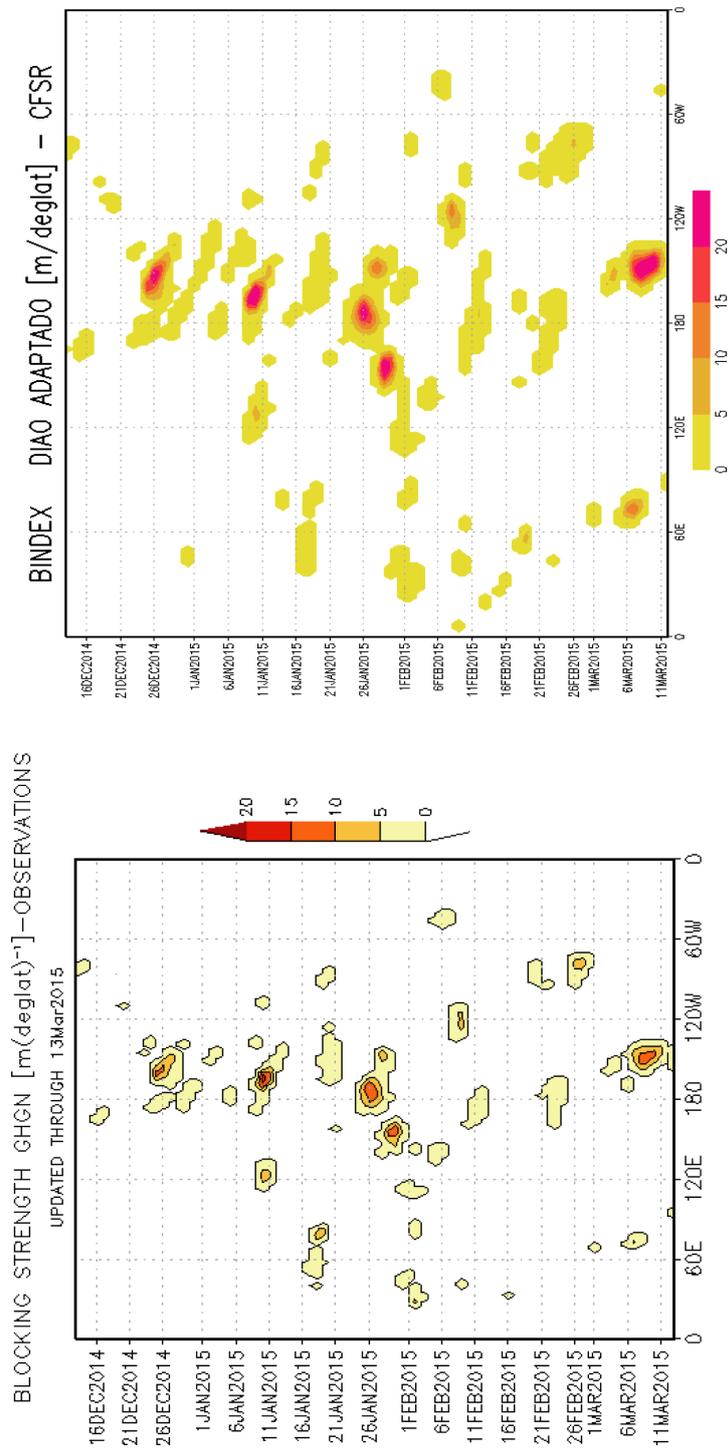


Figura 2.4 - Índice longitudinal de Bloqueios NOAA (esquerda), DIAO et al. MODIFICADO (direita).

3 METODOLOGIA

Dado o problema apresentado no capítulo 1 deste trabalho, o objetivo deste capítulo é o de apresentar a metodologia proposta para se investigar as possíveis causas da falha do MCGA em simular a precipitação sobre a região da Bacia do Prata. Para isto, são apresentadas as seguintes hipóteses:

- a) A falha em simular a precipitação pode ser devido à baixa resolução do modelo (45 km). Espera-se que com maior resolução horizontal (exemplo: 20 km), o maior detalhamento da topografia ajude na melhor distribuição espacial da precipitação;
- b) O esquema de parametrização de superfície não representa adequadamente os processos de troca de umidade que ocorrem na superfície terrestre, o que pode estar gerando um deficit na umidade disponível na CLP para a conversão em precipitação;
- c) O modelo de microfísica de nuvens falha ao simular os processos de formação da precipitação e a substituição por outro esquema, com inclusive níveis de complexidade dos processos reproduzidos diferentes, pode produzir resultados distintos, dando forte indicação de ser esta a causa dos erros;
- d) Os padrões de circulação da atmosfera na América do Sul, incluindo os JBN e sua influência no transporte de umidade da Amazônia para a região da Bacia do Prata podem não estar bem simulados e;
- e) Esta falha pode estar associada a efeitos não-locais, como a má representação de sistemas sinóticos ou de grande escala que atuam sobre o sul dos oceanos Pacífico e Índico, favorecendo a ocorrência de precipitação em locais equivocados, ou mesmo suprimindo-a na região de estudo em decorrência da propagação de ondas na atmosfera ou situações de bloqueios atmosféricos que não coincidem com as observações.

A subestimativa da precipitação pelo MCGA na Bacia do Prata pode estar ocorrendo devido a uma ou à combinação de mais de uma dentre estas possíveis causas sugeridas. Não há na literatura, entretanto, trabalhos que explorem estas hipóteses para este problema do MCGA. Na possibilidade de nenhuma das causas estarem relacionadas ao problema, outras hipóteses deverão ser levantadas e futuramente

testadas em outros trabalhos. A proposta deste trabalho é testar as cinco hipóteses listadas através de diferentes experimentos e análises que serão detalhados neste capítulo. Os dados utilizados e a configuração do modelo e parametrizações físicas também serão apresentados.

3.1 Modelo de Circulação Geral Atmosférico

Neste trabalho foi utilizada a nova versão do modelo atmosférico global do CPTEC (MCGA-V.4.1), que inclui uma nova dinâmica e novos processos físicos. A dinâmica do modelo usado é a euleriana, onde as variáveis prognósticas são: pressão ao nível de superfície, temperatura, umidade específica, velocidade zonal e meridional do vento, água líquida e gelo. Estas variáveis são resolvidas no espaço espectral, exceto a umidade específica, água líquida e gelo, que são resolvidas no ponto de grade usando transporte semi-lagrangiano. Esta é uma das grandes diferenças da dinâmica em relação a versões anteriores do MCGA, nas quais todas as variáveis eram resolvidas no espaço espectral, criando um problema com a umidade sobre regiões de altas latitudes e próximo a montanhas. Na física do modelo atual, foram incluídos diferentes tipos de parametrizações, como o IBIS 2.6, implementado por Kubota (2012). Maiores detalhes sobre as parametrizações e sobre a nova dinâmica, podem ser encontrados em Figueroa et al. (2015a). Neste trabalho serão utilizados os esquemas conforme descrito na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Esquemas utilizados no MCGA-V.4.1

Esquemas	Configuração
Processos de superfície	SSIB (Xue et al. (1991)) e IBIS-v2.6 (Foley et al. (1996) e Kucharik et al. (2000))
Microfísica de Nuvens	Rasch e Kristjansson (1998) e Morrison e Gettelman (2008)
Camada Limite Planetária	Mellor e Yamada (1982) não-local level2.0
Radiação de Onda Curta	CLIRAD(Chou e Suarez (1999), mod. por Tarasova e Fomin (2000))
Radiação de Onda Longa	Harshvardhan et al. (1987)
Convecção Rasa	Esquema de difusão Tiedke (1983)
Convecção Profunda	Grell e Devenyi (2002) modificado

3.2 Simplified Biosphere Model (SSiB)

O Simple Biosphere Model (SiB) foi descrito por Sellers et al. (1986) como sendo um modelo realístico para calcular as trocas de energia, massa e momentum entre a atmosfera e a vegetação na superfície da Terra e foi designado para o uso em MC-GAs. É constituído por duas camadas, sendo uma superior, composta por árvores e arbustos e outra inferior, representando a cobertura do solo. Dentro da vegetação, são descritos os parâmetros físicos e fisiológicos que determinam: i) a reflexão, transmissão, absorção e emissão da radiação direta e difusa nos intervalos de comprimento de onda do visível, infravermelho próximo e termal; ii) a interceptação e evaporação de chuva a partir da superfície da folha; iii) a infiltração, drenagem e armazenamento de chuva residual no solo; iv) o controle da radiação fotossinteticamente ativa (em inglês, Photosynthetically Active Radiation PAR), do potencial de umidade no solo pelo funcionamento dos estômatos e do retorno da umidade do solo para a atmosfera através do sistema folha-haste/caule-raiz e v) a transferência aerodinâmica de vapor de água, calor sensível e momentum da vegetação e do solo para um nível de referência dentro da camada limite atmosférica.

Xue et al. (1991) apresentaram uma versão simplificada do SiB com o intuito de aumentar a eficiência computacional, relatando uma redução de 55% do custo computacional em relação à versão original. O SSiB apresenta quatro grandes reduções na complexidade do SiB, entre elas: i) a simplificação no cálculo da variação diurna do albedo superficial, ii) aproximações que simulam a redução da umidade no solo mais simplificadamente, mantendo a essência dos conceitos biofísicos utilizados no SiB, iii) parametrização em uma versão *off-line* do SiB dos fluxos de calor e de umidade entre o topo do dossel e um nível de referência na atmosfera e, finalmente, a redução das camadas de vegetação, de duas para apenas uma camada.

Os fluxos de momentum, de radiação e de calor latente e sensível entre superfície e atmosfera dependem das características morfológicas e fisiológicas da vegetação na área da grade simulada, das quais são derivados os coeficientes e as resistências que governam essas trocas. Todos estes fluxos dependem do estado da superfície vegetada e das condições de contorno atmosféricas (SELLERS et al., 1986). A cobertura do terreno sobre o qual o modelo opera é representada através de um mapa, onde cada bioma é identificado por um número (Tabela 3.2) ao qual estão associados os parâmetros físicos, fisiológicos e morfológicos.

Como condições de contorno são utilizadas as seguintes variáveis: temperatura do ar, pressão de vapor, velocidade do vento e taxa de precipitação fornecidas pelo

Tabela 3.2 - Tipos de cobertura do solo no SSiB.

CÓDIGO	TIPO
0	drenagem e oceano
1	árvores latifoliadas perenes (floresta tropicais)
2	árvores latifoliadas decíduas (floresta temperada)
3	árvores latifoliadas/aciculadas (floresta mista)
4	árvores aciculadas perenes (floresta conífera)
5	árvores aciculadas decíduas (floresta de lariços)
6	árvores latifoliadas com cobertura arbustiva/herbácea (savana - cerrado)
7	arbustos (campos extratropicais)
8	arbustos latifoliados com cobertura herbácea (caatinga)
9	arbustos latifoliados com solo exposto (semi-deserto)
10	árvores anãs e arbustos com cobertura herbácea (tundra)
11	solo exposto (deserto)
12	cultivos (parâmetros iguais aos do tipo 7)*

Fonte: adaptada de [Correia et al. \(2005\)](#)

MCGA; radiação incidente através das regiões mais baixas da atmosfera, dividida em cinco componentes que são: "visível ou PAR" ($< 0,72\mu m$) direta e difusa, "infravermelho próximo" ($0,72 - 4\mu m$) direta e difusa, e "infravermelho termal" ($> 4\mu m$) e que interagem com as folhas da vegetação (absorção e/ou espalhamento) de formas distintas entre si. A determinação dos fluxos de energia é baseada na analogia a um circuito elétrico, utilizando-se a Lei das Malhas de Kirchhoff (Figura 3.1), onde os fluxos de calor são diretamente proporcionais a uma diferença de potencial e inversamente proporcionais a uma das resistências especificadas. Essas resistências são divididas em aerodinâmicas (r_a , r_b e r_d), associadas às transferências turbulentas de umidade e calor, e de superfície (r_c e r_{surf}), que controlam o fluxo de vapor de água dos tecidos da planta e a evaporação da superfície descoberta do solo. O solo é dividido verticalmente em três camadas: "superficial", "de raízes" e "profunda" ou "de drenagem". O modelo possui sete variáveis prognósticas, sendo elas: temperatura do dossel, da superfície do solo e do solo profundo, o armazenamento de água por interceptação do dossel, e o grau de saturação do solo em três níveis.

3.3 Integrated Biosphere Simulator (IBIS)

O IBIS, apresentado por [Foley et al. \(1996\)](#) como um modelo fisicamente consistente, capaz de simular a biofísica da superfície, os fluxos de carbono terrestre e a dinâmica da vegetação, possui uma estrutura hierárquica modular afim de integrar uma série

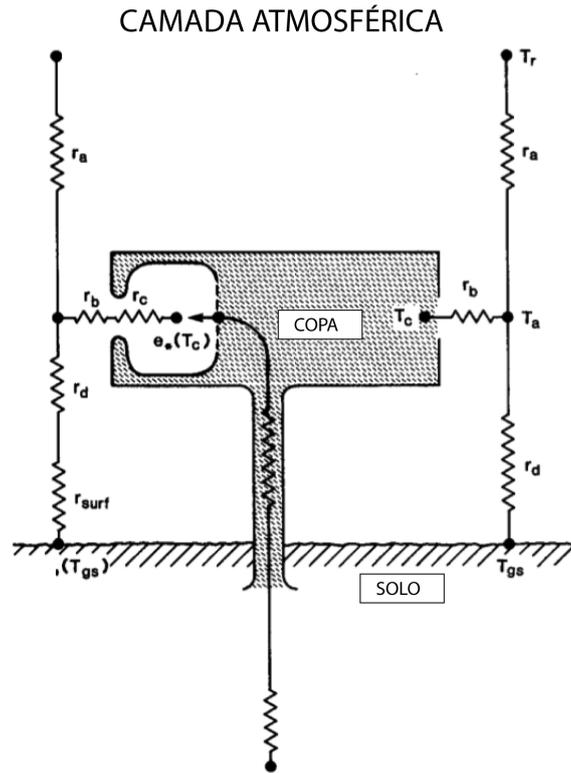


Figura 3.1 - Diagrama esquemático do SSiB. T_r é a temperatura do ar na altura de referência, T_c a temperatura do dossel, T_a a temperatura do ar dentro do dossel, T_{gs} a temperatura do solo, r_a a resistência aerodinâmica entre o ar do dossel e a altura de referência, r_b a resistência totalizadora da camada limite, r_c a resistência estomática, e r_d a resistência aerodinâmica entre o ar do dossel e o solo.

Fonte: Adaptada de Xue et al. (1991).

de processos biofísicos, fisiológicos e ecológicos. Diferentemente do SSiB, que utiliza características de vegetação e solo prescritas geograficamente, o IBIS não negligencia as mudanças na cobertura vegetal, que afetam significativamente o sistema climático (FOLEY et al., 1996). A versão atual do modelo, IBIS 2.6, pode ser adquirida em <http://www.sage.wisc.edu/download/IBIS/ibis.html>.

O IBIS 2.6 é um modelo global da biosfera terrestre, constituído de duas camadas de vegetação (árvores e gramíneas) e oito camadas de solo, capaz de representar os processos físicos, fisiológicos e ecológicos que ocorrem tanto na vegetação quanto no solo, bem como a fenologia e a dinâmica da vegetação, a competição entre as plantas e o ciclo do carbono e nutrientes (KUCHARIK et al., 2000). A versão 2.6 do IBIS apresentou, em relação a versão original, melhorias na representação da física da su-

perfcie, fisiologia da planta, fenologia do dossel, diferenas entre os tipos funcionais de plantas (*plant functional types* PFTs), e alocao de carbono. Adicionalmente, incluiu um submodelo biogeoquímico subterrâneo.

As representações dos processos de superfície (trocas de água, energia e momentum entre solo, vegetação e atmosfera), de fisiologia do dossel (fotossíntese e condutâncias), de fenologia da vegetação (brotação e senescência), de dinâmica da vegetação (alocação e competição entre os tipos de plantas), e de balanço de carbono terrestre (produção primária líquida, carbono do solo, e decomposição da matéria orgânica), operam seguindo uma hierarquia e em passos de tempo diferentes, variando de 60 minutos a um ano (FOLEY et al., 1996). O módulo de superfície do IBIS apresenta duas camadas de vegetação, sendo uma para representar árvores e outra para representar arbustos e/ou gramíneas, oito camadas de solo e três camadas de neve, quando necessário.

