



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

DESEMPENHO DAS PREVISÕES SAZONAIS DO MODELO ETA ANINHADO AO MODELO BESM DO INPE

Roberto Leo dos Santos Baltazar

Relatório Final de Iniciação Científica do
programa PIBIC/INPE, orientada pela PhD.
Chou Sin Chan e Dra. Claudine Pereira
Dereczynski.

INPE
São José dos Campos
2022

RESUMO

Modelos climáticos globais são ferramentas importantes para a simulação do tempo e clima, porém as baixas resoluções de suas previsões sazonais fornecem informações limitadas para o planejamento e atuação em áreas de interesse de escala local. Modelos climáticos regionais permitem a redução da escala e o detalhamento adicional das previsões geradas por modelos globais, o que possibilita previsões destinadas a áreas mais limitadas e com fins mais específicos. O objetivo deste trabalho é avaliar as previsões climáticas sazonais do modelo regional Eta aninhado ao modelo global BESM, ambos modelos desenvolvidos pelo INPE, em eventos extremos no país. Ademais, investigam-se as forçantes climáticas predominantes durante os eventos de extremos climáticos ocorridos na região da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. O modelo regional Eta fornece previsões climáticas sazonais cobrindo todo o Brasil com resolução de 40 km. As previsões sazonais consideradas do modelo Eta-40km utilizam a temperatura da superfície do mar prevista pelo modelo BESM. Anteriormente, foram realizadas avaliações do desempenho das previsões sazonais do modelo Eta40km-BESM em relação à Reanálise ERA5 e ao MSWEP para eventos extremos secos e chuvosos no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro para o período 1987-2010. Na etapa atual do trabalho, foram comparadas as avaliações das previsões do modelo Eta40km-BESM e do BESM, a fim de se identificar possíveis semelhanças entre erros nos dois modelos e suas origens. Tais avaliações foram feitas para as variáveis precipitação, pressão a nível médio do mar, temperatura do ar a 2m, temperatura em níveis de pressão e altura geopotencial. Os erros das previsões foram identificados através de comparações aos valores do ERA5 e do MSWEP. As métricas calculadas são Erro Médio, Raiz do Erro Quadrático Médio, anomalia, desvio padrão e coeficiente de correlação de Pearson para previsões nos horários de 00, 06, 12 e 18 UTC de cada variável. Os resultados preliminares indicam que os erros nos sinais das previsões de anomalia de temperatura e de precipitação do modelo Eta40km-BESM acompanharam os erros encontrados nas previsões fornecidas pelo BESM. Em geral, as anomalias previstas pelo Eta40km-BESM apresentaram sinais e distribuição espacial parecidos com os do modelo BESM, tanto para casos de previsões bem-sucedidas quanto insatisfatórias. As anomalias previstas pelo Eta40km-BESM se mostraram menos intensas que as do BESM e mais próximas dos valores observados.

Palavras-chave: Previsões climáticas. América do Sul. Avaliação de modelos.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 4.1 - Anomalias de precipitação (mm/mês) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo MSWEP, respectivamente, na América do Sul, para o mês de janeiro do período de 1988 até 2010.....	7
Figura 4.2 - Anomalias de precipitação (mm/mês) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo MSWEP, respectivamente, na América do Sul, para o mês de fevereiro do período de 1988 até 2009.....	9
Figura 4.3 - Anomalias de precipitação (mm/mês) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo MSWEP, respectivamente, na América do Sul, para o mês de dezembro do período de 1988 até 2010.	11
Figura 4.4 - Anomalias de temperatura em 850 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de janeiro do período de 1988 até 2010.....	14
Figura 4.5 - Anomalias de temperatura em 850 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de fevereiro do período de 1988 até 2010.	16
Figura 4.6 - Anomalias de temperatura em 850 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de dezembro do período de 1988 até 2009.	18
Figura 4.7 - Anomalias de temperatura em 500 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de janeiro do período de 1988 até 2010.....	20
Figura 4.8 - Anomalias de temperatura em 500 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de fevereiro do período de 1988 até 2010.	22
Figura 4.9 - Anomalias de temperatura em 500 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de dezembro do período de 1988 até 2009.	24

Figura 4.10 - Anomalias de temperatura em 250 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de janeiro do período de 1988 até 2010.....	26
Figura 4.11 - Anomalias de temperatura em 250 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de fevereiro do período de 1988 até 2010.	28
Figura 4.12 – Coeficientes de correlação entre as previsões de precipitação do modelo BESM e valores observados pelo MSWEP, entre previsões do Eta40BESM e observações do MSWEP e entre previsões do Eta40BESM e BESM, respectivamente, para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988-2010.	30
Figura 4.13 - Coeficientes de correlação entre as previsões de temperatura em 850 hPa do modelo BESM e valores observados pelo ERA5, entre previsões do Eta40BESM e observações do ERA5 e entre previsões do Eta40BESM e BESM, respectivamente, para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988-2010.	32
Figura 4.14 - Coeficientes de correlação entre as previsões de temperatura em 500 hPa do modelo BESM e valores observados pelo ERA5, entre previsões do Eta40BESM e observações do ERA5 e entre previsões do Eta40BESM e BESM, respectivamente, para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988-2010.	33

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
BESM	Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
EM	Erro médio

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos Gerais e Específicos.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3 DADOS E METODOLOGIA	3
4 RESULTADOS	5
4.1 Modelos vs. Observação	5
4.1.1 Precipitação	5
4.1.2 Temperatura em 850 hPa	12
4.1.3 Temperatura em 500 hPa	19
4.1.4 Temperatura em 250 hPa	25
4.2 Correlação	29
4.2.1 Precipitação	29
4.2.2 Temperatura em 850 hPa	30
4.2.3 Temperatura em 500 hPa	32
5 CONCLUSÃO.....	34
5.1 Próximos Passos	35
5.2 Agradecimentos	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

A variabilidade climática se refere a flutuações do clima acima ou abaixo da média climatológica a longo prazo. Essas oscilações podem apresentar valores extremos, geralmente resultando em grandes prejuízos e perdas de vidas quando enfrentados com despreparo. Eventos extremos de variabilidade climática na precipitação podem ocasionar em crises hídricas e, conseqüentemente, energéticas em períodos de seca extrema, enquanto períodos extremos chuvosos podem causar desastres como inundações, deslizamentos e escorregamentos de terra. Nesse sentido, previsões sazonais de precipitação, geradas através de modelos numéricos, são muito úteis pois permitem identificar a qualidade da estação chuvosa com alguns meses de antecedência.

Modelos climáticos globais são instrumentos capazes de realizar previsões de tempo e clima em grande escala, porém suas baixas resoluções resultam em previsões sazonais consideradas grosseiras para o planejamento e atuação em escala local. A redução da escala das previsões se torna possível através da implementação de modelos regionais climáticos, que adicionam detalhamento adicional às previsões dos modelos globais. Os modelos regionais utilizam condições iniciais, de contorno lateral e inferior fornecidas pelos modelos globais, que introduzem informações sobre a circulação atmosférica de grande escala enquanto o modelo regional agrega informações detalhadas do clima em escala local. O aumento da resolução permite que previsões sejam feitas para áreas mais limitadas e com fins mais específicos, além de permitir uma melhor reprodução de eventos extremos climáticos.

1.1 Objetivos Gerais e Específicos

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o desempenho das previsões sazonais do modelo climático regional Eta (Mesinger et al., 2012; Chou et al., 2020) aninhado ao modelo global BESM, ambos desenvolvidos pelo INPE. Com isso em mente, constatam-se os seguintes objetivos específicos:

I. Avaliar as previsões climáticas sazonais do modelo Eta aninhado ao modelo BESM em eventos extremos no país;

II. Investigar as forçantes climáticas predominantes durante os eventos de extremos climáticos ocorridos na região da bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Previsões sazonais geradas por modelos climáticos globais geralmente possuem detalhamento insuficiente para a tomada de ações em escalas locais, devido à baixa resolução dos modelos. Ao mesmo tempo, a utilização de modelos climáticos globais de alta resolução exige recursos computacionais cujo acesso ainda é bastante limitado, tornando a redução de escala através de modelos climáticos regionais uma opção mais viável para gerar previsões sazonais mais detalhadas (Laprise et al. 2000). A primeira tentativa de explorar a aplicação de modelos regionais para a redução da escala de previsões na América do Sul foi feita por Chou et al. (2000), aninhando o modelo regional Eta ao modelo global do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Chou et al. (2000), assim como Menéndez et al. (2001), Nicolini et al. (2002) e Misra et al. (2002), conseguiram demonstrar que as previsões do modelo climático global foram melhoradas pelo modelo regional Eta, sendo capaz de reproduzir anomalias climáticas observadas. Os autores também destacaram a utilidade de modelos regionais climáticos aninhados a modelos globais para previsões climáticas.

Chou et al. (2020) avaliou 10 anos de previsões retrospectivas regionais sobre a América do Sul do modelo climático regional Eta com resolução 40km, aninhado ao modelo global do CPTEC, realizando comparações a dados observacionais. Chou et al. (2020) encontrou que as previsões subestimaram os valores de precipitação na porção central do Brasil durante o verão, enquanto superestimou a precipitação no Sul e ao longo da costa leste brasileira durante o inverno. Resultados de *skill score* também indicaram a habilidade do modelo de reproduzir a variabilidade interanual das anomalias de precipitação na porção norte do continente sul-americano. No Brasil, a habilidade de previsão encontrada foi mais alta nas regiões Norte e Nordeste, com o Sul demonstrando habilidade moderada e o Sudeste valores mais baixos. O estudo também encontrou que as habilidades de previsão durante os eventos extremos de El Niño e La Niña se mostraram mais altas do que durante anos neutros, além de demonstrar maior habilidade em comparação a previsões de

modelos climáticos globais. Em geral, Chou et al. (2020) encontrou que o processo de redução de escala das previsões a partir da aplicação do modelo regional Eta ao modelo global do CPTEC adicionou valor às previsões sazonais sobre a América do Sul, com efeito visível durante as estações chuvosas de DJF a MAM, assim como durante a estação de transição SON. Concluiu-se que as previsões sobre a América do Sul com o modelo climático regional Eta acoplado ao modelo climático global do CPTEC demonstraram maior resolução, provendo informações mais detalhadas e uma maior habilidade de previsão sazonal de precipitação.

Anteriormente, Chou et al. (2005) gerou e avaliou em seu trabalho previsões sazonais do modelo Eta sobre a América do Sul, focando na previsibilidade de precipitação em períodos de tempo em escalas sazonais, mensais e semanais. O modelo constava de uma resolução de 40 km e utilizou previsões do modelo climático global do CPTEC como contorno lateral. Chou et al. (2005) encontrou que as previsões sazonais do modelo Eta apresentavam valores totais comparáveis aos observados, além de representar bem os sistemas de precipitação de larga escala sobre a América do Sul, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). As previsões do modelo Eta demonstraram maior habilidade de previsão de precipitação sobre a região amazônica e menor sobre o nordeste brasileiro. Valores totais de precipitação indicaram que o modelo conseguiu capturar a variabilidade intrasazonal, como o início da monção. Comparações com as previsões do modelo climático global do CPTEC demonstraram uma melhora ao utilizar o modelo Eta em suas previsões, e comparações com a climatologia indicaram que as previsões sazonais do modelo Eta produziram informações úteis adicionais.

3 DADOS E METODOLOGIA

O Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM - *Brazilian Earth System Model*) é um modelo climático global acoplado oceano-atmosfera que vem sendo desenvolvido e aprimorado pelo INPE (Nobre et al., 2013), cuja versão mais recente possui componente atmosférica de resolução T62L28 (resolução horizontal de aproximadamente 200 km e 28 níveis verticais) representada pelo modelo de circulação geral atmosférico do INPE.

A sua componente oceânica é representada pelo MOM5 (Modular Ocean Model version 5), modelo de circulação geral oceânica do GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) que possui 50 níveis e resolução horizontal variando 0,25° entre 10°S e 10°N, 1° entre 10°N/S e 45°N/S e 2° entre 45°N/S e 90°N/S. A resolução do modelo é constante de 1° em longitude.

O modelo Eta se trata de um modelo climático regional desenvolvido pela Universidade de Belgrado junto ao Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia (Mesinger et al. 1988), que entrou em operação no National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (Black 1994) e foi implementado em 1996 no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), onde tem gerado previsões sazonais desde 2001. (Chou et al., 2020; Chou et al 2005; Chou, 1996).

Na etapa anterior deste trabalho, foram consideradas as previsões do modelo regional Eta aninhado ao modelo global BESM, realizadas para as variáveis de precipitação, temperatura do ar a 2 metros, temperatura do ar em 850, 500 e 250 hPa, pressão a nível médio do mar, movimento vertical a 500 hPa e altura geopotencial a 850 e 500 hPa. Foram geradas previsões nos horários de 00, 06, 12 e 18Z para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro no período de 1988-2010 (23 anos), cobrindo o domínio da América do Sul. As previsões do modelo Eta40BESM foram comparadas aos dados observacionais de mesmo horário e período para a avaliação de seu desempenho. Foram utilizados dados de observação obtidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ReAnalysis 5* (ERA5) (Hersbach et al., 2020) para as variáveis de temperatura a 2 metros, temperatura do ar, pressão a nível médio do mar, movimento vertical e altura geopotencial, enquanto dados do *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* (MSWEP) (Beck et al., 2019) foram utilizados para precipitação. Para cada variável, foram calculadas as métricas de erro médio, raiz do erro quadrático médio, anomalia, desvio padrão e coeficiente de correlação de Pearson. A etapa anterior do estudo encontrou que o modelo Eta40BESM foi capaz de prever sinais de anomalia predominantes similares aos observados e seus padrões espaciais, mas falhou ao simular corretamente suas intensidades, apresentando superestimativas e subestimativas em seus valores. Apesar disso, ocorreu uma quantidade significativa de casos em que o modelo regional não conseguiu reproduzir satisfatoriamente em suas previsões tanto os sinais

quanto os padrões espaciais das anomalias observadas, resultando em previsões com erros ou malsucedidas.

Para a etapa atual do trabalho, as previsões do modelo global BESM foram avaliadas através da mesma metodologia da etapa anterior, com o objetivo de se identificar semelhanças e possíveis erros no modelo global que possam ter influenciado negativamente as previsões do modelo regional Eta40BESM. O desempenho das previsões do modelo BESM foi comparado ao das previsões do Eta40BESM e aos valores de observação para as variáveis de precipitação e temperatura em 850, 500 e 250 hPa. Foram realizados os coeficientes de correlação das previsões do BESM em relação aos dados de observação e a correlação entre as previsões dos modelos BESM e Eta40BESM.

A série de dados do trabalho foi definida pela disponibilidade de anos com previsões retrospectivas do modelo Eta40km-BESM e originalmente constava de 30 anos, possuindo período de 1981-2010, porém precisou ser reduzida por conta de erros detectados na configuração das previsões dos anos de 1981-1986.

4 RESULTADOS

4.1 Modelos vs. Observação

4.1.1 Precipitação

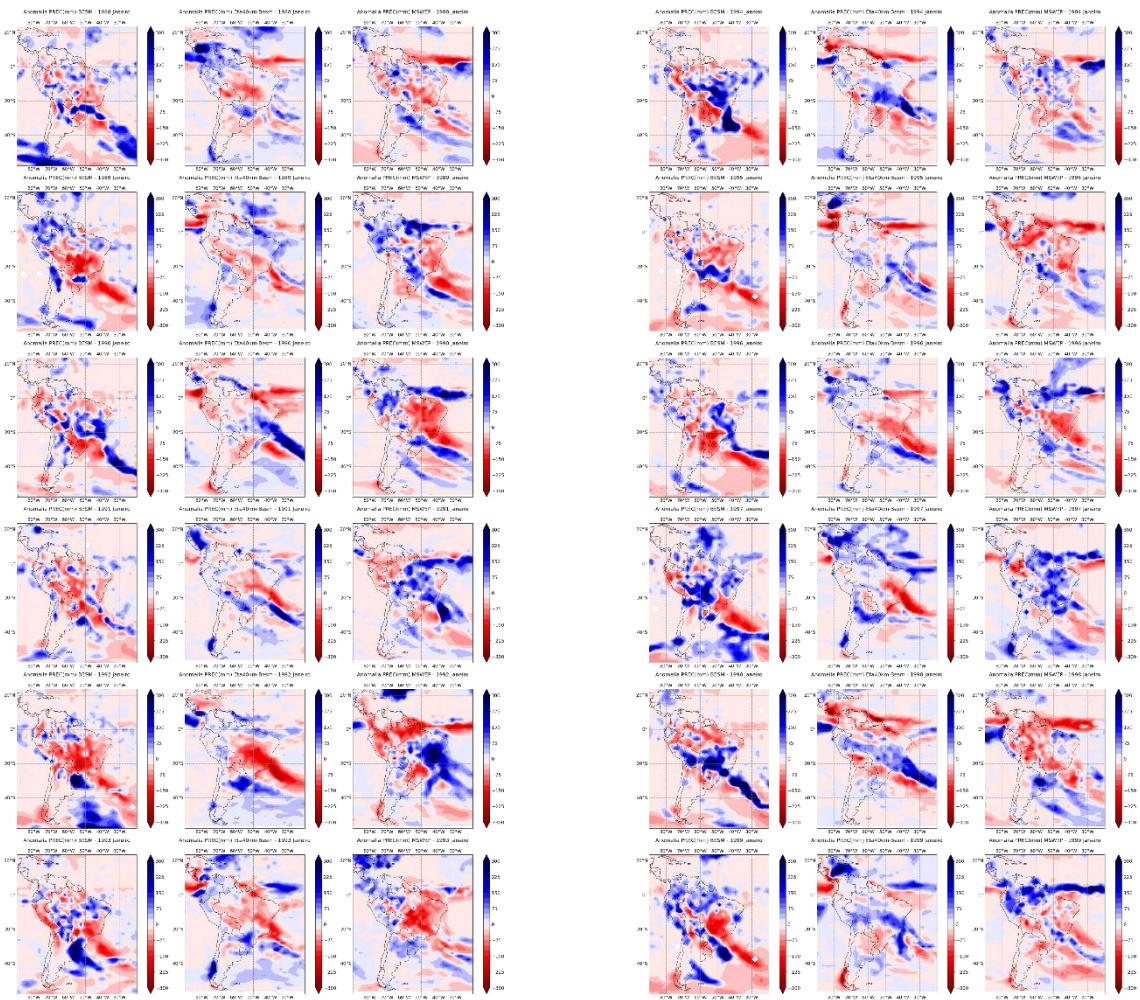
Na Figura 4.1 estão as anomalias de precipitação do modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e valores observados pelo MSWEP para o mês de janeiro no período de 1988 a 2010.

Através da comparação das previsões dos dois modelos, é possível notar que a distribuição espacial e os sinais de anomalias do Eta40BESM são similares aos vistos nas previsões do modelo BESM, mas apresentam variações em regiões específicas em cada ano simulado. Na maioria dos anos, o modelo Eta40BESM prevê anomalias de precipitação predominantes que concordam com as previstas pelo BESM. Por outro lado,

essa similaridade entre as previsões dos modelos não foi notada em todos os anos da série, como foi o caso de 1995, 1996, 1997, 2001 e 2003, em que as previsões do Eta40BESM apresentaram sinais e distribuição espacial diferentes do BESM.

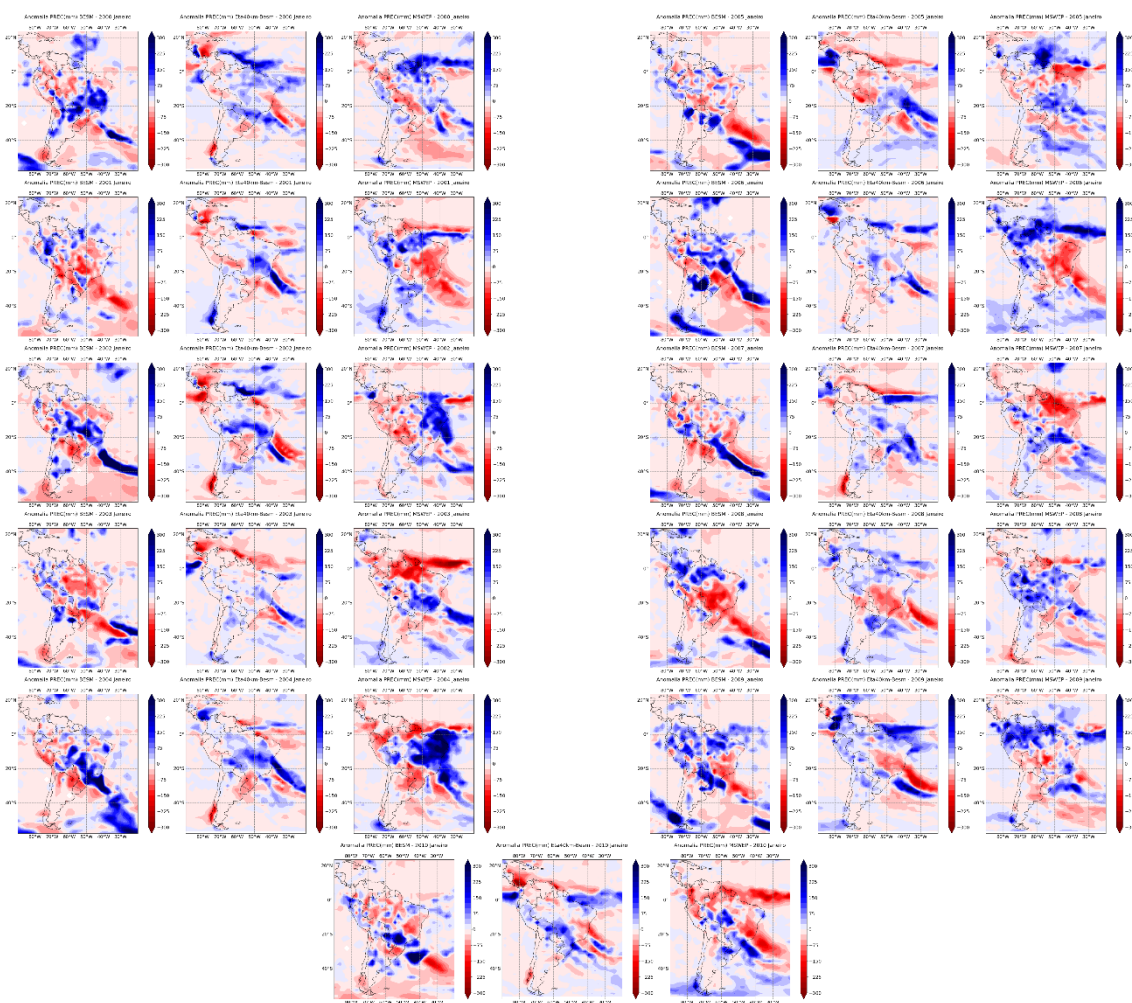
Ao comparar as previsões dos modelos aos valores observados pelo MSWEP, nota-se que em anos nos quais a previsão do modelo regional Eta40BESM errou, o modelo global BESM também apresentou previsões com erros semelhantes ao modelo regional, sugerindo que o Eta40BESM possa ter herdado erros do BESM em sua previsão. Essa relação entre os erros pôde ser vista em anos como 1990 e 1992, em que ambos os modelos previram predominância de anomalias de sinais opostos aos observados e em padrões de distribuição espacial parecidos. Também foram notados casos em que o modelo regional Eta40BESM divergiu do modelo global BESM e apresentou previsões de anomalias de precipitação mais próximas das observadas pelo MSWEP do que o BESM, como foi o caso dos anos de 1993, 1996 e 2005. O oposto também foi visto, com o Eta40BESM errando ao divergir de previsões bem sucedidas do BESM, como visto em 1995, 1997 e 2001.