Assim como em outros modelos, o IBIS representa explicitamente as temperaturas da superfície do solo e dos dosséis, e a temperatura e umidade dentro do espaço aéreo das copas. Mudanças nestas temperaturas e umidades são governadas pelo balanço de radiação da vegetação e solo e pelos fluxos turbulentos de calor sensível e vapor de água. Para resolver o ciclo diurno destes processos, o modelo utiliza um passo de tempo da ordem de minutos. Simula as trocas de radiação solar e infravermelha entre a atmosfera, a vegetação e a superfície seguindo a aproximação de dois fluxos, com cálculos separados para radiação difusa e direta, para comprimentos de onda na faixa do visível ($0,4$ a $0,7\mu m$) e infravermelho próximo ($0,7$ a $4\mu m$). Diferentemente da primeira versão, as frações iluminadas pelo sol e sombreadas não são tratadas separadamente. Semelhante ao SSIB, a radiação é simulada como se cada camada de vegetação fosse um plano semitransparente com a emissividade dependente da densidade de folhas. Fluxos turbulentos através do dossel são modelados utilizando-se um simples perfil logaritmo acima e entre as camadas de vegetação, e um simples modelo difusivo de movimento do ar dentro de cada camada.

A quantidade total de evapotranspiração da superfície terrestre é tida como sendo a soma de três fluxos de vapor de água: evaporação da superfície do solo, evaporação da água interceptada pelo dossel e transpiração do dossel. As taxas de transpiração dependem da condutância do dossel e são calculadas independentemente para cada tipo de planta dentro da copa.

O solo é tratado com uma formulação multicamadas para simular variações diurnas e sazonais do calor e da umidade nos 12 metros de solo considerados. O balanço

de água no solo é controlado pela taxa de infiltração, evaporação na superfície, transpiração originada nas plantas e redistribuição de água no perfil, e todos estes processos são influenciados pela textura do solo e quantidade de matéria orgânica dentro dele.

3.4 Microfísica de Rasch e Kristjánsson

Rasch e Kristjánsson (1998) apresentaram o modelo de nuvens implementado no National Center for Atmospheric Research (NCAR) Community Climate Model versão 3 (CCM3) que oferecia uma melhor conexão entre os processos meteorológicos que determinam a formação de condensação e a quantidade de água condensada. A parametrização diminui algumas restrições das simulações permitindo um intervalo substancialmente maior de variações nas quantidades condensadas do que na versão padrão do CCM3 (sem microfísica) e fazendo a ligação entre as quantidades de condensados e processos físicos locais. Também permite a formação de gotas de nuvens antes da saturação do ponto da grade e pode exigir um tempo significativo para converter o condensado em chuva precipitável ou para removê-lo. Os parâmetros livres do esquema são ajustados para oferecer um acordo razoável com o topo da atmosfera e os fluxos de energia da superfície.

A formulação para a água de nuvem combina a representação da condensação e evaporação similarmente ao trabalho pioneiro de Sundqvist (1978), com uma parametrização de microfísica do tipo *bulk* mais próxima da utilizada em modelos de resolução de nuvem CRM (do inglês Cloud Resolving Models). Uma nova variável prevista é adicionada ao modelo, o que os autores chamam de condensado de nuvem. É assumido que este condensado possui uma existência suficientemente curta para que os processos resolvidos (advectivos) tenham pouca influência sobre ele, mas que processos não resolvidos (processos convectivos e turbulentos na CLP) possam afetá-lo. Dependendo do seu valor dentro da nuvem e da forçante por outros processos atmosféricos, o condensado de nuvem pode evaporar de volta ao ambiente ou ser convertido a uma forma precipitável, assumindo-se que possa haver água líquida acima da temperatura de congelamento ou graupel/neve abaixo do ponto de congelamento. Os componentes precipitantes do esquema são tratados de forma diagnóstica, ou seja, a derivada temporal é desconsiderada, seguindo a formulação de Sundqvist. A respeito do custo computacional, os autores classificam o esquema como estando entre os "modelos de primeira classe" de parametrização de água de nuvem que utilizam uma formulação microfísica muito simples, e os de "terceira classe", que mantêm formas temporalmente dependentes das equações de evolução

de pelo menos cinco classes de partículas de nuvem.

O desenvolvimento do esquema teve como objetivos principais permitir: 1) uma resposta local para a quantidade de condensado forçado por outros processos (advecção de calor e umidade, convecção e processos turbulentos; 2) o armazenamento de água na forma de condensado e a troca de calor latente com a atmosfera associada quando o condensado troca de fase; 3) uma representação explícita da conversão de condensado (gelo ou água de nuvem) em precipitação, em termos de propriedades físicas facilmente compreendidas; 4) uma representação explícita das diferenças em propriedades das nuvens sobre os oceanos e continentes, associadas com as diferentes fontes de núcleos de condensação de nuvens.

Quatro tipos de condensados são representados: condensado suspenso (sem velocidade de queda) em fase líquida e gelo (q_1 e q_2 , respectivamente) e condensado precipitante em fase líquida e gelo (q_r e q_s , respectivamente). Assume-se que existam cinco processos que convertam condensado em precipitável, sendo eles: conversão de água líquida para chuva, coleta de água líquida pelas gotas precipitantes, auto-conversão de gelo em neve, coleta de gelo pela neve e coleta de água pela neve. A parametrização introduziu mudanças significativas na distribuição do conteúdo de água de nuvem, bem como melhorias no gelo global e os autores relataram uma melhor concordância entre resultado e observação na região de latitudes médias do que nos trópicos. Nuvens altas se tornam mais resistentes a saída da radiação de onda longa e nuvens baixas permitem que mais radiação deixe a superfície. Estas mudanças alteram significativamente o ciclo sazonal da radiação emergente, a fração de nuvens e a temperatura nas regiões polares, tornando as simulações mais quentes em comparação a modelos sem parametrização de microfísica. A adição de uma parametrização mais realística do condensado de nuvem fornece muitas oportunidades de se fazer uma maior conexão entre propriedades radiativas das nuvens e sua formação e dissipação. Este esquema é tido como relativamente simples, computacionalmente econômico e, ainda assim, consegue capturar muitos dos processos representados nos esquemas de parametrização mais complexos e vários "parâmetros livres".

3.5 Microfísica de Morrison e Gettelman

O novo esquema bulk de microfísica de nuvens de dois momentos foi apresentado por Morrison e Gettelman (2008) como tendo: 1) um tratamento mais flexível e consistente da física das nuvens; 2) um razoável nível de simplicidade e eficiência computacional; 3) um tratamento tanto do número de concentração como razão de

mistura das partículas de nuvem para incluir os efeitos indiretos dos aerossóis e a interação nuvem-aerossol; 4) uma representação do número de concentração de precipitação, massa e fase para melhor representar a deposição úmida e as espécies químicas e aerossóis e 5) a realização de resultados equivalentes ou melhores referentes a outros esquemas quando comparados às observações. O esquema trata diversos processos microfísicos, incluindo coleta de hidrometeoros, condensação/evaporação, congelamento, derretimento e sedimentação. Diferenciais desta parametrização, relacionados a existência do esquema de dois momentos desenvolvido para MCGs, incluem o tratamento diagnóstico da razão de mistura e número de concentração de chuva e neve e o explícito tratamento da variabilidade da água de nuvem na subgrade para cálculo das variações dos processos microfísicos. A utilização deste esquema traz melhorias para as simulações, principalmente em modelos de baixa resolução vertical.

As variáveis prognósticas incluem razão de mistura (q_c e q_i) e número de concentração (N_c e N_i) de gotas de nuvem e gelo de nuvem, respectivamente, enquanto precipitação é tratada de maneira diagnóstica. A evolução temporal de q e N é determinada pela advecção na escala de grade, detranhamento convectivo, difusão turbulenta e diversos outros processos microfísicos, como: ativação de núcleo de condensação de nuvem ou nucleação por deposição/condensação-congelamento no núcleo de gelo para formar gotas ou cristais de gelo; condensação/deposição; evaporação/sublimação; autoconversão de gotas e gelo para formar chuva e neve; congelamento heterogêneo de gotículas para formar gelo; congelamento homogêneo de gotículas; derretimento; sedimentação; e detranhamento convectivo. O tratamento diagnóstico da precipitação permite um passo de tempo mais longo porque a precipitação prognóstica é limitada pelo Critério de Courant para a sedimentação. O Esquema de Morrison e Gettelman considera seis formas diferentes da substância água dentro da nuvem: vapor, gotículas de água, cristais de gelo, chuva, neve e graupel/granizo. Vários processos de fase mista líquida-gelo são incluídas. As distribuições dos tamanhos das partículas são tratadas como funções gama, com a interceptação associada e parâmetros derivados da inclinação de previsão de razão de mistura e número de concentração.

3.6 Dados observados e reanálises

Uma breve descrição dos conjuntos de dados utilizados para a realização deste estudo será apresentada nesta subseção e um resumo das variáveis, período, resolução temporal e espacial pode ser conferido na Tabela 3.3. Dados de Global Precipita-

tion Climatology Project (GPCP), Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) e TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) 3B42 e 3B43 v.7 foram utilizados para comparações com dados simulados nos experimentos.

O GPCP é um projeto estabelecido pelo World Climate Research Programme (WCRP) com o objetivo de quantificar a distribuição da precipitação global para uma série longa (ADLER *et al.*, 2003). Este projeto, em sua versão 2.2, fornece médias mensais de precipitação em uma grade $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ (lat/lon) a partir de dados combinados disponíveis de várias fontes, aproveitando os pontos fortes de cada tipo de dados, cobrindo o período de janeiro de 1979 até atualmente. Os dados de GPCP não são propriamente estimados por satélite, mas agrupados com dados de satélite e medidas pluviométricas. Estes dados são disponibilizados pela NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, na página <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcp.html>.

O satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) foi lançado em 1997 com o objetivo de monitorar e estudar a precipitação tropical e em regiões subtropicais, além de verificar como a precipitação influencia o clima global. Os dados são uma combinação de infravermelho do satélite TRMM com dados de outros satélites, como o GMS, GOES-E, GOES-W, Meteosat-7, Meteosat-5 e NOAA-12. O satélite cobre aproximadamente a região entre 50°S e 50°N . Neste trabalho foram utilizados os produtos 3B42 versão 7 (HUFFMAN *et al.*, 2007) de dados a cada 3h e 3B43 versão 7 dos dados mensais. A resolução é de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (lat/lon) e estes dados podem ser obtidos em ftp://disc2.nascom.nasa.gov/data/s4pa/TRMM_L3/TRMM_3B42/ para o período de janeiro de 1998 até o presente.

CFSR é a terceira geração de produtos de reanálises (SAHA *et al.*, 2011) do National Center for Environmental Prediction (NCEP). Possui alta resolução, cobertura global e acoplamento atmosfera-oceano-continente desenvolvido para oferecer a melhor estimativa do estado destes domínios sobre todo o período. A resolução é de aproximadamente 38km e com 64 níveis na vertical (T382). Os dados de CFSR incluem além do acoplamento atmosfera/oceano, um modelo interativo gelo-oceano e a assimilação de radiâncias de satélites. Os produtos das saídas atmosféricas, oceânicas e de superfície terrestre estão disponíveis em resolução temporal de 1 hora e $0,5^\circ$ de resolução espacial para o período iniciando em janeiro de 1979 até dezembro de 2010. Em janeiro de 2011, o NCEP iniciou a nova versão CFSR versão 2 (CFSV2), que pode ser considerada uma extensão semelhante a primeira versão, exceto pela resolução da superfície e dos campos de fluxos, que aumentaram de $0,3^\circ$ para $0,2^\circ$

de resolução espacial. Neste trabalho foram utilizados dados de CFSV2 para cada 6h e foram obtidos na página <http://rda.ucar.edu/datasets/ds094.0/>.

Com a finalidade de comparação com outro modelo global, foram incluídos em alguns resultados, dados de simulações do modelo GFS do National Center for Environmental Prediction (NCEP), versão 2012, com 27 km de resolução horizontal e 64 níveis na vertical. Maiores detalhes a respeito deste modelo, podem ser obtidas em <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/doc.php>.

Tabela 3.3 - Resumo dos dados utilizados

DADOS	VARIÁVEIS	RESOLUÇÃO ESPACIAL (lat/lon) / TEMPORAL	PERÍODO
GPCP	PREC	2,5° / mensal	15 anos (1998-2012)
TMPA	PREC	0,25° / 3h	90 dias (01DEZ2012 a 28FEV2013)
CFSR	U,V 200hPa, 500hPa e 850hPa GEOP 500hPa Q entre superf. e 300hPa	0,5° / 6h	90 dias (01DEZ2012 a 28FEV2013)

3.7 Região e período de estudo

O foco deste trabalho está em analisar o deficit de precipitação sobre a região da Bacia do Prata. Entretanto, os campos de vento, pressão e precipitação serão analisados sobre todo o HS ou sobre a América do Sul. As médias sazonais de precipitação foram feitas sobre a área cujas coordenadas são 65°W-50°W e 36°S-24°S. Esta área contempla toda a parte central e sul da bacia (Figura 1.2), e apresenta características da precipitação mais homogêneas quando comparadas a área da bacia inteira.

Embora o erro sistemático sobre a Bacia do Prata se repita em todas as estações do ano quase que de maneira homogênea (figura não apresentada), escolheu-se analisar o período de um verão (DJF-2012-2013) em função de o erro ser proporcionalmente maior na área de estudo durante o verão. Além disso, nesta estação foram registrados 30 casos de frentes frias sobre a Bacia do Prata e 5 episódios de ZCAS bem definidas sobre o sudeste do Brasil (Climanálise, 2012, 2013, a e b), conforme citado por Figueroa et al. (2015a).

3.8 Configuração dos experimentos e análises de dados

A metodologia empregada nos experimentos consiste em, utilizando o MCGA, analisar as diferentes hipóteses para o problema da subestimativa da precipitação deste modelo, comparando os dados simulados com dados observados e/ou reanálises e para o período e região de estudo, descritos nas seções anteriores. Nas próximas subseções, são apresentadas as configurações dos experimentos e a metodologia para análise dos dados para cada uma das hipóteses apresentadas no início deste capítulo. Um resumo da configuração dos experimentos realizados é apresentado na Tabela 3.4. Demais esquemas de parametrização utilizados nos experimentos, podem ser vistos na seção 3.1.

Tabela 3.4 - Configuração dos experimentos realizados considerando integração de 90 dias

Experimento	Resolução	Superfície	Microfísica
expCTRL	T299L64 45km e 64 níveis	IBIS	MORRISON
exp20km	T666L64 20km e 64 níveis	IBIS	MORRISON
expSSIB	T299L64 45km e 64 níveis	SSIB	MORRISON
expRASCH	T299L64 45km e 64 níveis	IBIS	RASCH

3.8.1 Resolução

Para verificar o efeito do aumento da resolução do MCGA na previsão de precipitação, foi feita uma integração de 90 dias com a versão T666L64 (exp20km) e comparada com a versão T299L64 (experimento controle, expCTRL). Foi calculado o viés incondicional para ambos os resultados do modelo para o trimestre DJF/2012-2013 em relação a dados de TMPA do mesmo período. Para esta comparação, os dados do modelo de ambas as configurações foram passados para a grade do TMPA. Foi também calculada a evolução do viés da precipitação e da raiz do erro quadrático médio - RMSE (do inglês, Root-Mean-Square Error) para os tempos de integração de 24h, 48h, 72h, 96 e 120h de previsão.

Viés é a média das diferenças entre a variável prevista e a observada, usado para identificar erro sistemático nas previsões. Esta métrica permite verificar se o modelo subestima ou superestima os valores médios das previsões. O viés pode assumir qualquer valor real, sendo que quanto mais próximo de zero, menor é o erro sistemático e é dado pela Equação 3.1.

$$VIÉS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (3.1)$$

Onde P são os valores previstos e O os valores observados em cada tempo i. O somatório é feito sobre todos os N tempos de previsão, no caso deste trabalho, 90 dias.

O RMSE, é utilizado para estimar a magnitude do erro das previsões. Quanto mais próximo de zero for o RMSE, melhor é a habilidade do modelo em realizar previsões. O cálculo do RMSE é dado pela Equação 3.2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (3.2)$$

3.8.2 Parametrizações de Superfície

De forma semelhante ao experimento anterior, os resultados foram apresentados para a comparação entre MCGA utilizando o esquema de superfície IBIS (expCTRL) e o SSIB (expSSIB), e incluem as figuras mostrando o viés da precipitação para toda a região da Bacia do Prata e os gráficos da evolução do viés e do RMSE para os diferentes tempos de integração.