Figura 4.1 - Anomalias de precipitação (mm/mês) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo MSWEP, respectivamente, na América do Sul, para o mês de janeiro do período de 1988 até 2010.



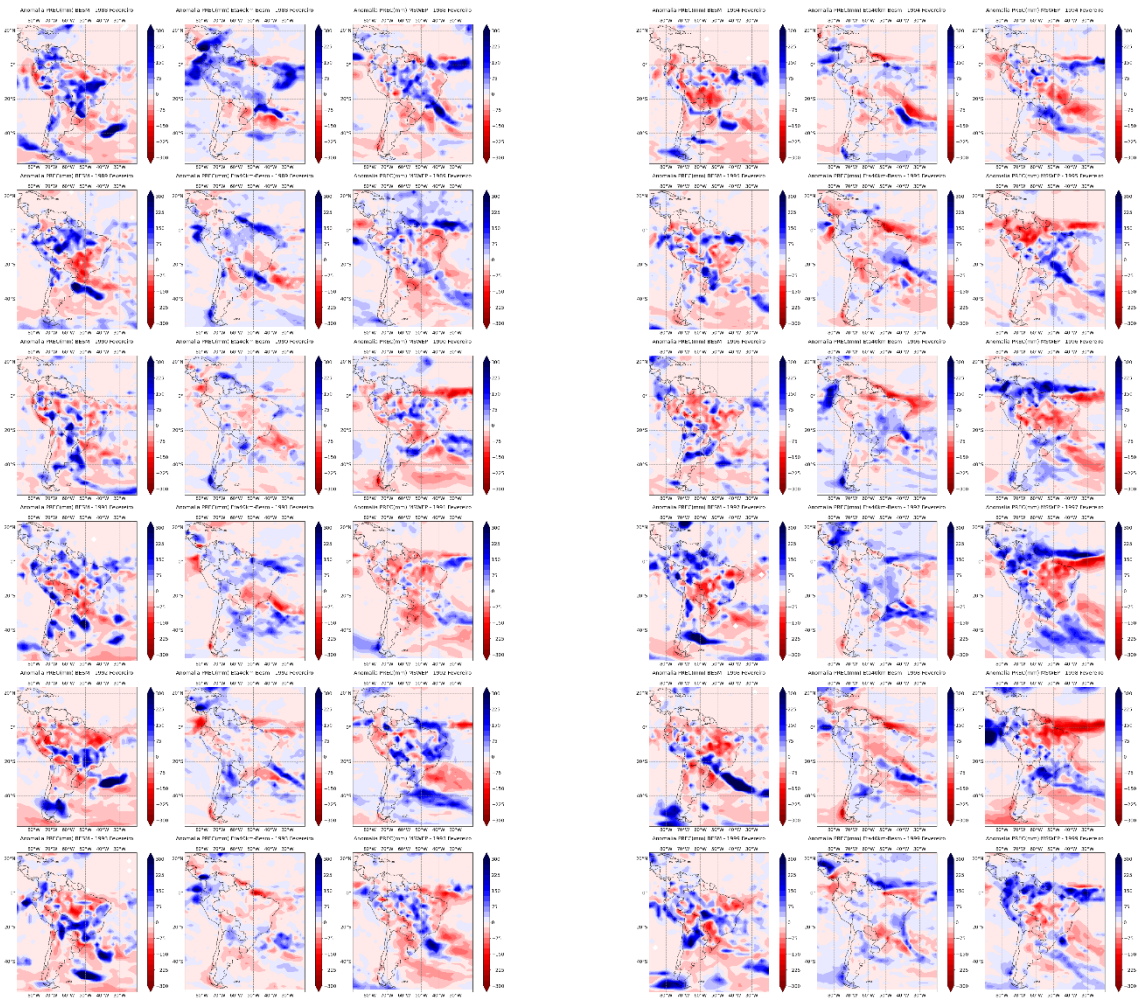
(Continua)

Figura 4.1 – Continuação.



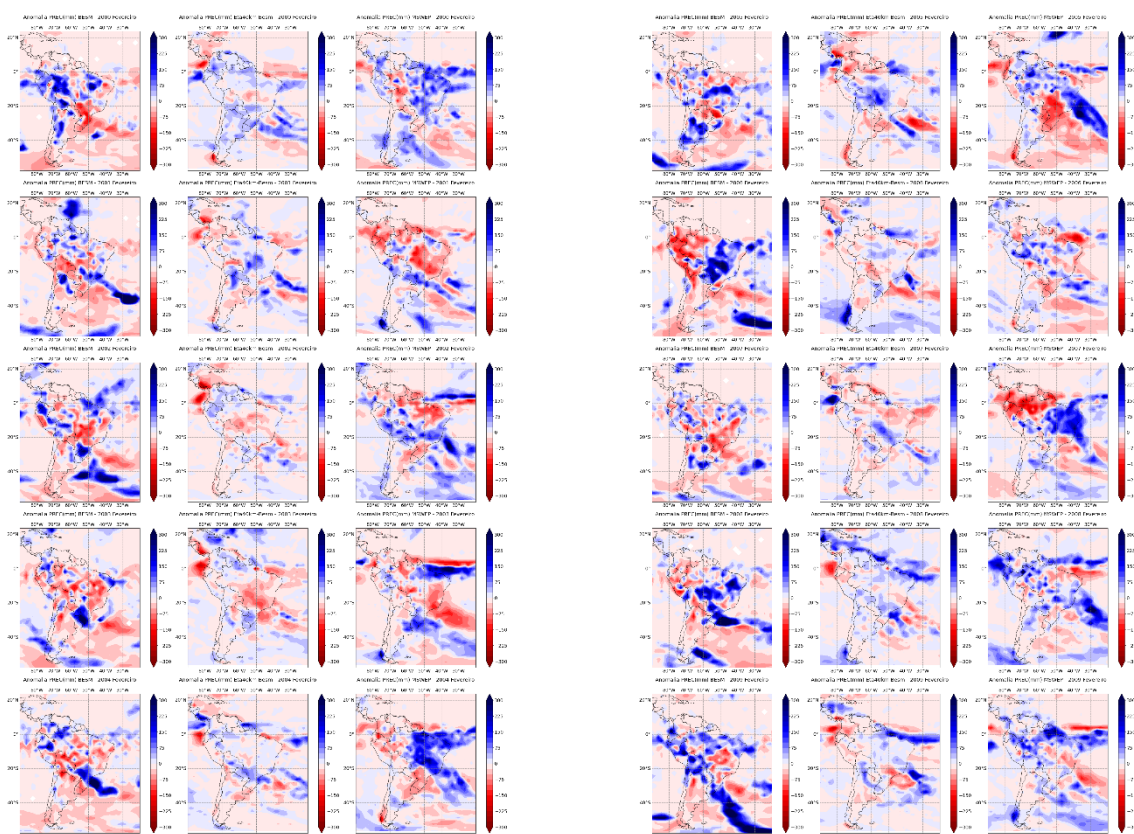
A Figura 4.2 apresenta as anomalias de precipitação do modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e valores observados pelo MSWEP para o mês de fevereiro no período de 1988 a 2009. É possível notar a mesma tendência vista para o mês de janeiro, em que as previsões do modelo regional apresentaram similaridades às previsões do modelo global, tanto para anos em que foram bem sucedidas quanto anos em que foram insatisfatórias. Por outro lado, percebe-se que as anomalias previstas para o mês de fevereiro pelo Eta40BESM aparentaram divergir mais em relação ao BESM do que foi visto em janeiro, com mais casos em que o modelo Eta40BESM gerou previsões menos satisfatórias que o BESM, como nos anos de 1990, 1992, 1993, 1996 e 2009.

Figura 4.2 - Anomalias de precipitação (mm/mês) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo MSWEP, respectivamente, na América do Sul, para o mês de fevereiro do período de 1988 até 2009.



(Continua)

Figura 4.2 – Continuação.



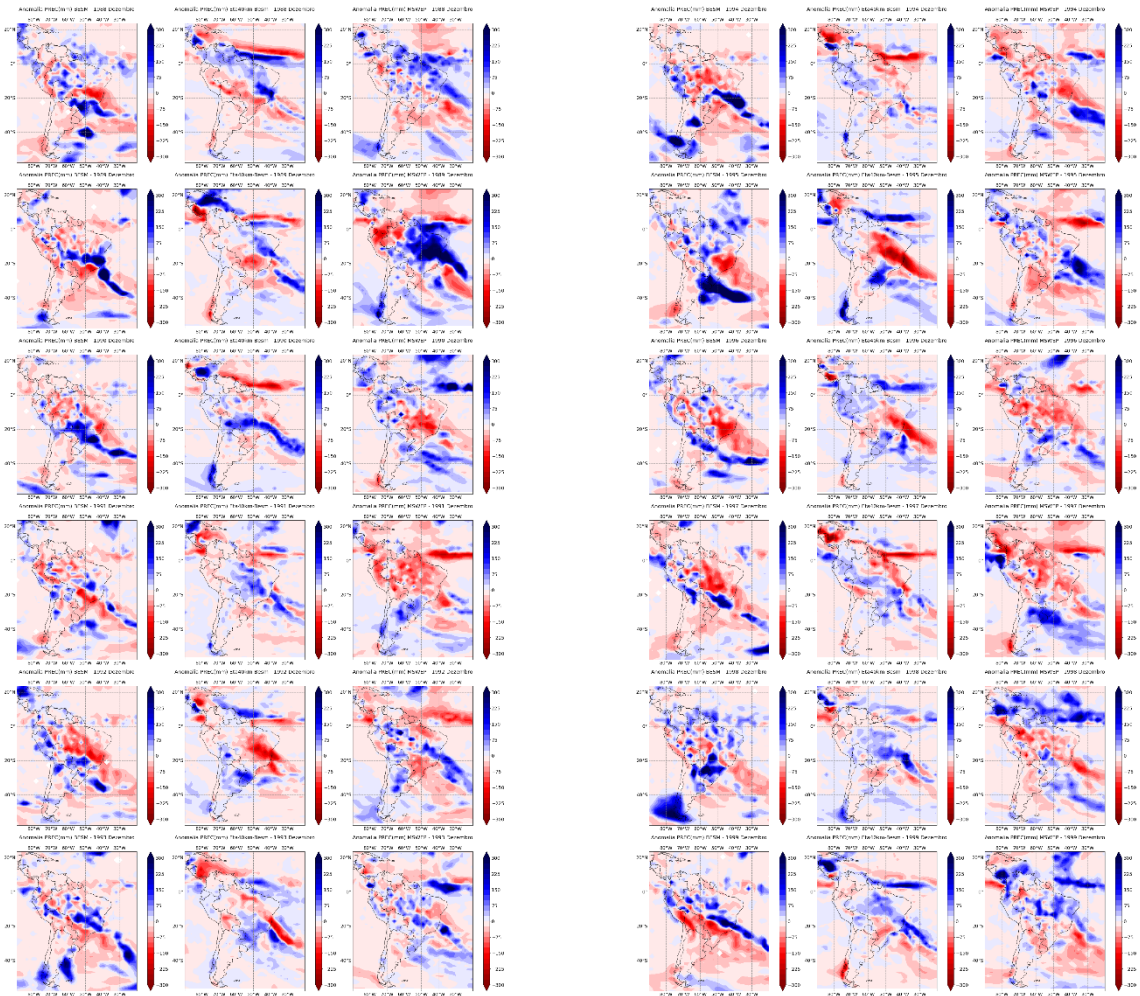
Na Figura 4.3 estão as anomalias de precipitação do modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e valores observados pelo MSWEP para o mês de dezembro no período de 1988 a 2009.

Assim como nos meses de janeiro e fevereiro, as previsões das anomalias de precipitação feitas pelo Eta40BESM também apresentaram sinais e padrões de distribuição espacial que se assemelham às previsões do modelo BESM, tanto para anos de previsões de sucesso quanto insatisfatórias, sugerindo que o modelo regional herdou tendências de acertos e de erros do modelo global. Entretanto, as previsões do Eta40BESM continuaram a demonstrar variabilidade em relação ao BESM, divergindo em sinais e distribuição em alguns anos da série.

Em geral, ao considerar todos os três meses analisados para anomalias de precipitação, dezembro, janeiro e fevereiro, os modelos Eta40BESM e BESM demonstraram parentesco visível em suas previsões, com boa parte dos erros nas previsões do Eta40BESM tendo possível origem no modelo global BESM. Porém, uma quantidade

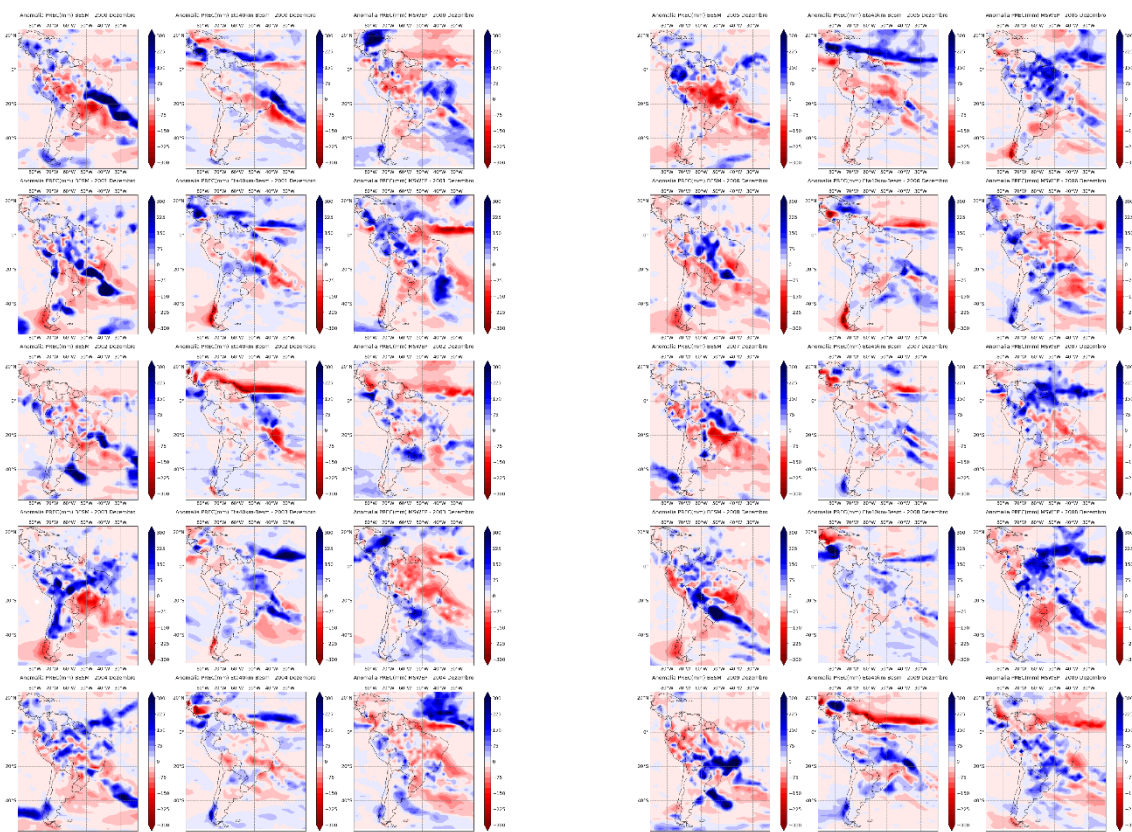
considerável de erros nas previsões do Eta40BESM partiu de divergências em relação ao modelo global, sugerindo a existência de outras possíveis origens para seus erros.

Figura 4.3 - Anomalias de precipitação (mm/mês) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo MSWEP, respectivamente, na América do Sul, para o mês de dezembro do período de 1988 até 2010.



(Continua)

Figura 4.3 – Continuação.



4.1.2 Temperatura em 850 hPa

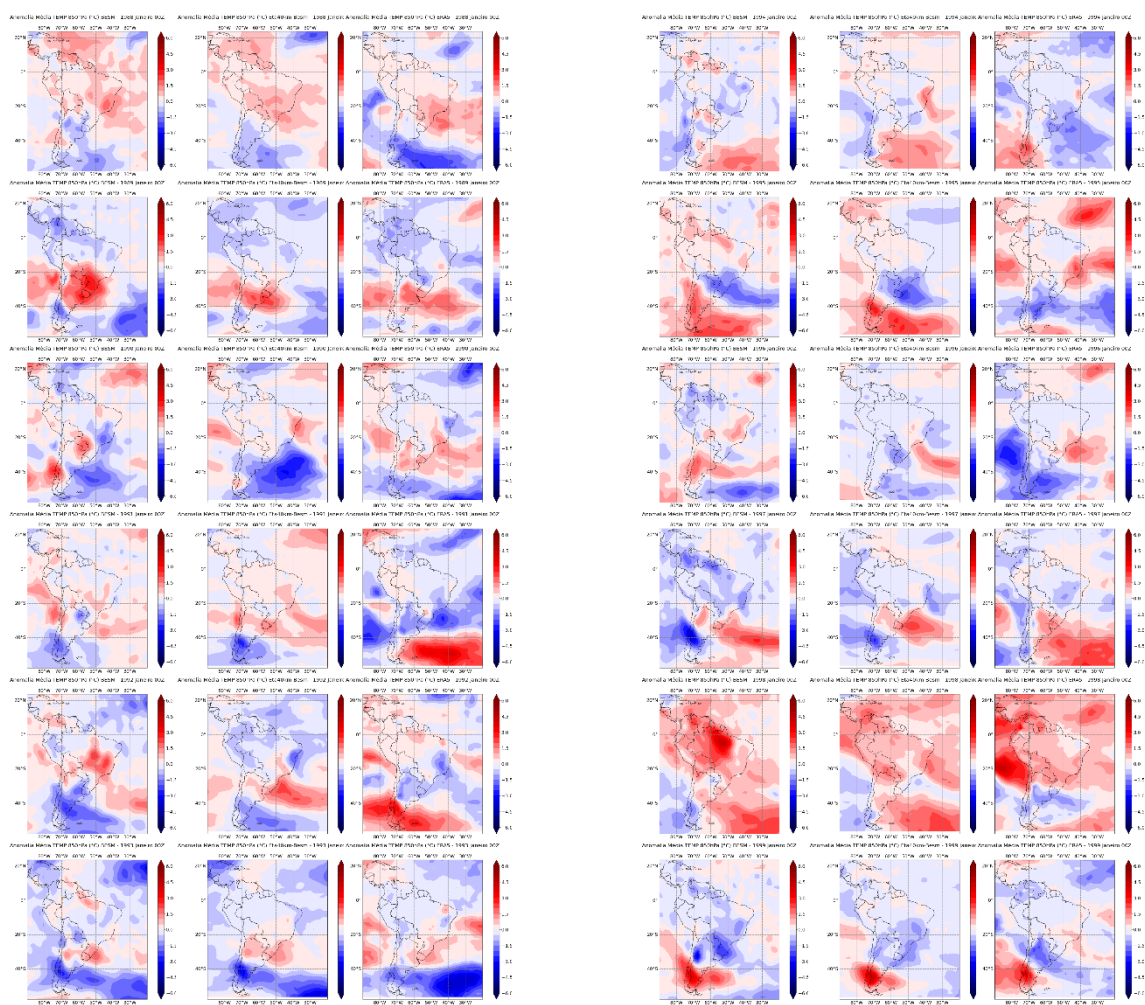
A Figura 4.4 apresenta as anomalias de temperatura a 850 hPa do modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e valores observados pela reanálise do ERA5 para o mês de janeiro no período de 1988 a 2009.

Ao se comparar as previsões de temperatura realizadas pelo modelo regional Eta40BESM e pelo modelo global BESM, é possível notar uma clara relação entre as duas previsões, com os sinais e distribuição espacial das anomalias simuladas pelo Eta40BESM se mostrando quase idênticas aos do BESM. Entretanto, algumas pequenas variações em padrões especiais ainda puderam ser notadas, assim como diferenças em intensidade das anomalias, que tenderam a ser levemente menos intensas nas previsões do Eta40BESM em relação às do BESM sobre regiões continentais e mais intensas sobre o oceano. Desta

forma, a maior diferença entre as previsões do modelo regional e global foram as variações em intensidade das anomalias.