3.8.3 Parametrizações de Microfísica

Seguindo o mesmo padrão de apresentação de resultados dos experimentos anteriores, utilizando figuras do viés e evolução do viés e RMSE para o MCGA com esquema Morrison-Gottelman de microfísica (expCTRL) e utilizando o esquema de Rasch-Kristjánsson (expRASCH).

3.8.4 Jatos de Baixos Níveis

Para esta análise, utilizou-se o expCTRL em comparação com reanálises do CFSR para se verificar a capacidade do MCGA em simular a circulação na América do Sul, sobretudo sobre a região de estudo. O objetivo desta comparação é verificar se o modelo consegue prever a atuação do JBN, bem como a localização da saída dos jatos e o período de atuação. Uma vez que a umidade transportada é responsável por boa parte dos episódios de precipitação sobre a Bacia do Prata, conforme discutido no capítulo 2 deste trabalho, uma má representação deste aspecto pode acarretar

em erros nas previsões de precipitação sobre a área.

As figuras feitas mostram a comparação entre o campo de vento em 850 hPa e da umidade integrada na vertical (entre superfície e 300 hPa) para o período de estudo (DJF) e para a composição dos dias de ocorrência do JBN. Para a determinação dos dias de ocorrência dos JBN, foi utilizado o critério 1 de Bonner (1968) e a metodologia de Marengo et al. (2004), que consiste em analisar o campo de vento (850hPa e 700hPa) em duas cidades, a saber, Santa Cruz de la Sierra (Bolívia) e Mariscal Estigarribia (Paraguai), e considerar como evento de JBN se as duas localidades obedecerem simultaneamente ao critério 1 de Bonner em pelo menos um dos 4 horários sinóticos. A razão da escolha das duas cidades é devido a localização de ambas ao longo da região frequente do fluxo do JBN. Foram utilizados os dados de CFSR em quatro horários (00, 06, 12 e 18 UTC). Além destas figuras, foram apresentados Diagramas Hovmoller para as variáveis precipitação e vento meridional em 850 hPa para tornar possível uma melhor análise do impacto dos JBN e possíveis erros em sua previsão na distribuição da precipitação na área de estudo.

3.8.5 Bloqueios

Neste item se verificou a capacidade do MCGA em representar os bloqueios no HS, bem como sua localização, duração e intensidade. Conforme discutido no capítulo 2 deste trabalho, os bloqueios no oeste do Pacífico e à oeste da América do Sul, podem exercer influência no regime de precipitação sobre a América do Sul, sobretudo sobre o sul do Brasil e a região da Bacia do Prata. Um excesso ou falta de bloqueios simulados ao sudoeste do Oceano Pacífico ou a sudeste do Oceano Pacífico, próximo à costa oeste do sul da América do Sul, pode ser a causa da falha da precipitação.

Para analisar esta hipótese, buscou-se um índice de bloqueios para comparar as simulações do modelo (expCTRL) com dados de reanálises do CFSR e decidiu-se por utilizar uma versão modificada do índice de bloqueio desenvolvido por Diao et al. (2006) por ser um índice atual e permitir analisar espacialmente (latitude-longitude) a atuação e a evolução dos bloqueios durante o período de estudo. Os resultados apresentados incluem uma comparação entre MCGA e CFSR para o período DJF/2012-2013 para todo o HS e análises de casos específicos para os dias com eventos de bloqueios mais significativos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes ao estudo das possíveis causas da subestimativa da precipitação em previsão de tempo pelo MCGA sobre a região da Bacia do Prata. Com o intuito de verificar o comportamento do modelo com o aumento da resolução e com a utilização de diferentes parametrizações físicas, foram feitas comparações entre os campos de precipitação sobre a região de estudo e para o período de um verão (DJF/2012-2013) e, em seguida, discutidos os resultados obtidos. Uma análise do desempenho do modelo em representar a atuação dos JBN a partir da comparação dos dados simulados com dados de reanálises também foi realizada. Finalmente, o estudo sobre bloqueios no HS simulados pelo MCGA em comparação a dados de reanálises pode ser também conferido neste capítulo.

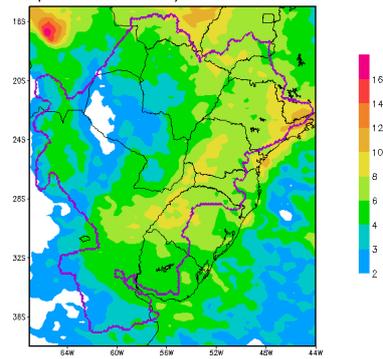
4.1 Resolução

Primeiramente foram plotados os campos de precipitação total média no período DJF/2012-2013 para o expCTRL, com resolução de aproximadamente 45 km (T299L64) e para o experimento com maior resolução (exp20km), de aproximadamente 20 km (T666L64), e comparados com os dados de TMPA (TRMM 3B42) para o mesmo período. Os dados de TMPA, inicialmente com resolução temporal de 3h, foram convertidos em média do trimestre de estudo. Os dados de MCGA em ambas as resoluções foram passadas para a grade do TMPA, ou seja, $0,25^\circ$ lat/lon.

No geral, os dois experimentos (Figura 4.1b-c) mostraram resultados bem semelhantes, com uma distribuição de precipitação parecida na região de estudo, ambos subestimando a precipitação para praticamente toda a região sul do Brasil e superestimando em alguns locais ao norte da bacia. Com maior detalhamento da topografia, o exp20km apresentou uma tendência a superestimar os valores da precipitação nas regiões de topografia mais elevada, com destaque pra Serra do Mar e na região do alto da Bacia do Prata. Esses erros ficam mais evidentes nas Figuras 4.2a-b para o viés da precipitação. A média do erro calculado para a área de estudo (descrita no capítulo 3), ficou em $-1,38$ mm/dia e $-1,14$ mm/dia para o expCTRL e exp20km, respectivamente.

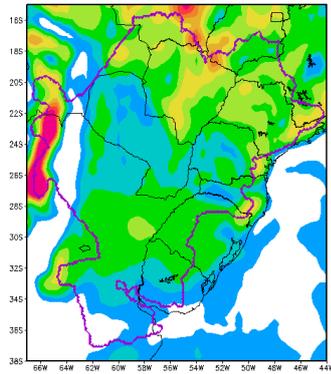
A Figura 4.3a mostra a evolução do viés médio e o RMSE na área de estudo, das previsões da precipitação para os cinco horários de integração, ao longo do período estudado, para o expCTRL e exp20km em relação aos dados observados (TMPA). No geral, o exp20km apresentou comportamento muito semelhante ao expCTRL. Ambos possuem o menor viés de previsão na integração de 48h e crescente viés

Precipitacao Total DJF/2012-2013 - TMPA



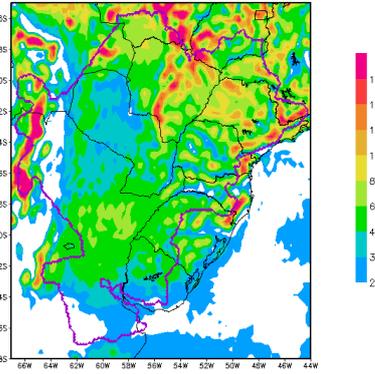
(a)

Precipitacao Total DJF/2012-2013 - MCGA 45km



(b)

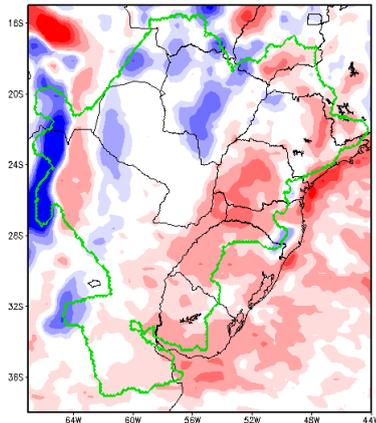
Precipitacao Total DJF/2012-2013 - MCGA 20km



(c)

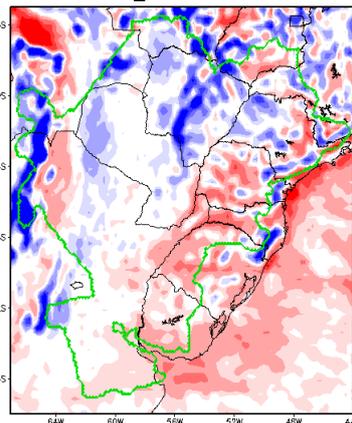
Figura 4.1 - Precipitação total (mm/dia). a) TMPA, b) expCTRL e c) exp20km.

MCGA_45km - TMPA



(a)

MCGA_20km - TMPA



(b)

Figura 4.2 - BIAS da Precipitação (mm/dia). a) expCTRL e b) exp20km.

negativo a partir deste horário. Embora ambos os experimentos tenham apresentado a evolução do viés médio muito semelhantes, na Figura 4.3b, pode-se notar uma leve diminuição na qualidade das previsões do exp20km em relação ao expCTRL. Este resultado sugere que a subestimativa na previsão da precipitação não é decorrente da baixa resolução no caso do T299L64 e que um grande aumento na resolução, embora signifique uma representação mais detalhada da distribuição da chuva pela região, sobretudo nas regiões com topografia mais acidentada, não representa na média uma melhora na previsão de chuva para esta região.

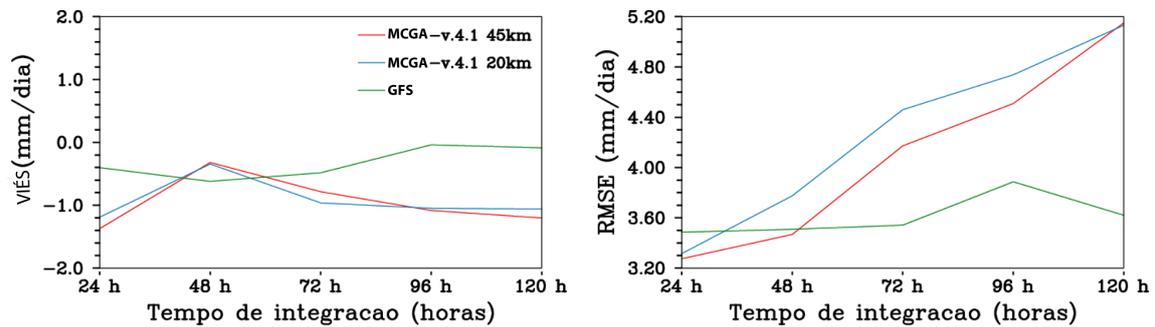


Figura 4.3 - a) Viés médio da precipitação (mm/dia) para expCTRL (vermelho), exp20km (azul) e GFS (verde) e b) RMSE (mm/dia) para os mesmos dados.

4.2 Parametrizações de Superfície e Microfísica

Os resultados dos experimentos com diferentes parametrizações de superfície e microfísica foram agrupados para uma melhor análise da sensibilidade do modelo ao alterar os esquemas em relação ao expCTRL. As Figuras 4.4a-d mostram a média da precipitação para o período de estudo na região da Bacia do Prata. Os experimentos expSSIB e expRASCH são comparados com o expCTRL e com os dados de TMPA.

As diferenças entre os experimentos são ainda menores nos experimentos expSSIB, expRASCH e expCTRL quando comparados ao exp20km. Na Figuras 4.4, as diferenças na distribuição da precipitação entre os experimentos são praticamente indistinguíveis, o que pode ser conferida na figura do viés da precipitação para os dois experimentos e para o expCTRL (Figuras 4.5a-c). A diferenças médias na área calculadas foram de -1,32 mm/dia e -1,48 mm/dia para expRASCH e expSSIB, respectivamente.

Estes resultados sugerem que a alteração dos esquemas de microfísica e de superfície, ainda que estes esquemas apresentem grandes diferenças entre si, incluindo distintas

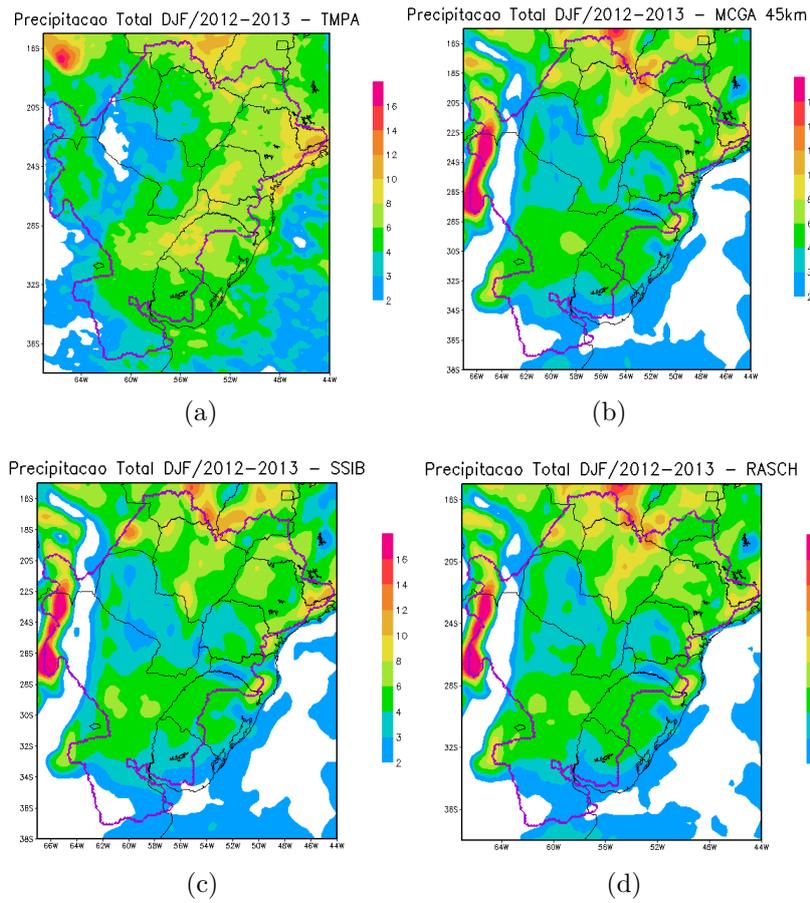


Figura 4.4 - Precipitação total (mm/dia) para: a) TMPA, b) expCTRL, c) expSSIB e d) expRASCH.

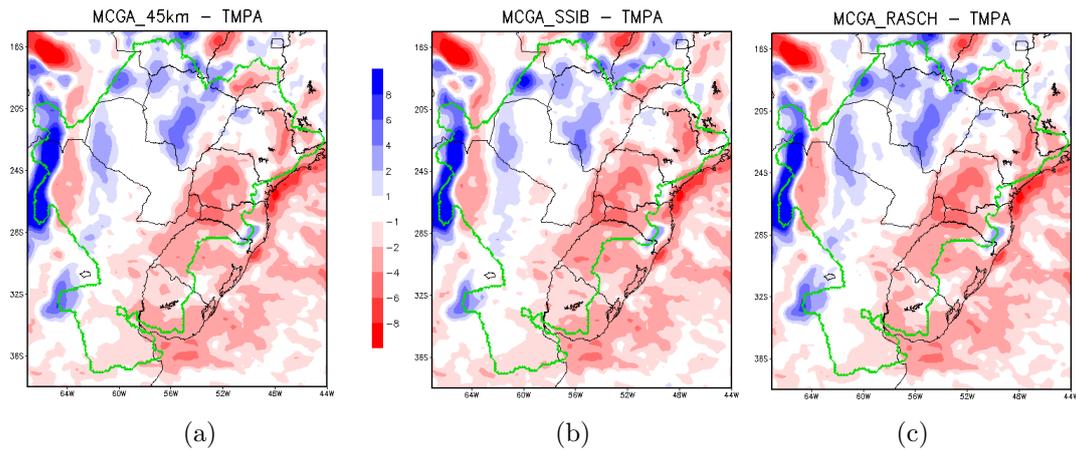


Figura 4.5 - Viés da Precipitação (mm/dia) para: a) expCTRL, b) expSSIB e c) expRASCH.

representações físicas em seus códigos, não produz impacto substancial na previsão da precipitação para esta região. Esta conclusão fica mais evidente na Figura 4.6a, onde o viés médio apresenta praticamente os mesmos valores para todos os experimentos e em todos os horários de integração. Na figura do RMSE (Figura 4.6b), podemos destacar uma leve vantagem para o expSSIB nas previsões para 24h e 48h em relação ao expCTRL e uma pequena desvantagem para o expRASCH entre 72h e 120h de previsão.