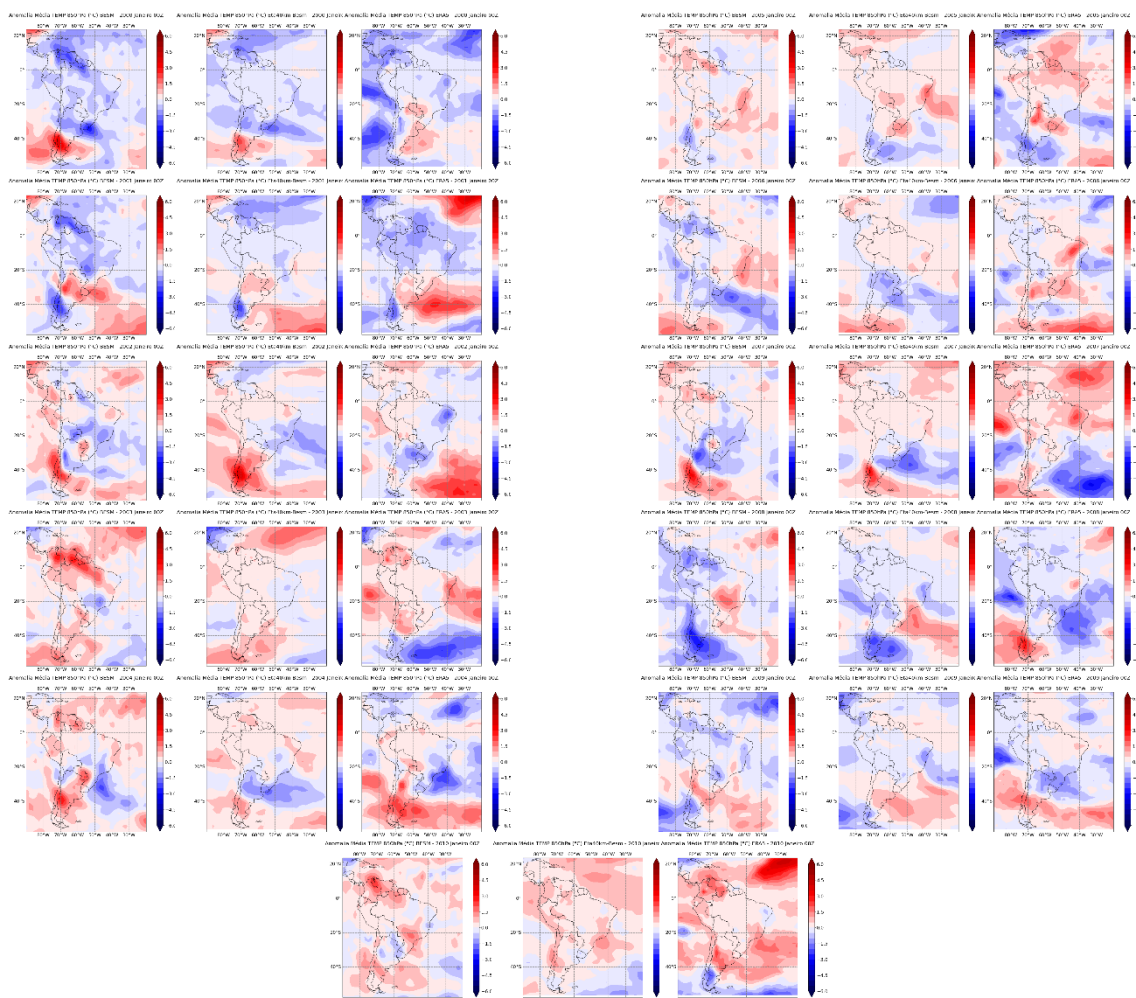
Comparando as previsões realizadas pelos modelos aos valores de anomalias de temperatura a 850 hPa do ERA5, foi possível notar que os acertos do Eta40BESM foram acompanhados de acertos do BESM, assim como os erros, uma vez que as simulações dos dois modelos apresentaram resultados bastante próximos. Por conta disso, o melhor desempenho de um modelo em relação ao outro dependeu da intensidade dos sinais das anomalias previstas. Em alguns anos, as previsões do Eta40BESM se mostraram mais próximas aos valores de observação por conta de sua tendência a apresentar valores menos intensos sobre o continente e mais fortes sobre o oceano, como pôde ser visto em 1989, 1993, 1998, 2007 e 2010. Em outros anos, a mesma tendência fez com que as previsões do Eta40BESM apresentassem desempenho inferior às do BESM, como em 2001, 2004 e 2006.

Figura 4.4 - Anomalias de temperatura em 850 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de janeiro do período de 1988 até 2010.



(Continua)

Figura 4.4 – Continuação.

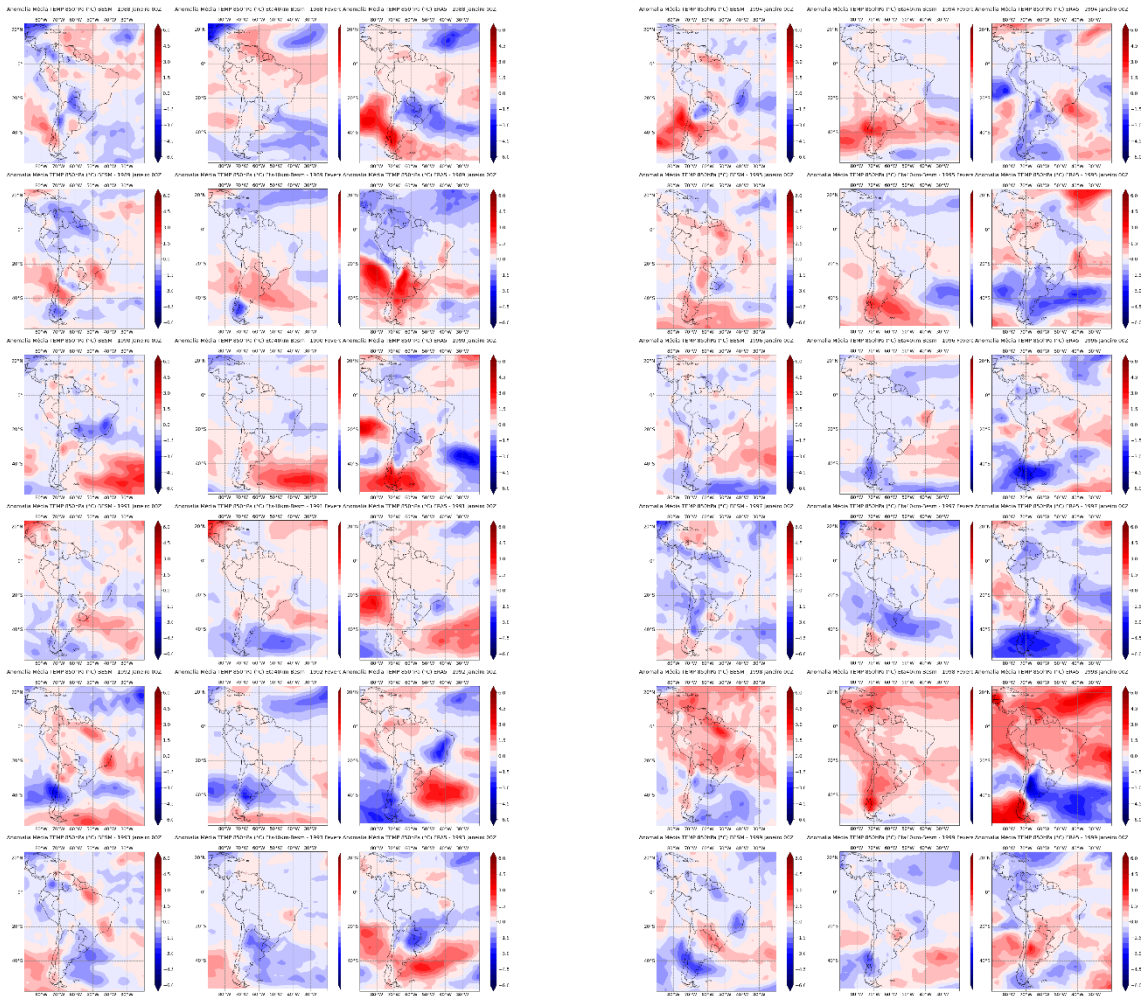


Na Figura 4.5 estão representadas as anomalias de temperatura a 850 hPa do modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e valores observados pela reanálise do ERA5 para o mês de fevereiro no período de 1988 a 2009.

Assim como foi visualizado para o mês de janeiro, as previsões de fevereiro de anomalia de temperatura a 850 hPa dos modelos regional Eta40BESM e global BESM se mostraram bastante parecidas entre si, simulando os mesmos padrões de sinais de anomalia predominantes, porém com algumas variações. As previsões do modelo regional Eta40BESM continuaram a demonstrar a tendência de apresentar valores de anomalia menores sobre o continente e mais intensos sobre os oceanos em relação às previsões do BESM. Essa tendência resultou em melhores desempenhos das previsões do

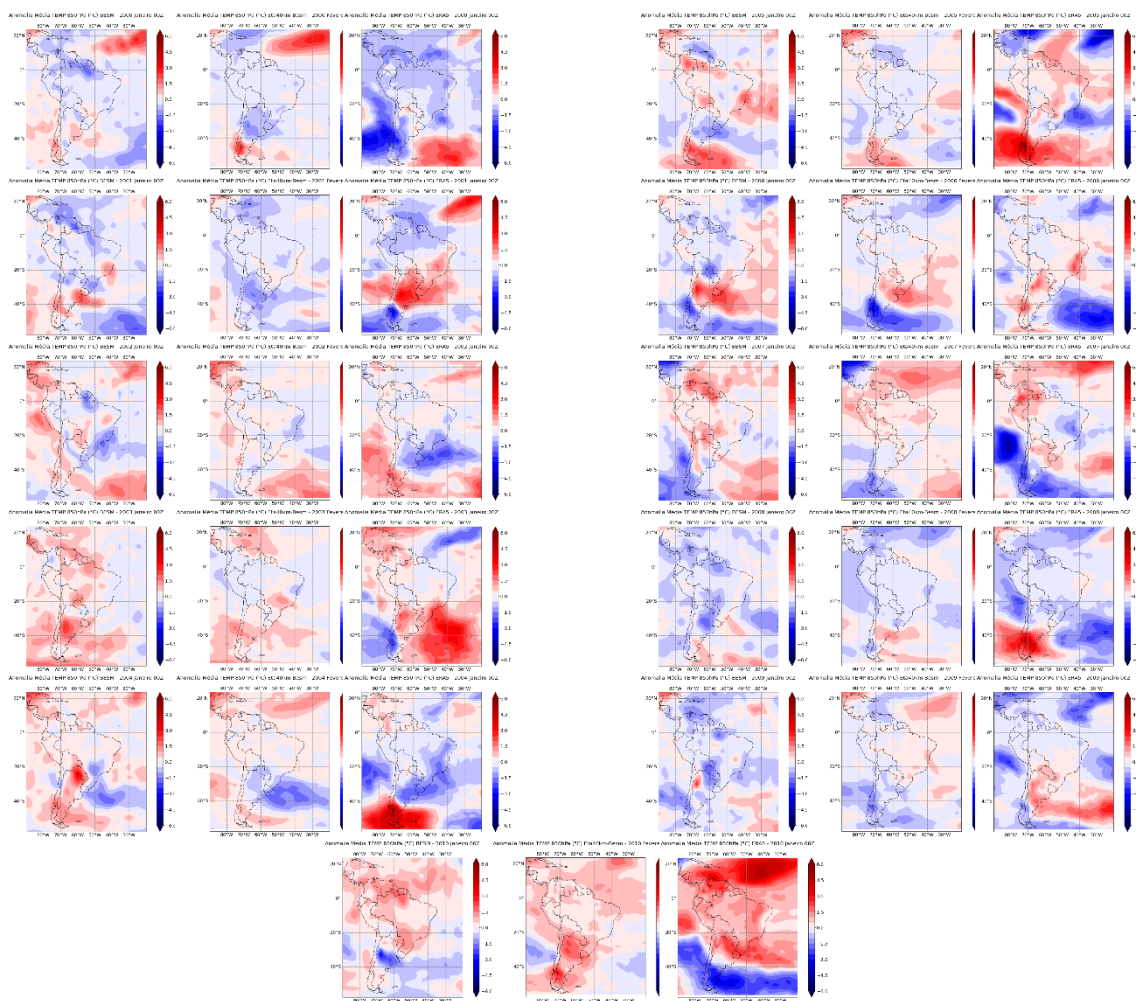
Eta40BESM nos anos de 1990, 2003 e 2006, enquanto reduziu a qualidade nos anos de 1989, 1998, 2001, 2002 e 2008.

Figura 4.5 - Anomalias de temperatura em 850 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de fevereiro do período de 1988 até 2010.



(Continua)

Figura 4.5 – Continuação.