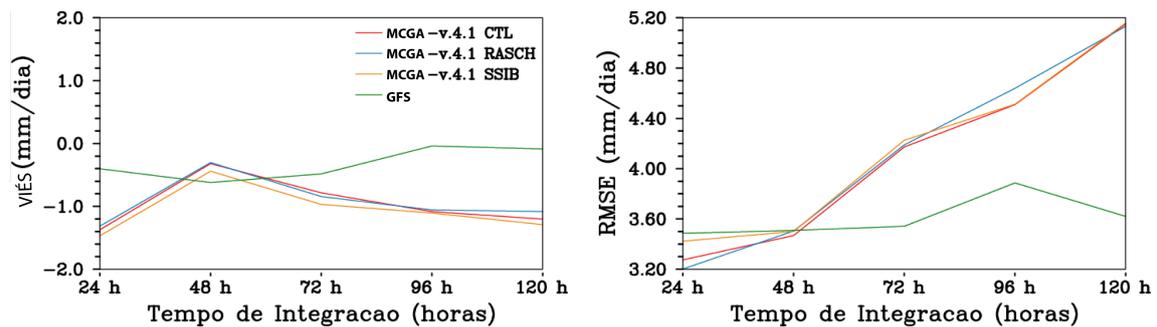


Figura 4.6 - Viés médio da precipitação (mm/dia) para expCTRL (vermelho), expSSIB (amarelo), expRASCH (azul) e GFS (verde) e RMSE (mm/dia) para os mesmos dados.

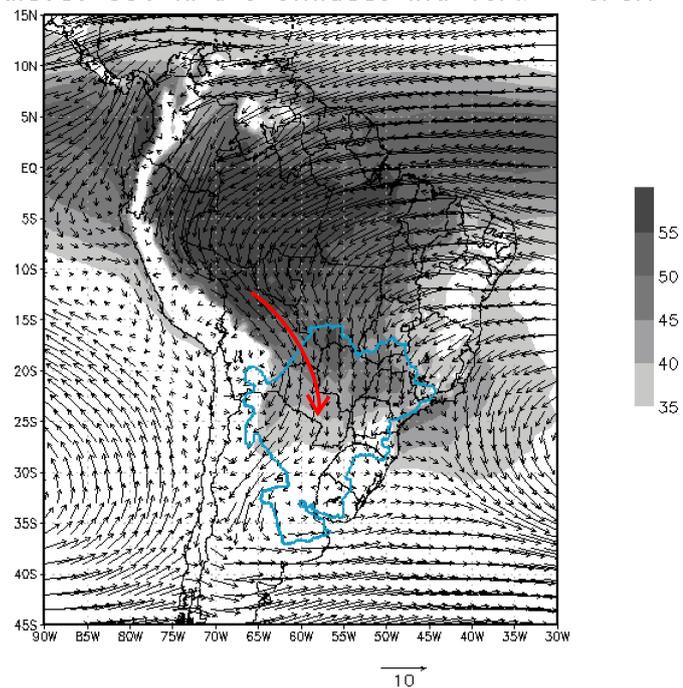
Os experimentos com os diferentes esquemas de parametrização tanto de superfície quanto de microfísica mostraram resultados pouco relevantes para o problema da falta de precipitação prevista pelo MCGA. É possível que testes com outros esquemas possam produzir melhores resultados, bem como testes com outras parametrizações, por exemplo, radiação ou CLP. Entretanto, os resultados dos experimentos propostos para este trabalho podem sugerir que falhas nas representações físicas dos processos de formação de nuvem e precipitação ou nas trocas de calor e umidade no solo não sejam as principais causas deste erro nas previsões.

4.3 Jatos de Baixos Níveis

Para uma análise da circulação e transporte de umidade específica sobre a América do Sul representados pelo MCGA e seu impacto na previsão da precipitação sobre a Bacia do Prata, foram plotados os campos de circulação atmosférica média no período de estudo no nível de 850 hPa e também da umidade específica integrada na vertical entre a superfície e 300 hPa para 5 dias de previsão, e são comparados com dados de CFSR (Figura 4.7a-b).

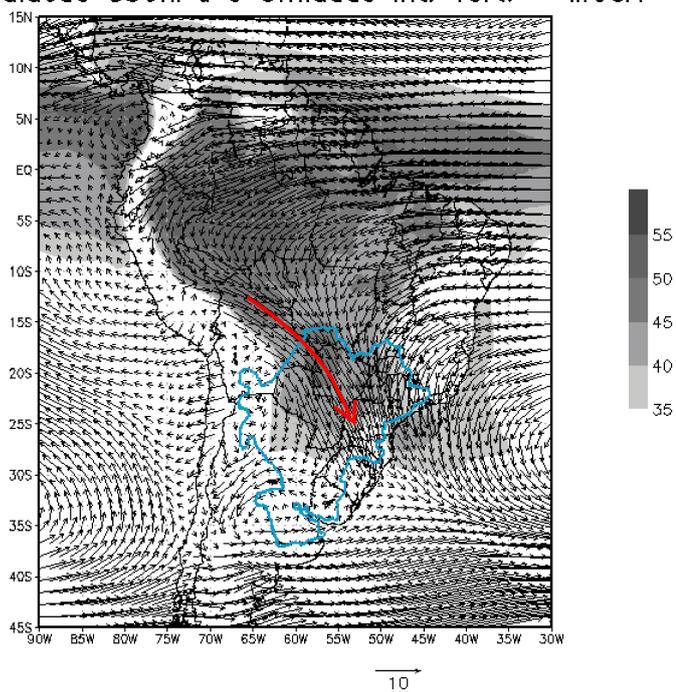
Esta figura mostra um padrão de circulação muito bem simulado pelo MCGA quando

Circulação 850 hPa e Umidade Int. Vert. – CFSR



(a)

Circulação 850hPa e Umidade Int. Vert. – MCGA



(b)

Figura 4.7 - Circulação em 850 hPa (m/s) e umidade específica (g/kg) integrada na vertical (sombreado) com dados de a) CFSR e b) MCGA para DJF/2012-2013. Bacia do Prata destacada em azul.

comparado ao CFSR. No entanto, pequenas diferenças na umidade específica sobre a Amazônia, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e no Oceano Atlântico adjacente à costa brasileira podem ser destacadas, mostrando um cenário um pouco mais seco para o MCGA do que a reanálise. Um outro detalhe que pode ser relevante, é a pequena diferença na direção dos ventos na região da saída do JBN, ou melhor, na "entrada" da região da Bacia do Prata. As Figuras 4.7a-b mostram que na reanálise os ventos são mais de norte, levando umidade para quase toda a metade norte da Bacia do Prata, enquanto no MCGA, os ventos são majoritariamente de noroeste.

Afim de se analisar com mais detalhes os períodos com a presença de JBN, foram feitas as mesmas figuras, mas apenas para os dias que foram identificados como tal (Figura 4.8a-b). Para esta identificação, como já descrito no capítulo 3 deste trabalho, foi utilizada a metodologia de Bonner (1968) adaptada para a América do Sul e aplicada aos dados de CFSR no período de DJF/2012-2013. Os dias com pelo menos um dos quatro horários sinóticos que obedeceram ao critério 1 de Bonner, foram considerados como sendo dias com a presença de JBN. No total, foram identificados 9 dias de JBN no período de estudo, sendo eles 11, 18 e 26 de dezembro de 2012, 01, 05, 06 e 08 de janeiro de 2013 e 13 e 17 de fevereiro de 2013.

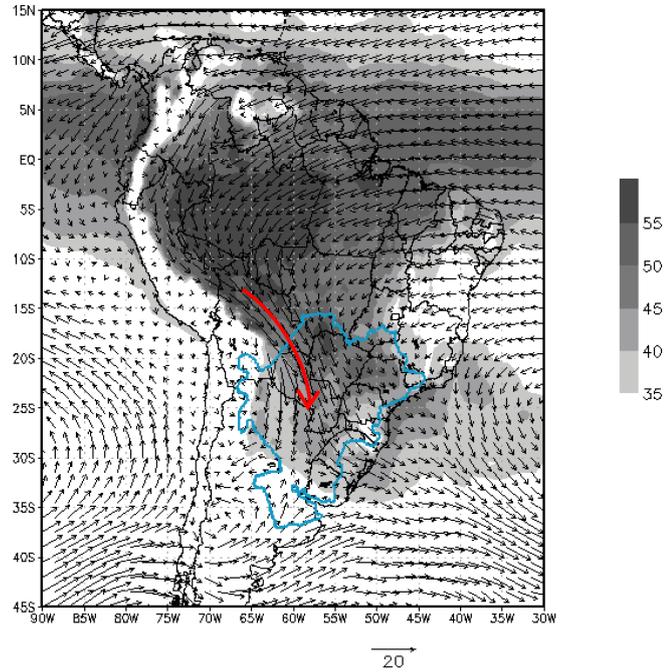
As Figuras 4.8a-b reproduzem praticamente as mesmas condições das Figuras 4.7a-b, porém com uma quantidade maior e mais espalhada de umidade específica sobre a região de estudo. Para os dias com JBN, o MCGA parece ter subestimado um pouco mais a umidade sobre a Bacia do Prata quando comparado ao trimestre DJF/2012-2013.

Embora hajam algumas diferenças nos campos de circulação em baixos níveis e na umidade específica entre MCGA e CFSR sugerindo que erros na simulação dos JBN na América do Sul possam estar contribuindo para a subestimativa de precipitação na região, não há, a partir destes resultados, como se afirmar que esta possa ser, conclusivamente, uma das causas. Para isto, seria necessário uma análise mais robusta, com maior número de casos de dias com JBN.

Para uma análise do impacto dos JBN na precipitação sobre a região de estudo, também foram plotados Diagramas Hovmoller do vento meridional na latitude 20°S (região de saída do JBN) e em 850 hPa (Figura 4.9a) e da precipitação média entre as latitudes 36°S e 24°S (Figura 4.9b), todos eles para o período de estudo DJF/2012-2013 e entre as longitudes de 70°W e 45°W.

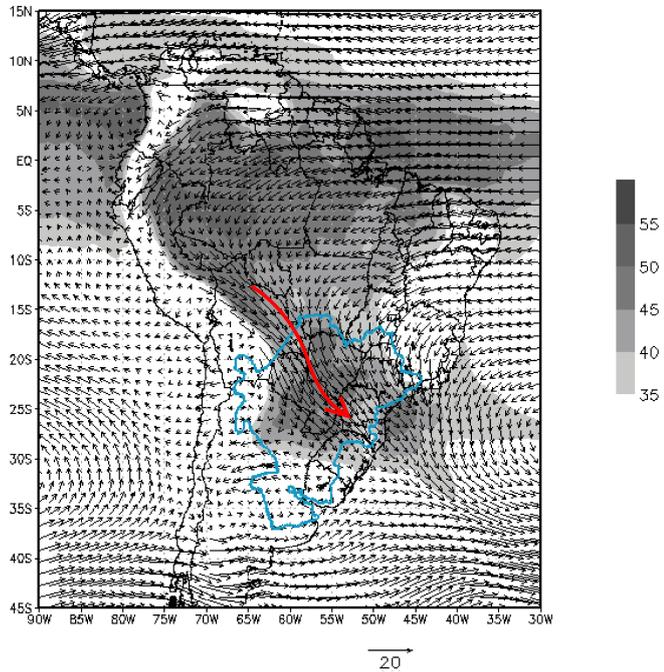
A Figura 4.9b mostra claramente que o modelo subestimou a precipitação durante

Circulação 850 hPa e Umidade Int. Vert. – CFSR



(a)

Circulação 850hPa e Umidade Int. Vert. – MCGA



(b)

Figura 4.8 - Composição dos dias identificados com a presença de JBN. Circulação em 850hPa (m/s) e umidade específica (g/kg) integrada na vertical para a) CFSR e b) MCGA. Bacia do Prata destacada em azul.

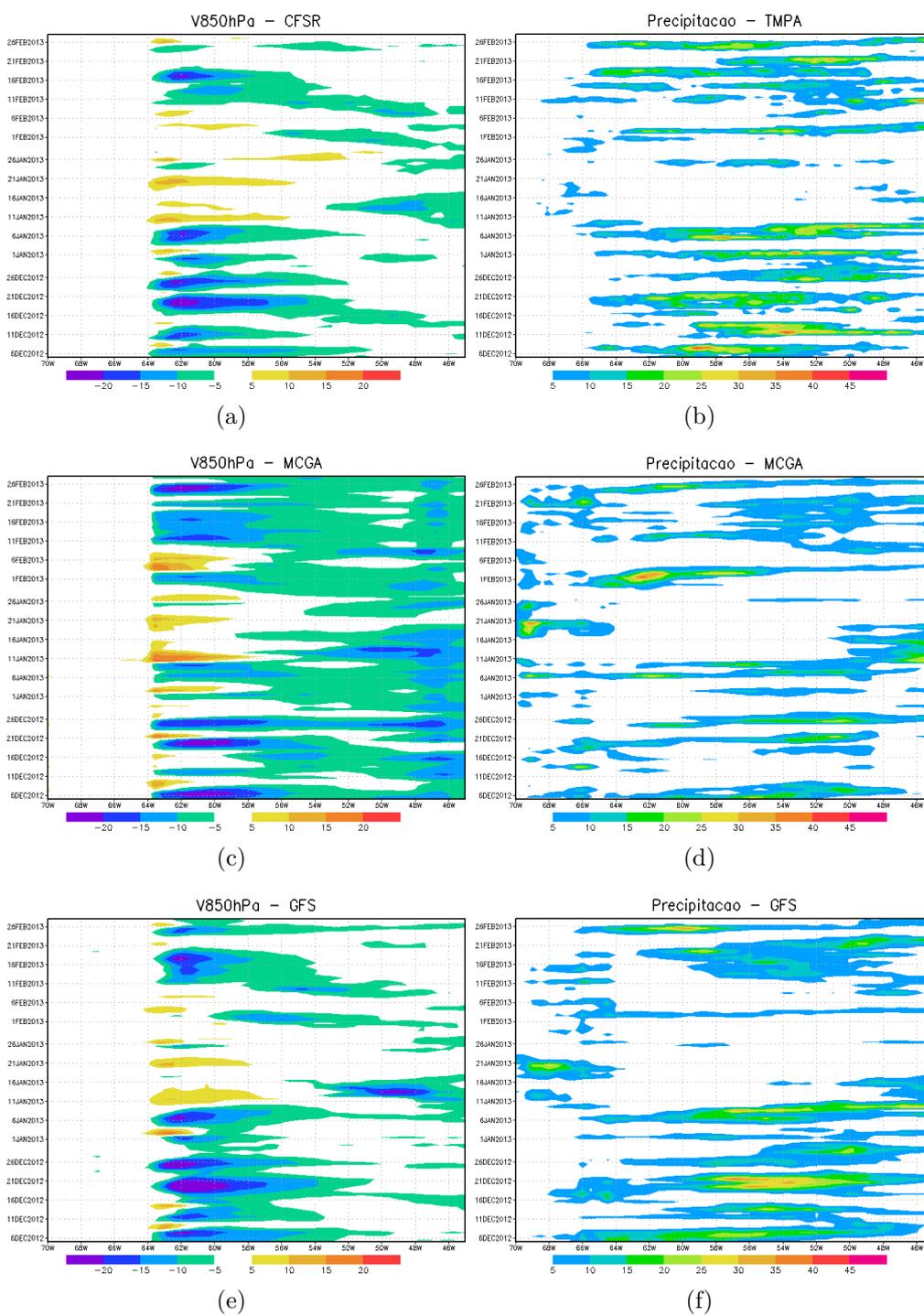


Figura 4.9 - Diagrama Hovmöller para vento meridional em 850 hPa (m/s) para a) CFSR, c) MCGA e e) GFS; e precipitação (mm/dia) para b) TMPA, d) MCGA e f) GFS

o mês de dezembro e um pouco menos no mês de fevereiro. O GFS também subestimou a precipitação, mas menos, em comparação com o MCGA. Interessante notar que estes deficit de precipitação em alguns períodos estiveram associados a menor intensidade do vento meridional de norte, por exemplo, durante a última semana de dezembro e primeira semana de janeiro. Porém, durante a primeira semana de dezembro apresentou comportamento contrário, havendo intenso vento meridional de norte (centrado em 60°W), mas sem muita precipitação no mesmo período. Uma característica conhecida do MCGA é o erro em superestimar os ventos de norte sobre a região da ZCAS, o que se pode observar na longitude 48°W - 46°W .