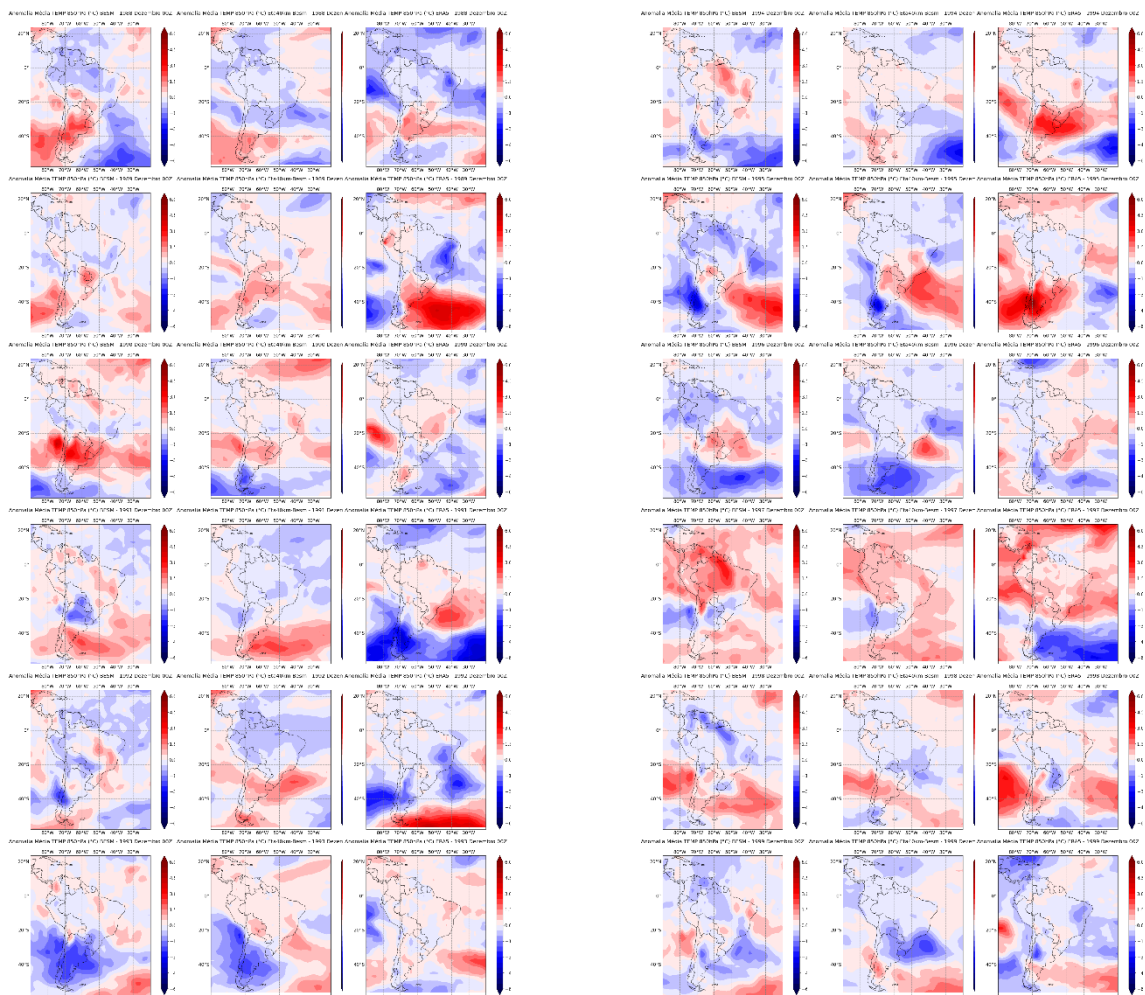
A Figura 4.6 contém as anomalias de temperatura a 850 hPa do modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e valores observados pela reanálise do ERA5 para o mês de dezembro no período de 1988 a 2009.

As previsões para dezembro, assim como as dos meses anteriormente estudados, apresentaram elevado grau de parentesco entre as simulações do modelo Eta40BESM e do BESM, tanto para casos em que houve acerto ou erro nas previsões. A maior diferença entre as previsões dos dois modelos continuou sendo a intensidade das anomalias, com alguns anos chegando a apresentar fracos sinais opostos na mesma região de um modelo para o outro.

Em geral, ao considerar o desempenho das previsões de dezembro, janeiro e fevereiro para anomalias de temperatura em 850 hPa, foi possível notar uma relação direta entre as

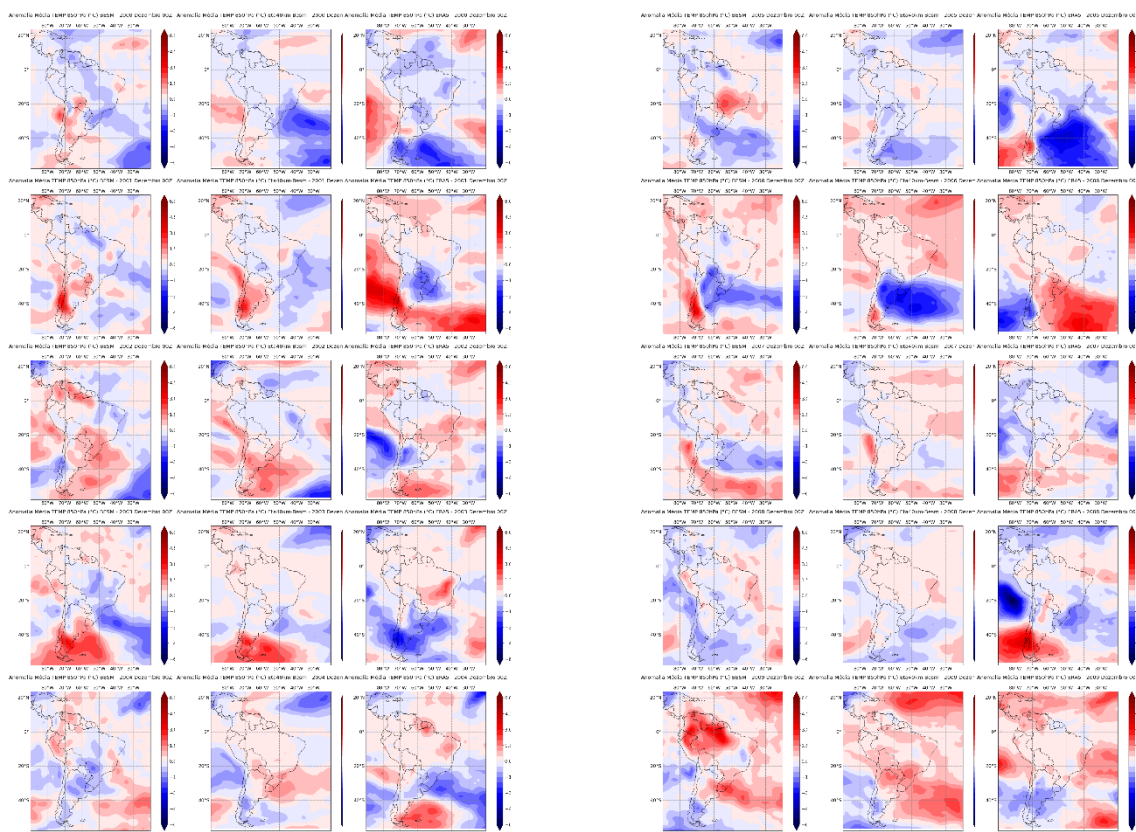
previsões do modelo global BESM e o que foi simulado pelo modelo regional Eta40BESM, indicando que erros nas saídas do modelo global afetam significativamente a qualidade das previsões do modelo regional. Apesar disso, as previsões do Eta40BESM também apresentaram suas próprias variações em sinais e distribuição espacial das anomalias, levando a divergências das previsões do BESM que resultaram em piores previsões em alguns anos da série estudada. Dessa forma, abre-se a possibilidade para outras origens menos visíveis dos erros nas previsões.

Figura 4.6 - Anomalias de temperatura em 850 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de dezembro do período de 1988 até 2009.



(Continua)

Figura 4.6 – Continuação.



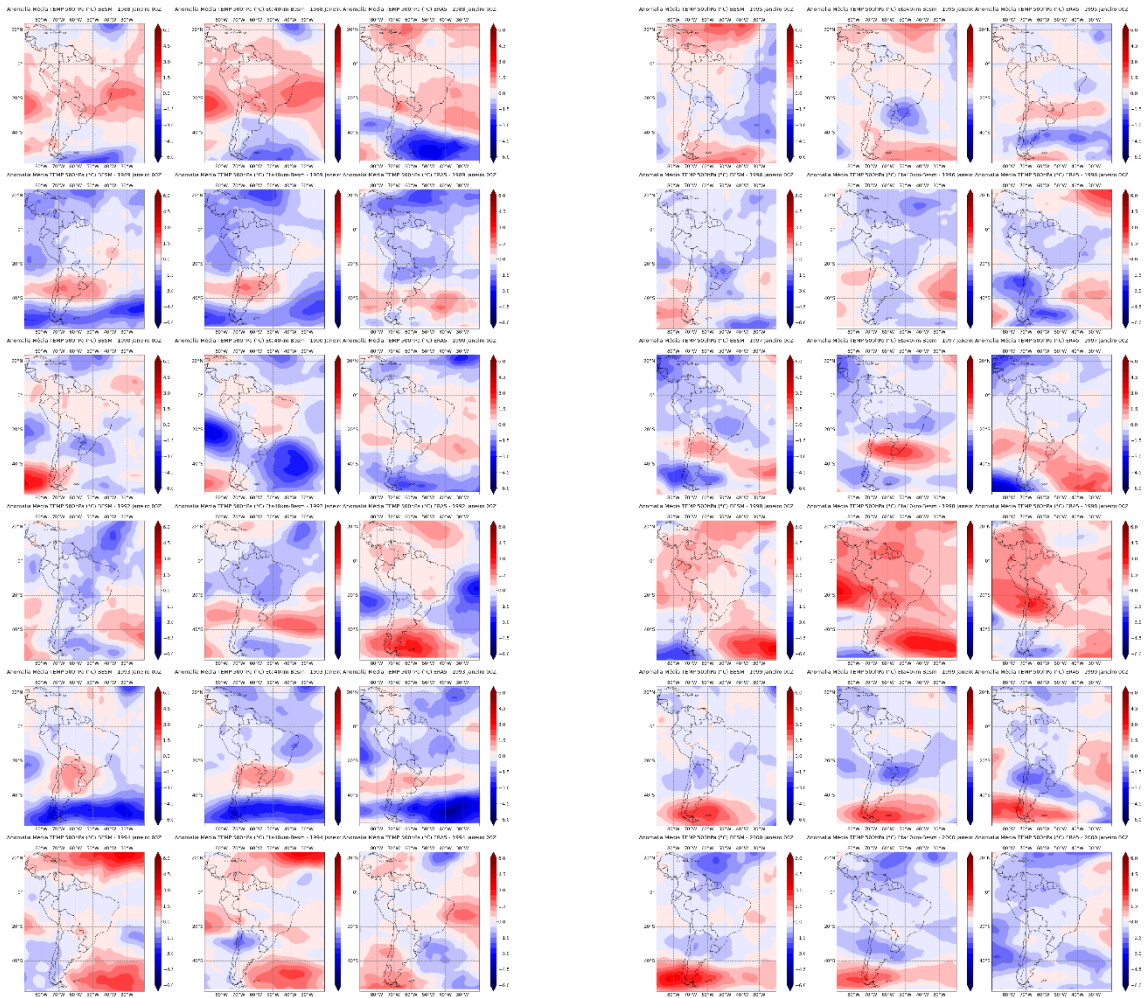
4.1.3 Temperatura em 500 hPa

Na Figura 4.7 estão representadas as anomalias de temperatura a 500 hPa do modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e valores observados pela reanálise do ERA5 para o mês de janeiro no período de 1988 a 2010.

Através da comparação das previsões de janeiro do modelo regional Eta40BESM com as do global BESM, é possível notar que o modelo regional simula valores de anomalia de temperatura bastante próximos ao global, apresentando os mesmos padrões espaciais e sinais predominantes, com apenas algumas variações entre si. Diferentemente das previsões do Eta40BESM em 850 hPa, a intensidade dos sinais em 500 hPa se mostra maior tanto sobre o continente quanto os oceanos, se aplicando para ambas anomalias positivas e negativas. Quando comparadas as previsões aos valores de observação do

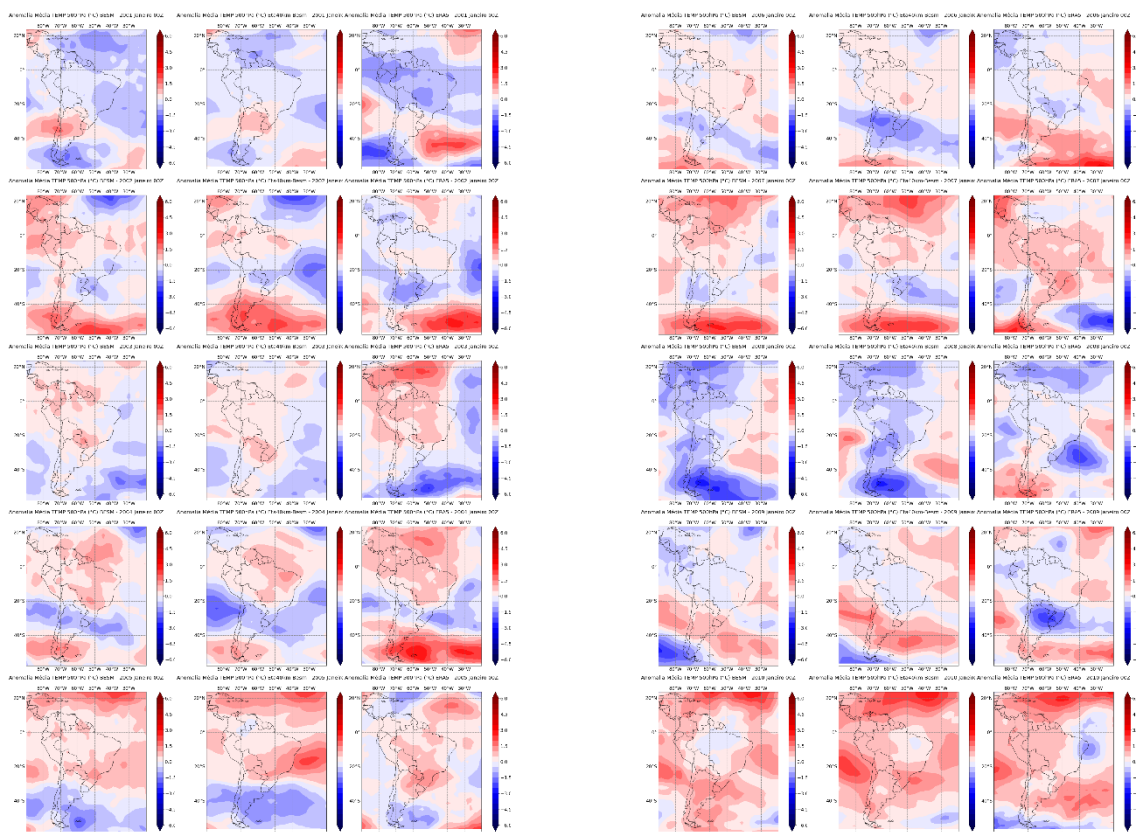
ERA5, a maior intensidade dos valores de anomalia nas simulações do Eta40BESM resultou em melhores previsões nos anos de 1989, 1993, 1996, 1998 e 2010.

Figura 4.7 - Anomalias de temperatura em 500 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de janeiro do período de 1988 até 2010.



(Continua)

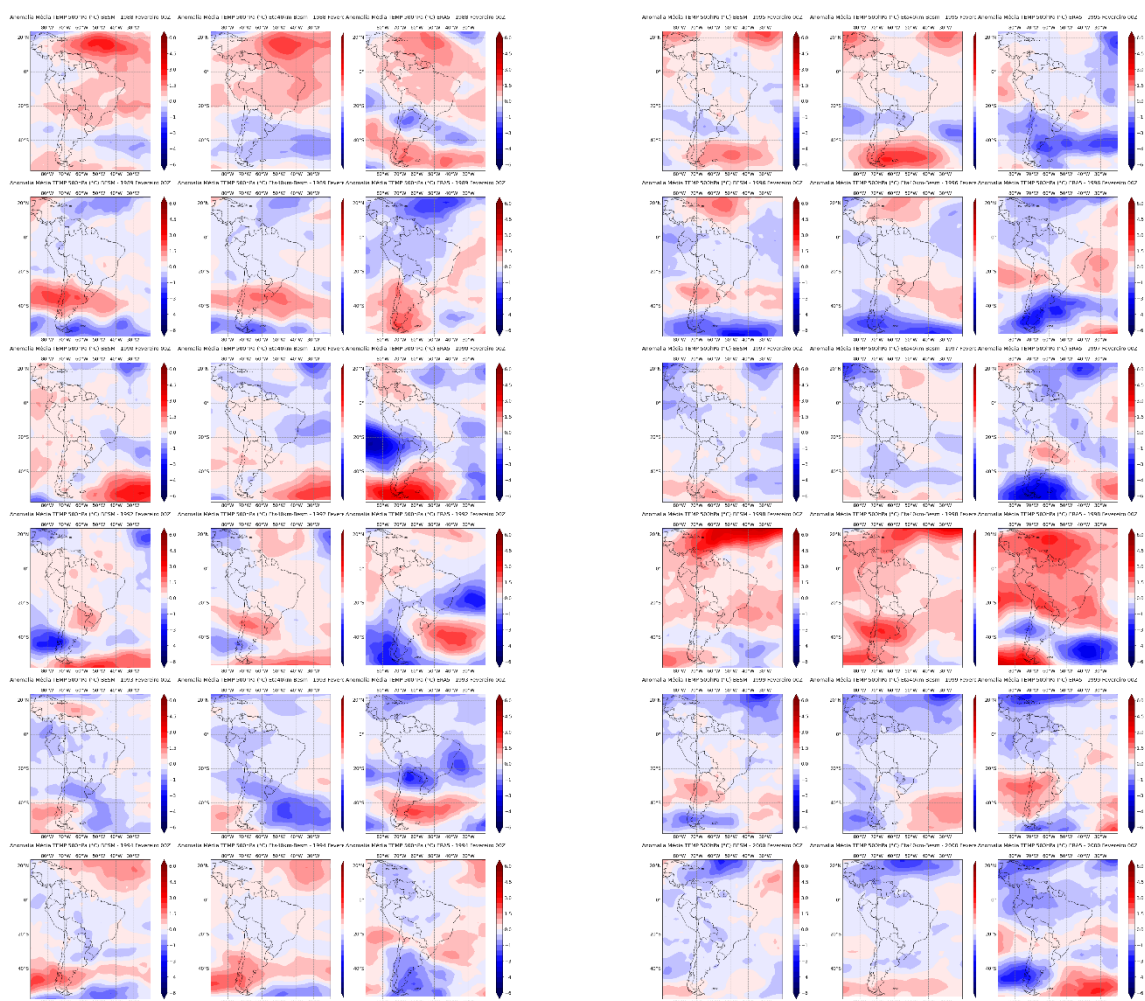
Figura 4.7 – Continuação.



A Figura 4.8 apresenta as anomalias de temperatura a 500 hPa do modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e valores observados pela reanálise do ERA5 para o mês de fevereiro no período de 1988 a 2010.

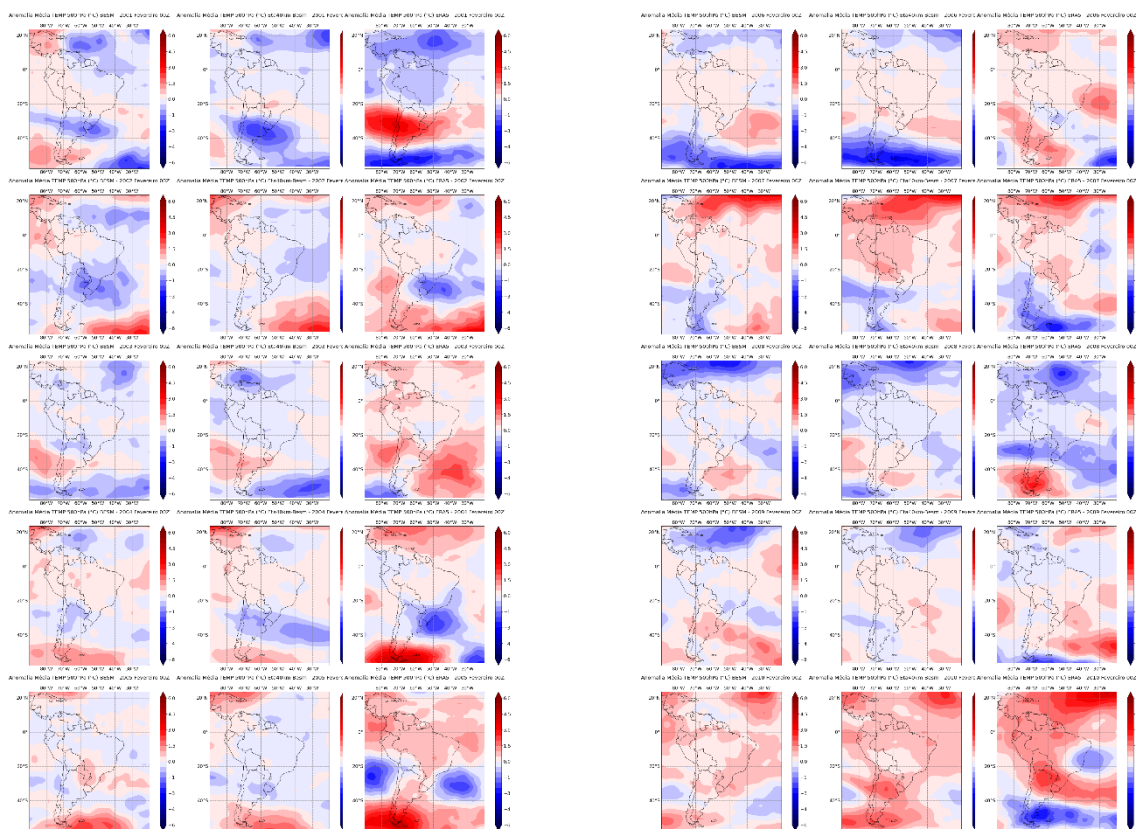
Assim como pôde ser visto nas previsões de janeiro, em fevereiro o modelo regional Eta40BESM acompanhou os padrões e sinais simulados pelo modelo global BESM, variando em intensidade nos sinais das anomalias. Por outro lado, as previsões de fevereiro não aparentaram apresentar tendências de sinais mais ou menos intensos em um modelo específico.

Figura 4.8 - Anomalias de temperatura em 500 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de fevereiro do período de 1988 até 2010.



(Continua)

Figura 4.8 – Continuação.