Estes resultados demonstram que nem todos os casos de falha na simulação de jatos estão relacionados com a falta de chuvas sobre a Bacia do Prata, o que sugere que o problema da subestimativa da precipitação do MCGA não necessariamente esteja relacionada a fatores locais. No seguinte item são explorados fatores remotos, com ênfase em bloqueios.

4.4 Bloqueios

Para a análise da previsão de bloqueios pelo MCGA em comparação aos dados de CFSR, foi utilizado um índice adaptado para o HS calculado utilizando-se a metodologia de [Diao et al. \(2006\)](#), que consiste na identificação de regiões bloqueadas através de um índice baseado em gradientes de altura geopotencial em 500 hPa.

A Figura 4.10 mostra a distribuição meridional dos eventos de bloqueio durante o período de estudo. Este resultado está em concordância com diversos trabalhos, por exemplo [Marques \(1996\)](#), que afirmam serem as regiões entre Austrália e Nova Zelândia (longitude 180°), Oceano Atlântico (entre 10°W e 70°W), Oceano Índico (70°E a 120°E) e uma quarta região, no sudeste do Oceano Pacífico, como sendo regiões preferenciais para a formação de bloqueios no HS. Foram selecionados casos com duração maior ou igual a 5 dias para serem considerados como evento de bloqueio neste trabalho. Estes casos estão destacados com as siglas B1 a B7 na Figura 4.10.

A comparação da Figura 4.10 e da Figura 4.9b (precipitação observada) sugere que a maior quantidade de chuva durante o mês de dezembro esteve associado a poucos eventos de bloqueios no Pacífico. Em contrapartida, em janeiro houve mais casos de bloqueios, mas com muito pouca chuva na região de estudo durante este mês. Seria necessário uma avaliação com um maior número de casos para se chegar a alguma conclusão sobre estas observações, identificando ou não uma relação entre estes dois eventos.

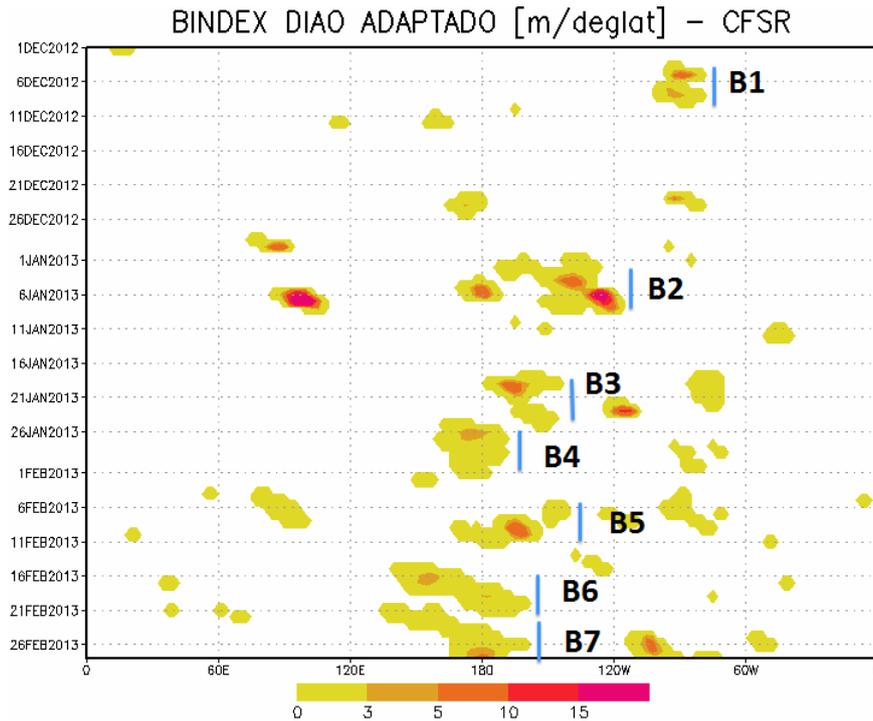


Figura 4.10 - Índice de bloqueio para o HS com dados de CFSR, para o período DJF/2012-2013, calculado a partir do Índice de Bloqueio de Diao et al. (2006) (BINDEX DIAO) adaptado para o HS. As siglas B1 a B7 representam casos de bloqueios com duração maior ou igual a 5 dias.

As Figuras 4.11a-d apresentam o mesmo Diagrama Hovmoller do índice de bloqueio da Figura 4.10, mas para os dados com MCGA (expCTRL) e com dados de GFS. Foram plotados os índices de bloqueio calculados sobre os dados de previsão para 24h e para 120h.

As Figuras 4.11e-h representam a diferença entre o índice de bloqueio calculado pelos modelos e o calculado com dados de CFSR. Os valores representam a intensidade dos bloqueios ou das diferenças nas previsões dos bloqueios e estão em $m/^{\circ}$ de latitude.

Interessante salientar que para previsões de 24h (Figura 4.11a e Figura 4.11c), tanto GFS quanto MCGA, apresentaram resultados muito parecidos com os dados da reanálise (Figura 4.10). Para 120h (Figura 4.11b e Figura 4.11d), ambos os modelos apresentam degeneração nas previsões dos bloqueios. O MCGA apresentou erros mais significativos, sobretudo sobre o mês de fevereiro, período com mais casos de bloqueios identificados e de maiores intensidades e durações, que pode ser melhor observado na Figura 4.11e-h.

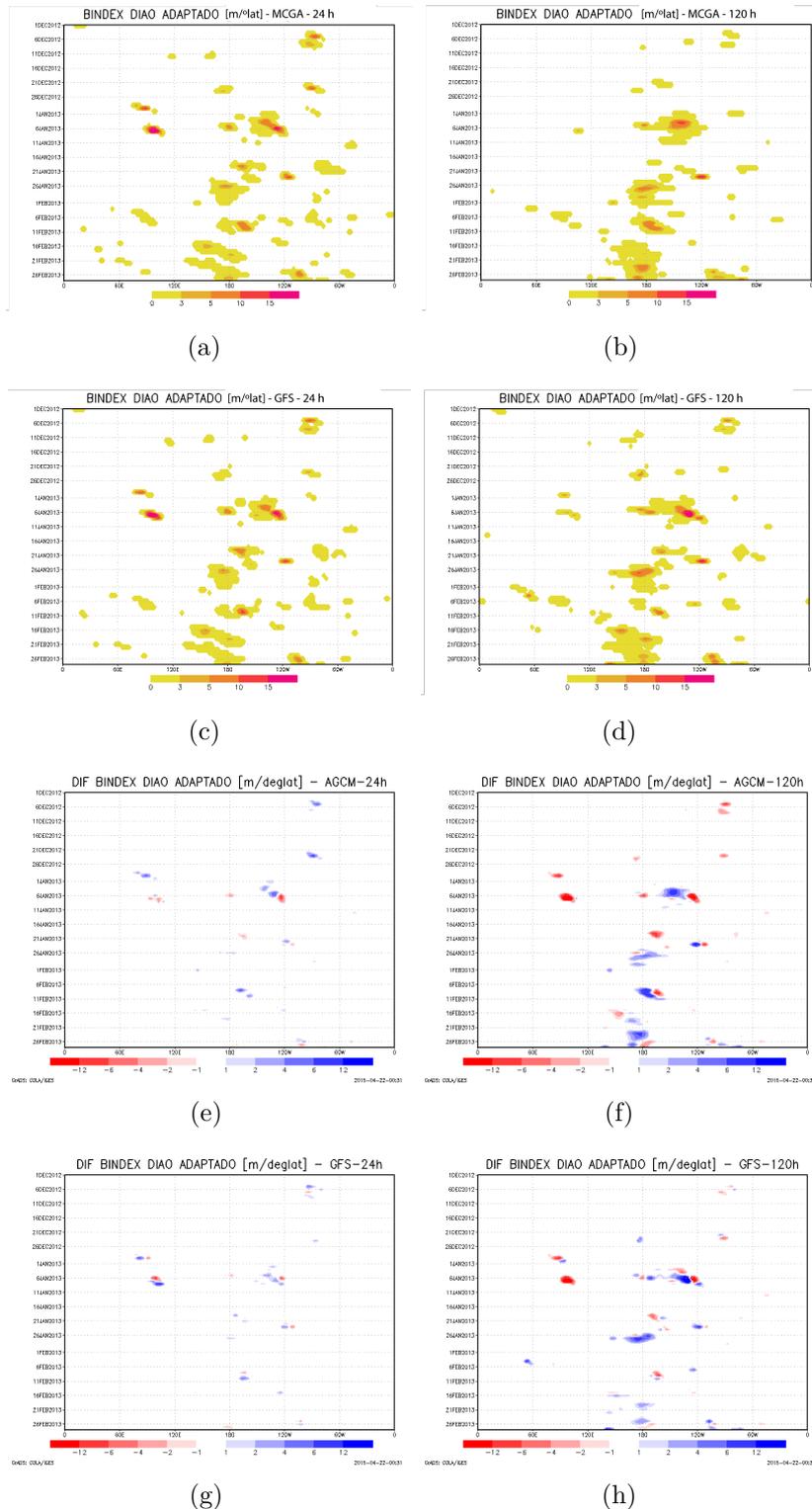


Figura 4.11 - Índice de bloqueio para HS com dados de a) MCGA 24h, b) MCGA 120h, c) GFS 24h e d) GFS 120h; e) diferença entre o índice de bloqueio calculado para modelos e CFSR para e) MCGA 24h, f) MCGA 120h, g) GFS 24h e h) GFS 120h

Para melhor entender o comportamento dos bloqueios e possíveis efeitos na precipitação sobre a Bacia do Prata, foram resumidos os 7 casos destacados na Figura 4.10 com o detalhamento (a seguir) dos campos médios de precipitação, altura geopotencial em 500 hPa, anomalia de vento meridional em 200 hPa, localização dos bloqueios e circulação em 500 hPa nos períodos considerados bloqueados. Na Tabela 4.1 constam as informações sobre os períodos, localização dos bloqueios, viés médio de precipitação na área de estudo e informações sobre a propagação de ondas à oeste da América do Sul para estes 7 casos.

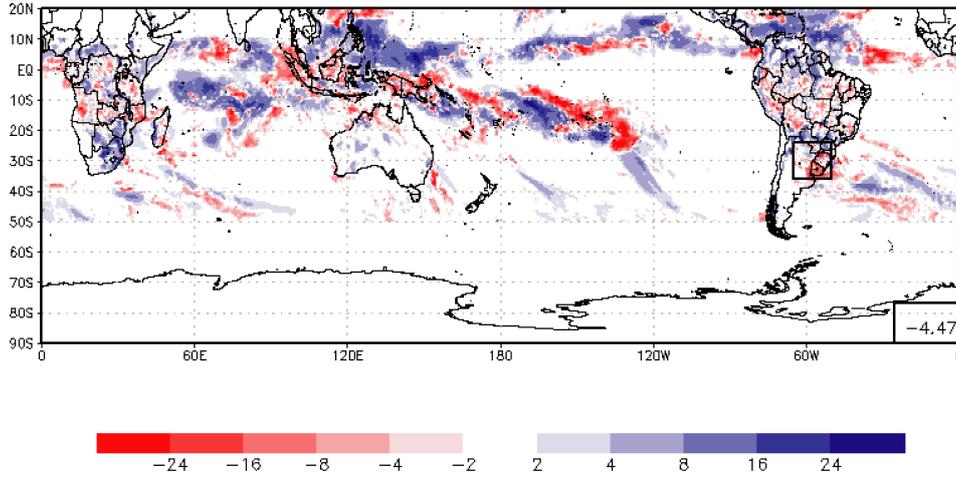
Tabela 4.1 - Bloqueios em 500 hPa, vieses de precipitação sobre a Bacia do Prata e propagação de ondas em 200 hPa. As regiões analisadas são: Oceano Indico (OI), Pacífico Oeste (PO), Pacífico Central (PC) e Pacífico Leste (PL)

CASO	PERÍODO	VIÉS MCGA	BLOQ MCGA	ONDAS MCGA	VIÉS GFS	BLOQ GFS	ONDAS GFS
B1	7 a 11 dez	-4,47	PL x	PL x	-0,79	PL ok	PL ok
B2	1 a 8 jan	-3,52	OI x PC x PO x	OI x	-1,78	OI x PC ok PO ok	ok
B3	18 a 22 jan	-1,14	PO x	ok	0,75	PO ok	ok
B4	24 jan a 2 fev	0,91	PO ok	ok	-0,93	PO ok	ok
B5	07 a 11 fev	-1,61	PO ok	ok	-1,80	PO ok	ok
B6	16 a 20 fev	-2,46	PO ok	ok	0,35	PO ok	ok
B7	21 a 28 fev	-0,51	PO ok PC ok	OI x	-0,27	PO ok PC ok	ok

A análise da Tabela 4.1 mostra que, nos casos onde o modelo conseguiu prever os bloqueios (indicados pela localização e "ok" na coluna "BLOQ. MCGA"), como os casos B4, B5, B6, e B7, não existe uma clara relação com o deficit de chuva sobre a Bacia do Prata. Comparando-se, por exemplo, o caso B4 (em que houve um excesso de chuva), com o caso B6 (no qual houve deficit de chuva), sugere que, ao menos para a previsão de 5 dias, os bloqueios que se formam nos Oceanos PO e PC não causam impacto na precipitação sobre a Bacia do Prata. Os casos em que houveram bloqueios e deficit de chuva maiores do que 2 mm/dia na região de estudo (casos B1, B2 e B6 da Tabela 4.1), foram analisados em maiores detalhes na tentativa de se encontrar a possível origem da subestimativa da precipitação.

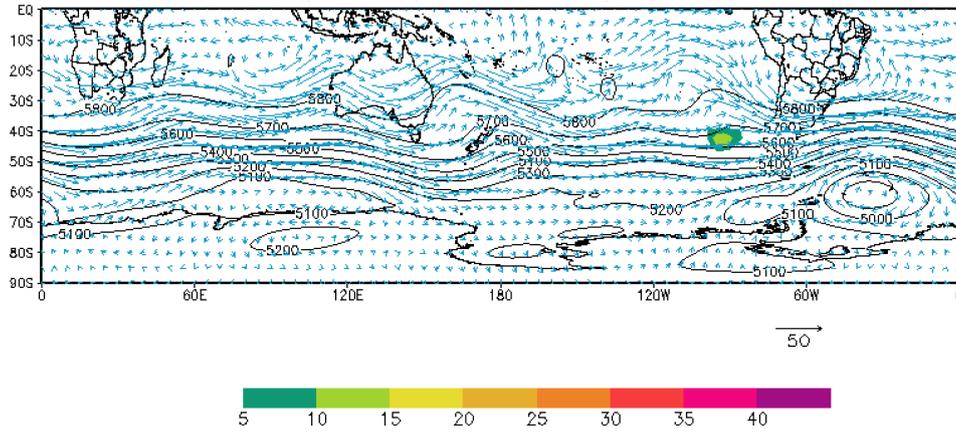
Durante o caso B1, a subestimativa da chuva foi de -4.47 mm/dia (Figura 4.12a). Durante este período, o modelo não foi capaz de simular o bloqueio (sombreado colo-

MCGA-120h - VIÉS Precipitação (mm/dia) - média CASO



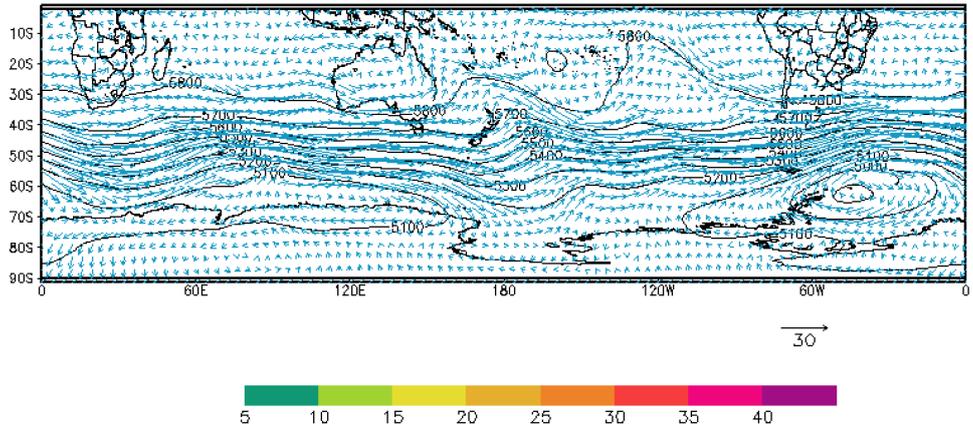
(a)

CFSR - BINDEX (sombreado), Altura Geop. 500hPa e UV 500 - média CASO 1



(b)

MCGA-120h - BINDEX (somb.), Altura Geop. 500hPa e UV 500 - média CASO 1



(c)

Figura 4.12 - Caso B1 de bloqueio sobre o PL. a) diferença da precipitação entre TMPA e MCGA (mm/dia), circulação (m/s) e altura geopotencial (mgp) em 500 hPa para b) CFSR e c) MCGA. Área colorida em (b) indica a região do bloqueio.

rido) no Pacífico Leste (Figura 4.12c) em comparação com a reanálise (Figura 4.12b).

A Figura 4.12b, mostra uma circulação anticiclônica em 500 hPa sobre a região do Prata associado ao bloqueio ao oeste do Chile. Em 200 hPa também é observado esta circulação (figura não incluída), o que estaria favorecendo a ocorrência de chuvas sobre a região de estudo. O MCGA apresenta deficiência na representação desta circulação.

A análise dos ventos meridionais durante este período (Figura 4.9a) mostrou que a subestimativa da chuva na Bacia do Prata não estava associada ao JBN. Este resultado aponta para a falha em representar o bloqueio sobre o Pacífico Leste como provável causa da subestimativa da precipitação durante o período de 7 a 11 de dezembro.

As Figuras 4.13a-b mostram que os bloqueios sobre os Oceanos Índico e Pacífico Oeste e Central não foram bem simulados pelo MCGA. Devido a falha do modelo em simular o bloqueio sobre o Pacífico Central, o cavado em 500 hPa sobre a região do Prata também não foi simulado.

A análise dos ventos meridionais em baixos níveis durante este período (Figura 4.9) mostra que a subestimativa da chuva na Bacia do Prata também esteve associada a um erro do modelo em simular os ventos de norte. Este resultado sugere que a falta de chuva no caso B2 pode estar relacionada a uma combinação de erros, envolvendo o bloqueio no Pacífico Central e ventos de norte-sul ao leste dos Andes.

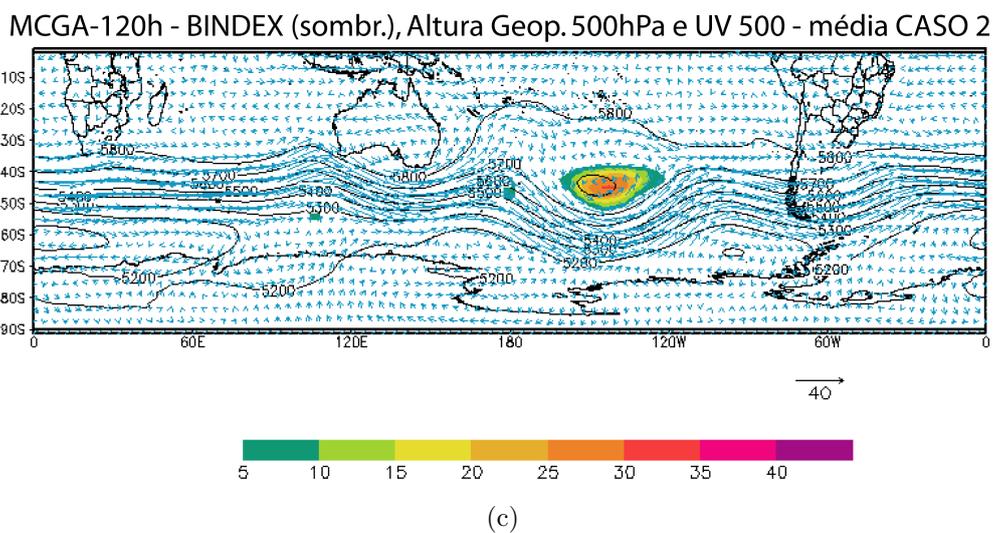
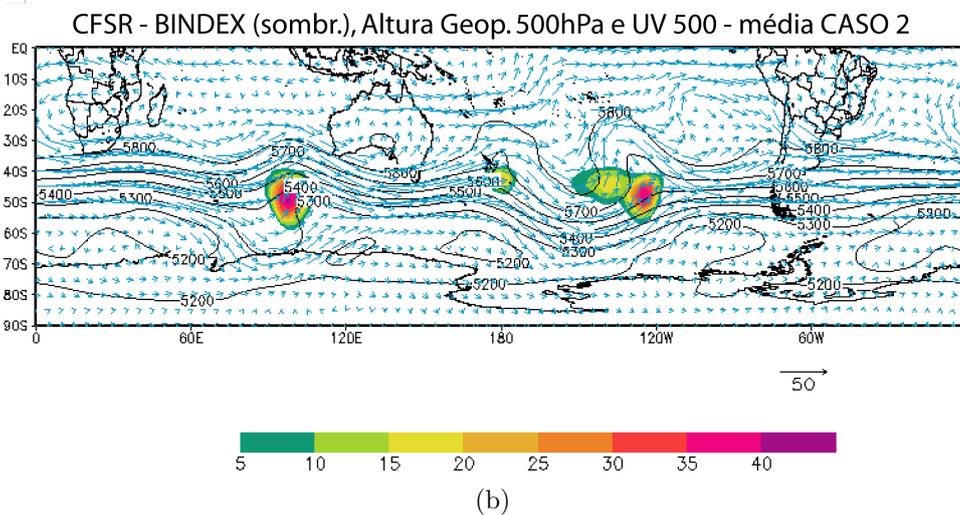
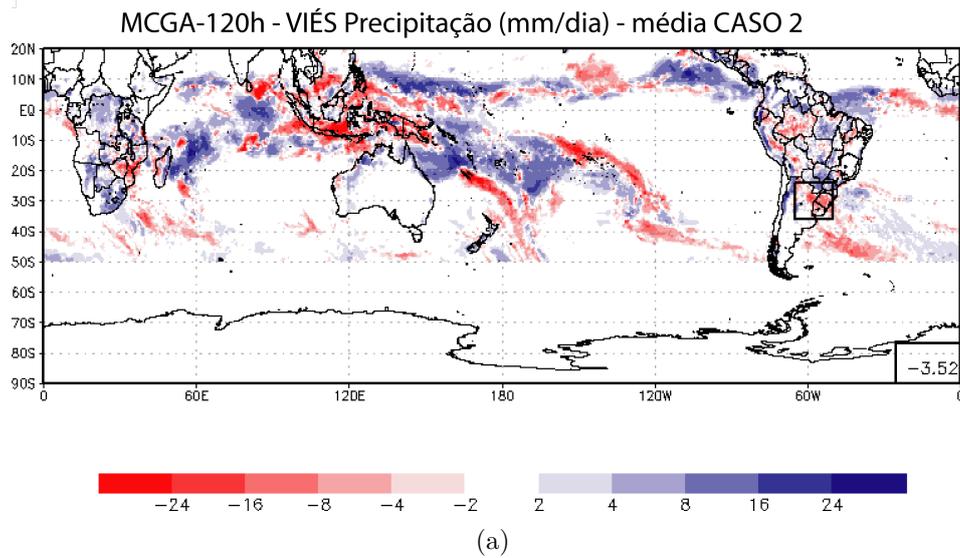


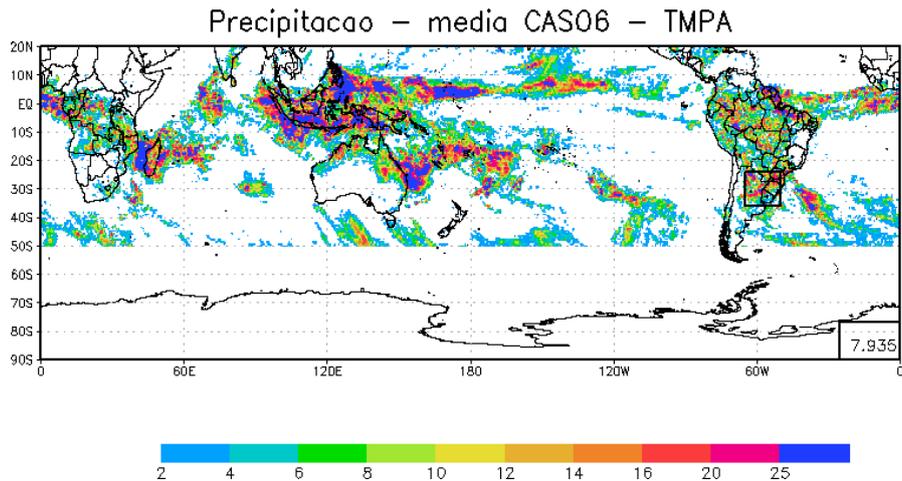
Figura 4.13 - Caso B2 de bloqueio triplo. a) diferença da precipitação (mm/dia) entre TMPA e MCGA, circulação (m/s) e altura geopotencial (mgp) em 500 hPa para b) CFSR e c) MCGA. Área colorida em (b) indica a região do bloqueio.

O caso B6 foi também analisado para o GFS afim de se investigar o motivo pelo qual este modelo apresenta menor erro sobre a região do Prata em comparação ao MCGA para este caso. O GFS teve um bom desempenho, apresentando um erro na precipitação muito próximo de zero. A Figura 4.14 mostra a precipitação observada e simulada pelos modelos, assim como o viés médio para a área de estudo. A Figura 4.15 mostra a distribuição espacial dos bloqueios e a Figura 4.16, a anomalia de vento meridional em 200 hPa.

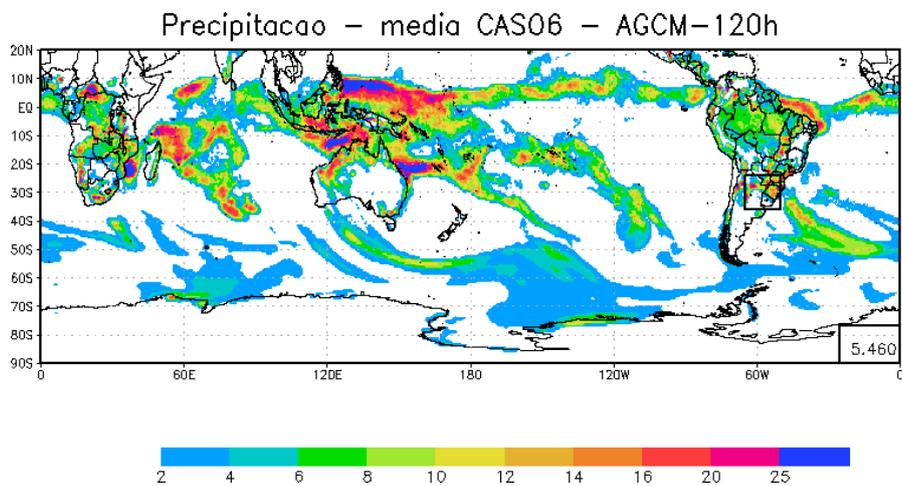
Por vezes, além de se identificar o evento, é preciso diferenciar bloqueios que ocorrem espacialmente muito próximos um do outro, o que pode ser um pouco complicado, pois os eventos podem ser agrupados no tempo e no espaço. O caso B6 apresentou dois bloqueios muito próximos, que foram muito bem simulados pelo GFS (Figura 4.15c). O MCGA, no entanto, não conseguiu ter este mesmo desempenho (Figura 4.15b). Apesar disto, a posição do núcleo deste evento parece ter sido bem representada, e o campo de geopotencial parece estar de acordo com a reanálise e não ter grandes perturbações, principalmente próximo a região de estudo.

Para este caso e com estes resultados, fica difícil afirmar qualquer relação entre a ocorrência destes bloqueios e o sucesso ou falha dos modelos em representar a precipitação sobre a Bacia do Prata. O trem de ondas que se estabeleceu desde o oeste da Austrália até o Oceano Atlântico, em geral, foi bem representados pelos dois modelos, com uma diferença: o vento meridional sul-norte em 200 hPa sobre a Argentina é mais intenso no GFS (Figura 4.16c) do que no MCGA (Figura 4.16b), e mais próximo do observado (Figura 4.16a).

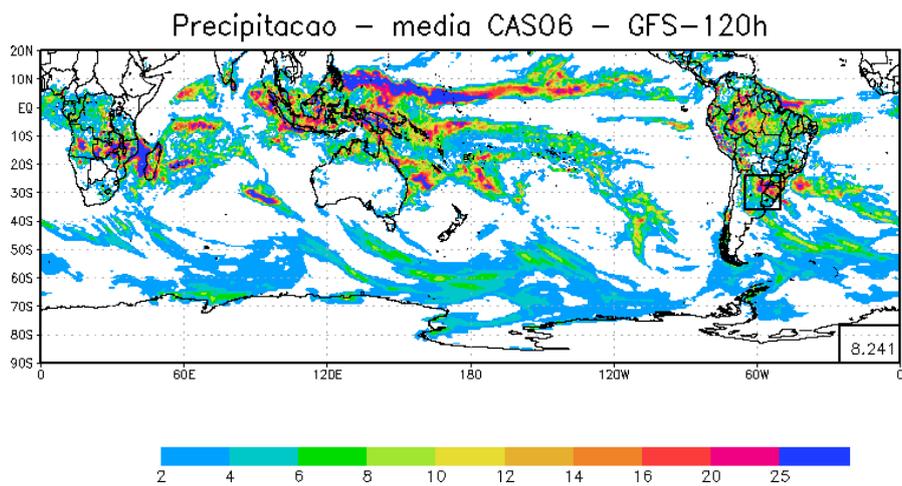
Quando analisada a intensidade dos ventos em baixo níveis para este período na reanálise (Figura 4.9), observa-se ventos de norte-sul mais intensos ao leste dos Andes, com máxima intensidade no dia 17 de fevereiro. Estas características são bem simuladas pelo GFS, ao contrário do MCGA, que subestima. Estes resultados sugerem que a causa da subestimativa da precipitação na região do Prata durante o caso B6 pode estar associado a uma falha na simulação do JBN ao leste dos Andes.



(a)



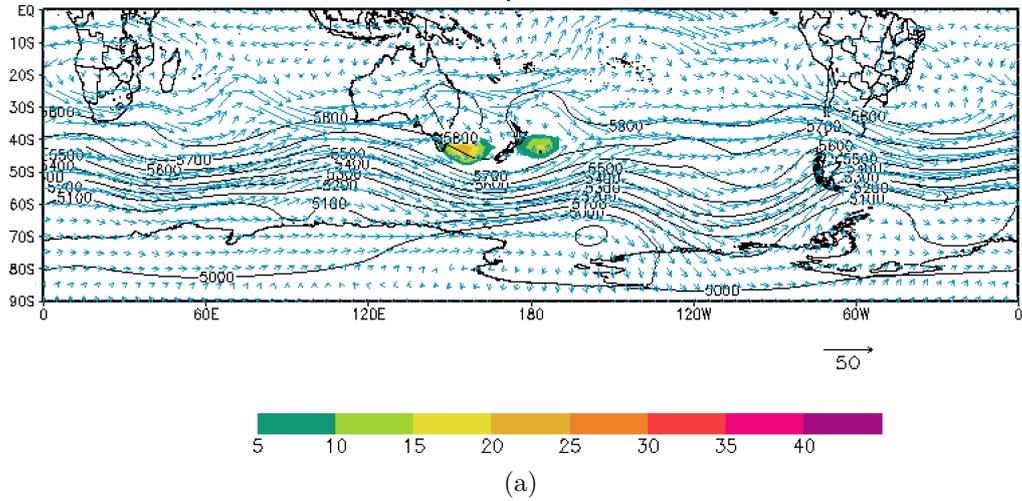
(b)



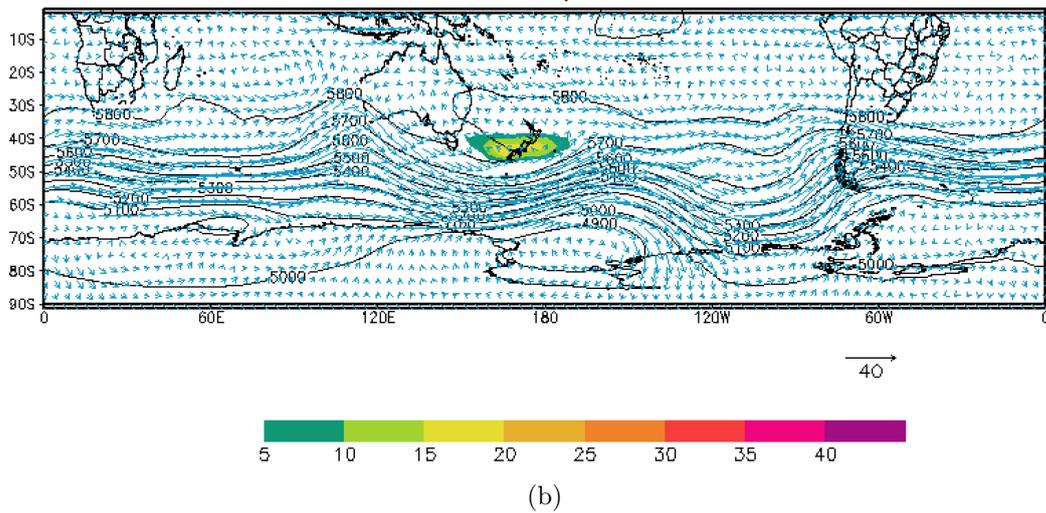
(c)

Figura 4.14 - Precipitacao (mm/dia) durante o caso B6. a) TMPA, b) MCGA e c) GFS.

CFSR - BINDEX (somb.), Altura Geop. 500hPa e UV 500hPa- média CASO 6



MCGA-120h - BINDEX (somb.), Altura Geop. 500hPa e UV 500hPa- média CASO 6



GFS - BINDEX (somb.), Altura Geop. 500hPa e UV 500hPa- média CASO 6

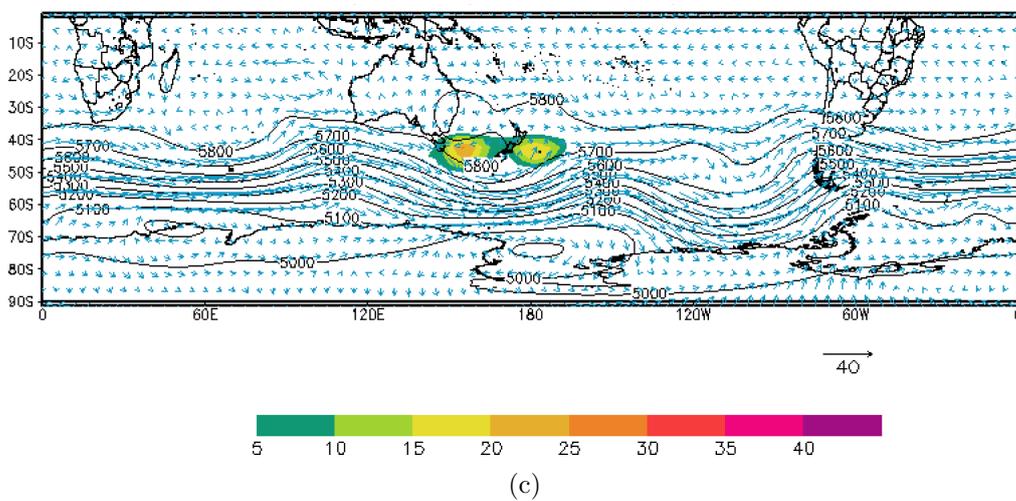


Figura 4.15 - Caso B6 de bloqueio sobre o Pacífico Oeste. a) CFSR, b) MCGA e c) GFS.

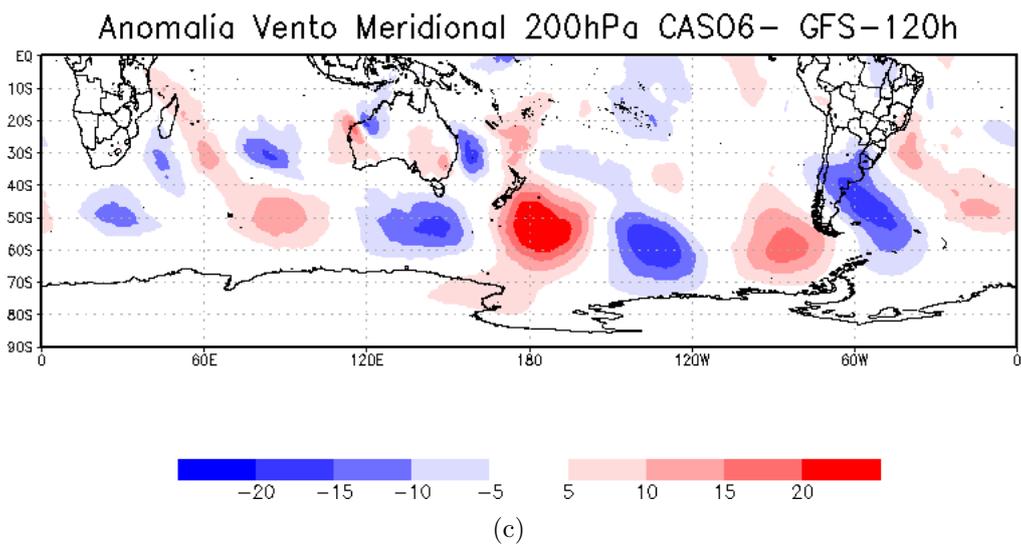
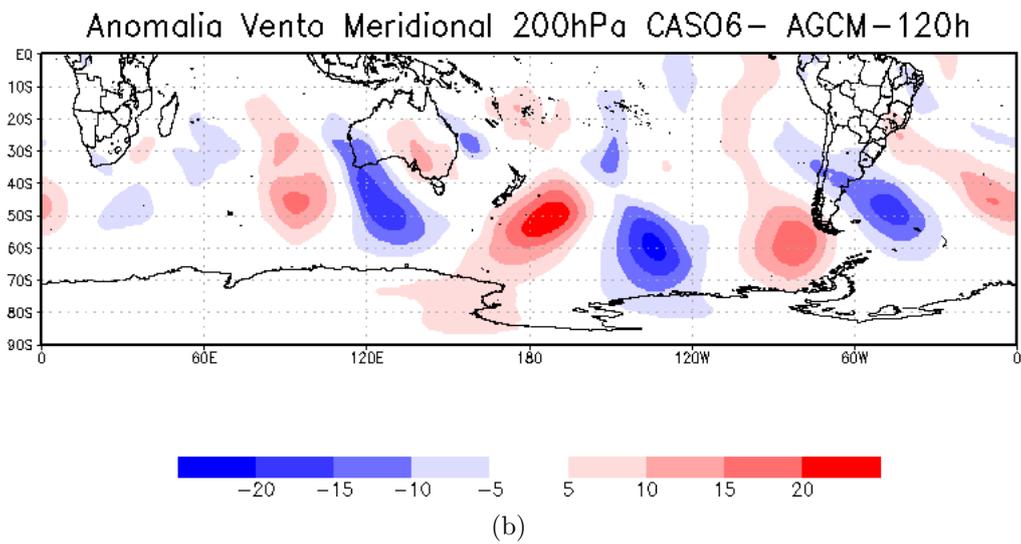
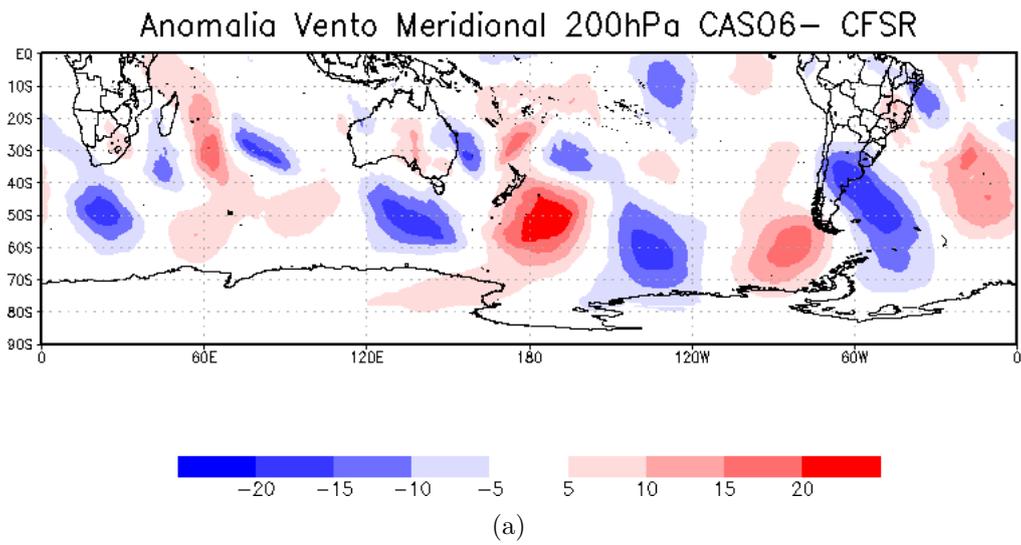


Figura 4.16 - Anomalia de vento meridional (m/s) em 200 hPa durante o caso B6. a) CFSR, b) MCGA e c) GFS.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de investigar possíveis causas da subestimativa da precipitação pelo MCGA do CPTEC/INPE sobre a região da Bacia do Prata, foram realizados experimentos e conduzidas análises de campos de precipitação, altura geopotencial, circulação em diferentes níveis da atmosfera e em eventos meteorológicos simulados pelo MCGA (JBN e bloqueios) em comparação a dados de satélite e reanálises. Para o problema apresentado, foram propostas cinco hipóteses que, isoladas ou em conjunto, poderiam ser a causa para esta subestimativa. Cada uma das hipóteses foi descrita no capítulo 3 deste trabalho. A seguir, serão apresentadas as sínteses dos resultados para estas hipóteses testadas, bem como as conclusões e sugestões de investigações futuras.

5.1 Conclusões

Afim de se verificar o efeito do aumento da resolução, foram feitas comparações entre a versão T299L64 (45 km) e a versão T666L64 (20 km). Para isto foram feitas integrações para 90 dias (DJF/2012-2013) com 1 a 5 dias de antecedência das previsões em ambas as previsões. Os dados obtidos com a versão com resolução horizontal de 45 km do MCGA, apresentada como expCTRL e com a versão com 20 km de resolução horizontal, chamado de exp20km, forneceram campos de precipitação médio na área da Bacia do Prata e os resultados mostraram poucas diferenças entre os experimentos. O exp20km apresentou maior detalhamento da topografia e, conseqüentemente, da distribuição da precipitação, porém tendeu a superestimar a precipitação nas regiões montanhosas como a Serra do Mar e a região do Alto da Bacia do Prata. Na análise objetiva, o experimento com aumento da resolução não trouxe melhorias significativas na previsão da precipitação, uma vez que ambos os experimentos apresentaram a mesma evolução dos erros durante os tempos de integração (de 1 a 5 dias) e diferenças mínimas, menores do que 0,2 mm/dia no viés médio para o período de estudo.

O próximo passo consistiu em verificar mudanças na física do modelo. Para tal, foram feitas integrações utilizando-se diferentes configurações do MCGA. Os resultados foram agrupados para as duas hipóteses referentes aos testes com a parametrização de superfície e com a microfísica. O expCTRL para esta análise foi o mesmo do item anterior. O expCTRL foi rodado contendo a parametrização de superfície IBIS e microfísica Morrison-Gettleman. O expSSIB possui a mesma configuração do expCTRL, porém com parametrização de superfície SSIB. Da mesma maneira para o expRASCH, com a mesma configuração do expCTRL, exceto pela micro-

física alterada pela Rasch-Kristjánsson. Os experimentos resultaram em melhorias ainda menos significativas do que o experimento sobre a resolução. Era esperado que alguma alteração na precipitação decorrente destas substituições feitas na física do modelo aparecessem nos campos de precipitação média ou na avaliação objetiva. Contrariando a expectativa, os experimentos apresentaram diferenças mínimas nos resultados entre si, sugerindo não ser esta a causa da subestimativa da precipitação. Tanto para este item como no anterior, os resultados objetivos foram comparados com dados gerados pelo modelo GFS, e este mostrou possuir melhor qualidade em todos os tempos de integração, sendo uma boa estratégia comparar outros campos nos itens seguintes para se ter uma ideia da possível causa da falha do MCGA.

Uma hipótese sugerida foi que uma das causas da falha na previsão de chuva pelo MCGA fosse a má representação da circulação em baixos níveis sobre a América do Sul. Para verificar esta hipótese, foram comparados os campos médios de circulação em 850 hPa para o MCGA e o CFSR em todo o período de estudo (DJF/2012-2013). Os resultados mostraram um pouco menos de umidade específica sobre a Bacia do Prata simulada pelo MCGA quando comparada ao CFSR, porém apresentou uma boa representação da circulação média em 850hPa. O mesmo se pode concluir para o período identificado como tendo a presença do JBN, para os quais foi feita uma composição média do mesmo campo de circulação em 850 hPa e umidade específica integrada entre os níveis de 300 hPa e a superfície. Também foram feitos Diagramas Hövmoller para todo o período para as variáveis vento meridional na região de saída do JBN e precipitação média na área de estudo entre as longitudes 45°W e 70°W. O resultado mais evidente foi a subestimativa da precipitação pelo MCGA centrada em 54°W e mais intensa nos meses de dezembro e fevereiro. Alguns casos de falha na previsão de chuva puderam ser relacionados a falhas na simulação do vento meridional enquanto outros parecem não ter relação alguma. Não se chegou a uma conclusão definitiva a respeito desta hipótese, mas aparentemente a simulação dos JBN e dos ventos meridionais de sul na região da Bacia do Prata não é a causa única do problema apresentado neste trabalho.

Por fim, na tentativa de se achar um fator remoto na causa da subestimativa da precipitação na Bacia do Prata, investigou-se a previsão de eventos de bloqueios no HS pelo MCGA. Para isto, utilizou-se um índice de bloqueio capaz de indicar, além da localização longitudinal do bloqueio e sua intensidade, como outros índices fazem, a posição latitudinal do evento. Estes resultados possibilitaram a conclusão de que, no geral, para as previsões com 24h de antecedência, o MCGA consegue prever a posição, duração e intensidade dos bloqueios tanto quanto o GFS o faz. Para

previsões com 120h, entretanto, ambos os modelos passam a apresentar degeneração na simulação dos bloqueios, com maior desvantagem para o MCGA em comparação ao GFS. Na análise de casos de 7 dos maiores eventos de bloqueios detectados pelo índice de bloqueio utilizado neste trabalho, foram encontrados resultados diversos, envolvendo falhas maiores na previsão de chuva pelo MCGA associadas ou não a casos de falha na previsão dos bloqueios. Concluindo, não foram encontradas evidências definitivas de que a causa da subestimativa na precipitação da Bacia do Prata advinha de falhas com a simulação nos bloqueios em qualquer região do HS.

Os resultados obtidos com esta dissertação possibilitaram descartar 3 de 5 hipóteses para a causa de uma das conhecidas falhas do MCGA sobre a América do Sul. Estas são: a) resolução horizontal, b) processos de superfície e c) microfísica de nuvens. As outras duas hipóteses (erros na simulação dos JBN ao leste dos Andes e bloqueios atmosféricos), entretanto, não puderam ser descartadas. Em geral, os casos de bloqueios na parte central e oeste do Oceano Pacífico e no Oceano Índico, não mostraram ter influência sobre a falta da chuva na região do Prata, ao menos em se tratando de previsões de 5 dias. Em relação a bloqueios ao oeste do Chile (Pacífico leste), pelo menos em um caso se constatou exercer influência. Por outro lado, com relação aos JBN, não foi em todos os casos estudados em que o MCGA falhou que houve deficit de chuva na região do Prata. Estes resultados sugerem que os erros do modelo em simular os eventos de JBN ao leste dos Andes e bloqueios ao oeste de Chile, podem afetar parcialmente a falta de chuvas sobre a região e estudo.

Observando-se que o modelo GFS obteve melhores resultados nas simulações de JBN e bloqueios sobre o oeste de Chile quando comparado ao MCGA, e o fato de que a maior diferença entre estes dois modelos está na coordenada vertical, sendo híbrida (pressão-sigma) no GFS e sigma no MCGA, apontam para a dinâmica do modelo como possível causa da subestimativa da precipitação sobre a região da Bacia do Prata. A coordenada vertical sigma utilizada no MCGA produz precipitação espúria sobre os Andes, o que pode consumir grande parte da umidade que vai da Amazônia para a Bacia do Prata, transportando assim, menos umidade para a região. Esta é uma hipótese que deve ser investigada no futuro.

Trabalhos como este podem ser úteis para os desenvolvedores do grupo de modelagem do MCGA do CPTEC/INPE, uma vez que ainda são poucos os trabalhos que exploram esta abordagem de investigação e solução de problemas na modelagem deste Centro.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugerimos fortemente que, primeiramente, deve-se efetuar a mudança da coordenada vertical no MCGA, de sigma para híbrida (pressão-sigma). Sugerimos também que os testes realizados neste trabalho sejam refeitos, mas para um período mais longo, com maior volume de dados afim de que se possa refutar as hipóteses apresentadas. O estudo sobre casos de JBN e bloqueios, por exemplo, devem ser feitos para um maior número de casos. E finalmente, é necessário um trabalho de validação para o HS do índice de bloqueio utilizado neste trabalho, o que poderá ser útil em estudos sobre bloqueios no HS e seus efeitos sobre o regime de precipitação sobre a América do Sul. Um estudo mais detalhado sobre as particularidades dos bloqueios em cada região do HS e para cada época do ano deve ser feito, bem como testar a sensibilidade do índice a diferentes latitudes de referência. Este trabalho está em fase de preparação pela autora desta dissertação e seus orientadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER, R. F.; HUFFMAN, G. J.; CHANG, A.; FERRARO, R.; XIE, P. P.; JANOWIAK, J. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). **Journal of hydrometeorology**, v. 4, p. 1147–1167, 2003. 28
- BARNES, E. A.; HARTMANN, D. L. Influence of eddy-driven jet latitude on north atlantic jet persistence and blocking frequency in cmip3 integrations. **Geophysical Research Letters**, v. 37, p. 1–5, 2010. 15
- BERBERY, E. H.; BARROS, V. R. The hydrologic cycle of the la plata basin in south america. **J. Hydrometeorol.**, v. 3, p. 630–645, 2002. 7, 8
- BERECIARTUA, P.; NOVILLO, M. G. **Thematic Planning Meeting on IAEA Activities in River Basin Management**. Vienna, Austria, 2002. 1
- BERRI, G. J.; INZUNZA, J. B. The effect of the low-level jet on the poleward water vapour transport in the central region of south america. **Atmospheric Environment. Part A. General Topics**, v. 27, n. 3, p. 335–341, 1993. 11
- BLACKADAR, A. K. Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 38, p. 283–290, 1957. 11
- BONNER, W. D. Climatology of the low level jet. **Monthly Weather Review**, v. 96, n. 12, p. 833–850, 1968. 11, 32, 39
- BROWNING, K. A.; PARDOE, C. W. Structure of low-level jet streams ahead of mid-latitude cold fronts. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 99, p. 619–638, 1973. 11
- CASARIN, D. P. **Um estudo observacional sobre os sistemas de bloqueio no hemisfério sul**. 82 p. Dissertação (Mestrado) — INPE, 1982. 15
- CHOU, M. D.; SUAREZ, M. J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) developed at Goddard Climate and Radiation Branch for Atmospheric Studies. **NASA Tech. Memo.**, v. 104606, n. 15, p. 851–875, 1999. 20
- COMITE INTERGUBERNAMENTAL COORDINADOR DE LOS PAISES DE LA CUENCA DEL PLATA. **La Cuenca del Plata**. 2013. Disponível em: <<http://www.cicplata.org>>. Acesso em: 11 set. 2014. 1

CORREIA, F. W. S.; ALVALA, R. C.; MANZI, A. O.; GIELOW, R.; KUBOTA, P. Y. Calibração do "simplified simple biosphere model - SSiB" para áreas de pastagem e floresta na Amazônia com dados do LBA. **Acta Amazonica**, v. 35, p. 273–288, 2005. 22

DAMIAO, M. **Bloqueios Atmosféricos sobre o Hemisfério Sul: Diagnóstico, impacto climático e mecanismos físicos associados**. 250 p. Tese (Doutorado) — Universidade de Lisboa, 2007. 15, 16

DIAO, Y.; LI, J.; LUO, D. A new blocking index and its application: Blocking action in the northern hemisphere. **Journal of climate**, v. 19, p. 4819–4839, 2006. xvi, 16, 32, 42, 43

DOUGLAS, M. W.; MADDOX, R. A.; HOWARD, K.; REYES, S. The mexican monsoon. **Journal of Climate**, v. 6, p. 1665–1677, 1993. 11

FIGUEROA, S. N. et al. **CPTEC Atmospheric General Circulation Model version 4**: performance for tropical rainfall forecasting and sensitivity to convective schemes and horizontal resolutions. São José dos Campos: INPE, 2015. Em preparação. 4, 20, 29

_____. **Impact of multi-closure convective parameterization on Tropical precipitation simulation by CPTEC AGCM Version 4.0 (AGCM-V.4.0)**. São José dos Campos: INPE, 2015. Em preparação. 5

FINDLATER, J. Interhemispheric transport of air in the lower troposphere over the western Indian Ocean. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 95, p. 400–403, 1969. 11

FOLEY, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, n. 4, p. 603–628, 1996. 20, 22, 23, 24

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over south america. **Monthly Weather Review**, v. 119, p. 1293–1302, 1991. 9

GERBER, E. P.; BALDWIN, M. P.; AKIYOSHI, H.; AUSTIN, J.; BEKKI, S.; BRAESICKE, P.; BUTCHART, N.; CHIPPERFIELD, M.; DAMERIS, M.; DHOMSE, S.; FRITH, S. M.; GARCIA, R. R.; GARNY, H.; GETTELMAN, A.; HARDIMAN, S. C.; KARPECHKO, A.; MARCHAND, M.; MORGENSTERN, O.; NIELSEN, J. E.; PAWSON, S.; PETER, T.; PLUMMER, D. A.; PYLE, J. A.;

ROZANOV, E.; SCINOCCA, J. F.; SHEPHERD, T. G.; SMALE, D. Stratosphere-troposphere coupling and annular mode variability in chemistry-climate models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, p. 1–15, 2010. 15

GRELL, G. A.; DEVENYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. **Geophysical Research Letters**, v. 29, p. 381–384, 2002. 20

GRIMM, A. M.; SILVA DIAS, P. L. Analysis of tropical and extratropical interactions with influence functions of a barotropic model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, p. 3538–3555, 1995. 10

GUNN, B. W.; MCBRIDE, J. L.; HOLLAND, G. J.; KEENAN, T. D.; DAVIDSON, N. E.; HENDON, H. H. The australian summer monsoon circulation during amex phase ii. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 2554–2574, 1989. 11

HARSHVARDHAN, R. D.; RANDALL, D. A.; CORSETTI, T. G. A fast radiation parameterization for atmospheric circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, p. 1009–1016, 1987. 20

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G.; BOWMAN, K. P.; STOCKER, E. F. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, p. 38–55, 2007. 28

HULME, M. **Climate Change Scenarios for Brazil**. Norwich, UK: [s.n.], 1999. Disponível em: <<http://www.cru.uea.ac.uk/~mikeh/research/wwf.brazil.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2014. 3

INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE (IWMI). **World Resource Institute**. 2003. Disponível em: <http://multimedia.wri.org/watersheds_2003/index.html>. Acesso em: 29 ago. 2014. 2

KEENAN, T. D.; MCBRIDE, J.; HOLLAND, G.; DAVIDSON, N.; GUNN, B. Diurnal variations during the australian monsoon experiment (amex) phase ii. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 2535–2553, 1989. 11

- KILADIS, G. N.; WEICKMANN, K. M. Circulation anomalies associated with tropical convection during northern winter. **Monthly Weather Review**, v. 120, p. 1900–1923, 1992. 10
- KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, p. 217–231, 1988. 10
- KUBOTA, P. Y. **Variabilidade de energia armazenada na superfície e seu impacto na definição do padrão de precipitação na América do Sul**. 311 p. Tese (Doutorado) — INPE, 2012. 20
- KUCHARIK, C. J.; FOLEY, J. A.; DELIRE, C.; FISHER, V. A.; COE, M. T.; LENTERS, J. D.; YOUNG-MOLLING, C.; RAMANKUTTY, N.; NORMAN, J. M.; GOWER, S. T. Testing the performance of a Dynamic Global Ecosystem Model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, n. 3, p. 795–826, 2000. 20
- LEJENAS, H. Characteristics of Southern Hemisphere blockings as determined from a long time series of observational data. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 110, p. 967–979, 1984. 14, 15
- LEJENAS, H.; OKLAND, H. Characteristics of Northern Hemisphere blockings as determined from a long time series of observational data. **Tellus**, v. 35A, p. 349–361, 1983. 15
- LIEBMANN, B.; KILADIS, G. N.; MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; GLICK, J. D. Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 12, p. 1877–1891, 1999. 10
- MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. **Journal of Climate**, v. 17, p. 2261–2280, 2004. 11, 12, 13, 32
- MARQUES, R. d. F. C. **Bloqueios Atmosféricos no Hemisfério Sul**. 158 p. Tese (Doutorado) — INPE, 1996. 14, 15, 42
- MECHOSO, C. R.; Silva Dias, P.; BAETHGEN, W.; BARROS, V.; BERBERY, H.; CLARKE, R.; CULLEN, H.; ERENO, C. **Climatology and Hydrology of the Plata Basin. A Document of Variability of American Monsoon Systems (VAMOS) Scientific Study Group on the Plata Basin**. 2001.

Disponível em:

<http://www.atmos.umd.edu/~berbery/lpb/science_plan.html>. Acesso em: 28 ago. 2014. 2, 3, 9, 10

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 20, p. 851–875, 1982. 20

MORRISON, H.; GETTELMAN, A. A New Two-Moment Bulk Stratiform Cloud Microphysics Scheme in the Community Atmosphere Model, Version 3 (CAM3). Part I: Description and Numerical Tests. **Journal of Climate**, v. 21, n. 15, p. 3642–3659, 2008. 20, 26

NASCIMENTO, M. G. D. **Análise dos impactos dos jatos de baixos níveis sobre a bacia do prata**. 210 p. Dissertação (Mestrado) — INPE, 2008. 11, 13

NICOLINI, M.; SALIO, P.; ULKE, G.; MARENGO, J. A.; DOUGLAS, M.; PAEGLE, J.; ZIPSER, E. South American low level jet diurnal cycle and three dimensional structure. **Clivar Exchanges**, v. 9, n. 29, p. 6–8, 2004. 13

NOGUES-PAEGLE, J.; MO, K. C. Alternating Wet and Dry Conditions over South America during Summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, p. 279–291, 1997. 10

RAO, V. B.; CAVALCANTI, I. F. A.; HADA, K. Annual variation of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America. **Geophysical Research Letters**, v. 101, p. 26539–26551, 1996. 9

RASCH, P. J.; KRISTJANSSON, J. E. A comparison of the CCM3 model climate using diagnosed and predicted condensate parameterizations. **American Meteorological Society**, v. 11, p. 1587–1614, 1998. 20, 25

REX, D. F. Blocking Action in the Middle Troposphere and its Effect upon Regional Climate. **Tellus**, v. 2, p. 196–211, 1950. 14

SAHA, S.; MOORTHY, S.; PAN, H.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; KISTLER, R.; WOOLLEN, J.; BEHRINGER, D.; LIU, H.; STOKES, D.; GRUMBINE, R.; GAYNO, G.; WANG, J.; HOU, Y.; CHUANG, H.; JUANG, H. H.; SELA, J.; IREDELL, M.; TREADON, R.; KLEIST, D.; DELST, P. V.; KEYSER, D.; DERBER, J.; EK, M.; MENG, J.; WEI, H.; YANG, R.; LORD, S.; DOOL, H. van den; KUMAR, A.; WANG, W.; LONG, C.; CHELLIAH, M.; XUE, Y.; HUANG, B.; SCHEMM, J.; EBISUZAKI, W.; LIN, R.; XIE, P.; CHEN, M.;

ZHOU, S.; HIGGINS, W.; ZOU, C.; LIU, Q.; CHEN, Y.; HAN, Y.; CUCURULL, L.; REYNOLDS, R. W.; RUTLEDGE, G.; GOLDBERG, M. **NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products**. 2011. Disponível em: <<http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/>>. Acesso em: 04 abr. 2014. 28

SALIO, P.; NICOLINI, M.; SAULO, A. C. Chaco low-level jet events characterization during the austral summer season. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, p. 1–17, 2002. 11, 12

SARAIVA, J. M. B.; Silva Dias, P. L. **A case study of intense cyclogenesis off southern coast of Brazil: impact of SST, stratiform and deep convection**. Pretoria, South Africa: [s.n.], 1997. 10

SCAIFE, A. A.; WOOLLINGS, T.; KNIGHT, J.; MARTIN, G.; HINTON, T. Atmospheric blocking and mean biases in climate models. **Journal of Climate**, v. 23, p. 6143–6152, 2010. 15

SELLERS, P. J.; MINTS, Y.; SUD, Y. C.; DALCHER, A. A Simple Biosphere Model (SIB) for use within general circulation models. **Journal of Atmospheric Science**, v. 43, p. 505–531, 1986. 21

SINCLAIR, M. R. A Climatology of Anticyclones and Blocking for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 124, p. 245–264, 1996. 15

STENSRUD, D. J. Importance of low-level jets to climate: A review. **Journal of Climate**, v. 9, p. 1698–1711, 1996. 11

SUNDQVIST, H. A parameterization scheme for non-convective condensation including prediction of cloud water content. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 104, p. 677–690, 1978. 25

TARASOVA, T.; FOMIN, B. A. Solar Radiation Absorption due to Water Vapor: Advanced Broadband Parameterizations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, p. 1947–1951, 2000. 20

TIBALDI, S.; MOLTENI, F. On the operational predictability of blocking. **Tellus A**, v. 42A, p. 343–365, 1990. 14, 15, 16

TIBALDI, S.; TOSI, E.; NAVARRA, A.; PEDULLI, L. Northern and Southern Hemisphere Seasonal Variability of Blocking Frequency and Predictability. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 1971–2003, 1994. 15

TRACTON, M. S.; MO, K.; CHEN, W.; KALNAY, E.; KISTLER, R.; WHITE, G. Dynamical Extended Range Forecasting (DERF) at the National Meteorological Center. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 1604–1635, 1989. 15

TRENBERTH, K. F.; MO, K. C. Blocking in the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 113, p. 3–21, 1985. 14, 15

UNESCO. **World Water Assessment Programme**. 2007. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001512/151252e.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014. 1, 3

VELASCO, I.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Geophysical Research Letters**, v. 92, p. 9591–9613, 1987. 8, 10

VERA, C.; HIGGINS, W.; AMADOR, J.; AMBRIZZI, T.; GARREAUD, R.; GOCHIS, D.; GUTZLER, D.; LETTENMAIER, D.; MARENGO, J.; MECHOSO, C. R.; NOGUES-PAEGLE, J.; SILVA DIAS, P. L.; ZHANG, C. Toward a unified view of the American monsoon systems. **Journal of Climate**, v. 19, p. 4977–5000, 2006. 13

VERA, C. S.; VIGLIAROLO, P. K.; BERBERY, E. H. Cold Season Synoptic-Scale Waves over Subtropical South America. **Monthly Weather Review**, v. 130, n. 1994, p. 684–699, 2002. 8

VIRJI, H. A Preliminary Study of Summertime Tropospheric Circulation Patterns over South America Estimated from Cloud Winds. **Monthly Weather Review**, v. 109, p. 599–610, 1981. 11, 12

WILLSON, M. A. G. Atmospheric Tidal Motions over Australia below 20 Kilometers. **Monthly Weather Review**, v. 103, p. 1110–1120, 1975. 11

WIPPERMANN, F. Numerical study on the effects controlling the low-level jet. **Beitraage zur Physik der Atmosphere**, v. 46, n. 2, p. 137–154, 1973. 11

XUE, Y.; SELLERS, P.; KINTER, J.; SHUKLA, J. A Simplified Biosphere Model for Global Climate Studies. **Journal Of Climate**, v. 4, p. 345–364, 1991. 20, 21, 23