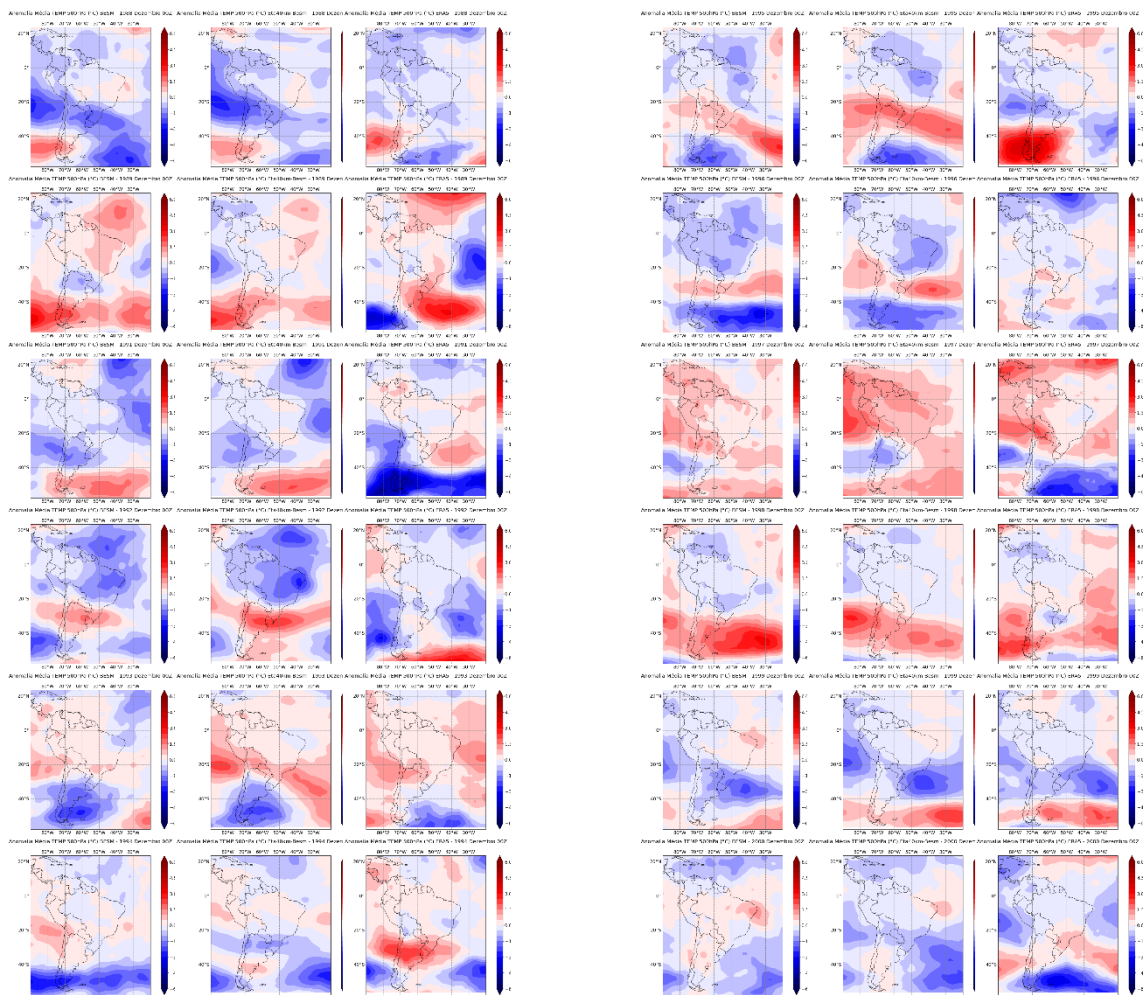
Na Figura 4.9 estão representadas as anomalias de temperatura a 500 hPa do modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e valores observados pela reanálise do ERA5 para o mês de dezembro no período de 1988 a 2009.

Assim como nas previsões de janeiro e fevereiro, as simulações do modelo Eta40BESM se mantiveram bastante próximas às do BESM, com pequenas variações em distribuição espacial e posicionamento das anomalias, assim como variações em intensidade dos sinais. Não foi possível identificar uma tendência específica do modelo regional de apresentar sinais mais ou menos intensos que o global, de modo que a intensidade dos valores de anomalia variou nas previsões de ambos os modelos.

Em geral, ao considerar as previsões de temperatura a 500 hPa realizadas pelo modelo regional Eta40BESM e o modelo global BESM para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, é possível notar que as previsões realizadas pelo Eta40BESM foram fortemente influenciadas pelas previsões do BESM, reproduzindo seus padrões gerais de distribuição

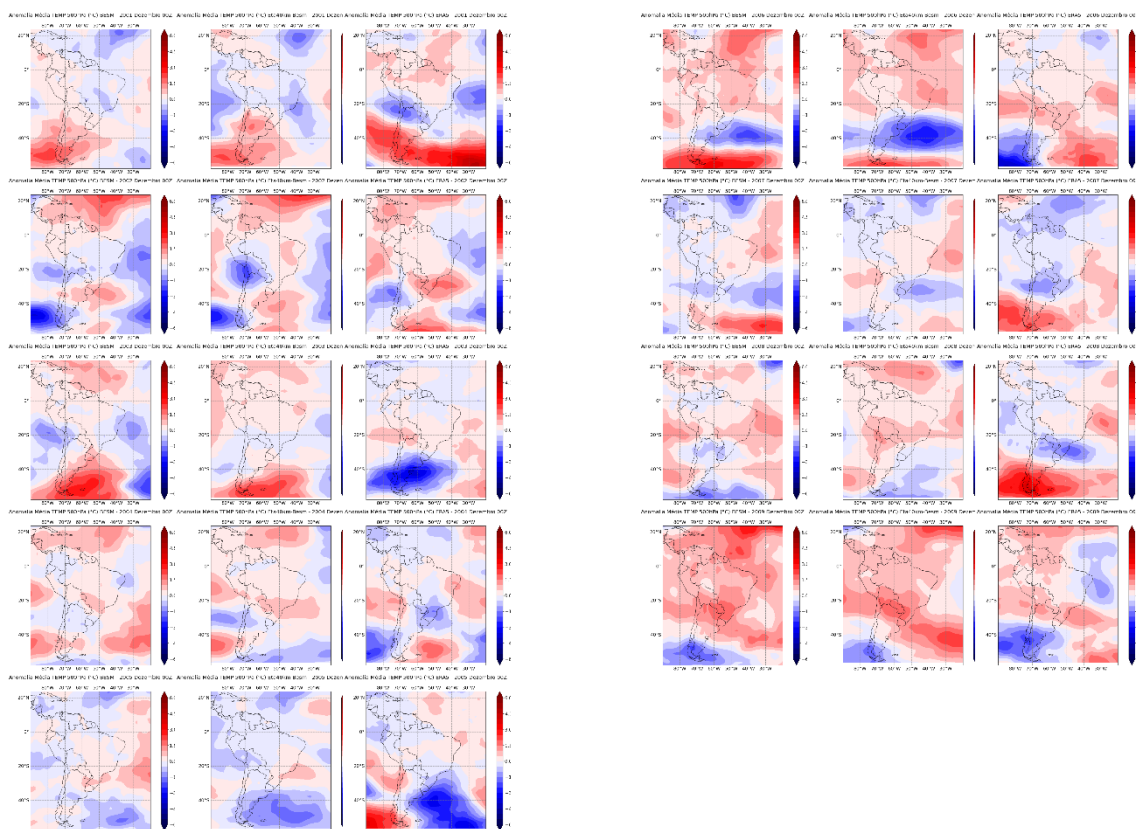
e sinais de anomalias de temperatura, apresentando apenas algumas variações de intensidade e posicionamento das regiões de anomalia. Dessa forma, a maior parte dos erros vistos nas simulações do Eta40BESM podem ser explicadas por erros produzidos pelo BESM, assim como os acertos. Nota-se também que em uma quantidade considerável de anos da série, o melhor ou pior desempenho do Eta40BESM em relação ao BESM se deu por conta da variação de intensidade das anomalias entre os modelos, cuja causa permanece indeterminada.

Figura 4.9 - Anomalias de temperatura em 500 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de dezembro do período de 1988 até 2009.



(Continua)

Figura 4.9 – Continuação.



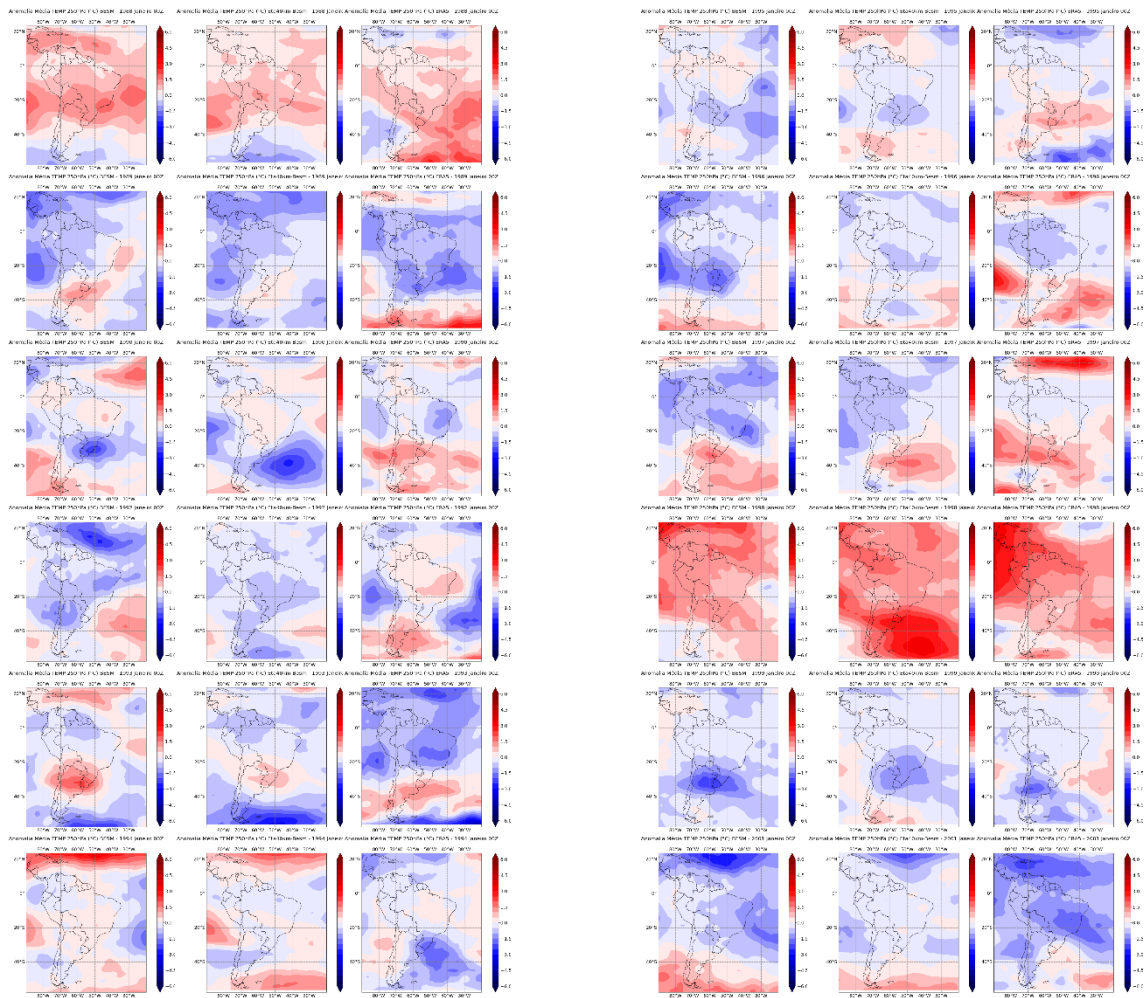
4.1.4 Temperatura em 250 hPa

A Figura 4.10 apresenta as anomalias de temperatura a 250 hPa do modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e valores observados pela reanálise do ERA5 para o mês de janeiro no período de 1988 a 2010.

A partir da comparação das previsões do modelo regional Eta40BESM com as do modelo global BESM, torna-se possível notar que o modelo regional reproduziu anomalias com os mesmos sinais e padrões espaciais que o global, herdando tanto os seus acertos quanto seus erros. Porém, as anomalias do Eta40BESM também apresentaram variações no posicionamento e intensidade dos sinais em relação ao BESM, chegando a ser o fator determinante para o melhor ou pior desempenho do modelo regional em alguns anos da série. Para o mês de janeiro, a divergência em intensidade e localização espacial das anomalias do modelo Eta40BESM em relação ao BESM fez com que o modelo regional

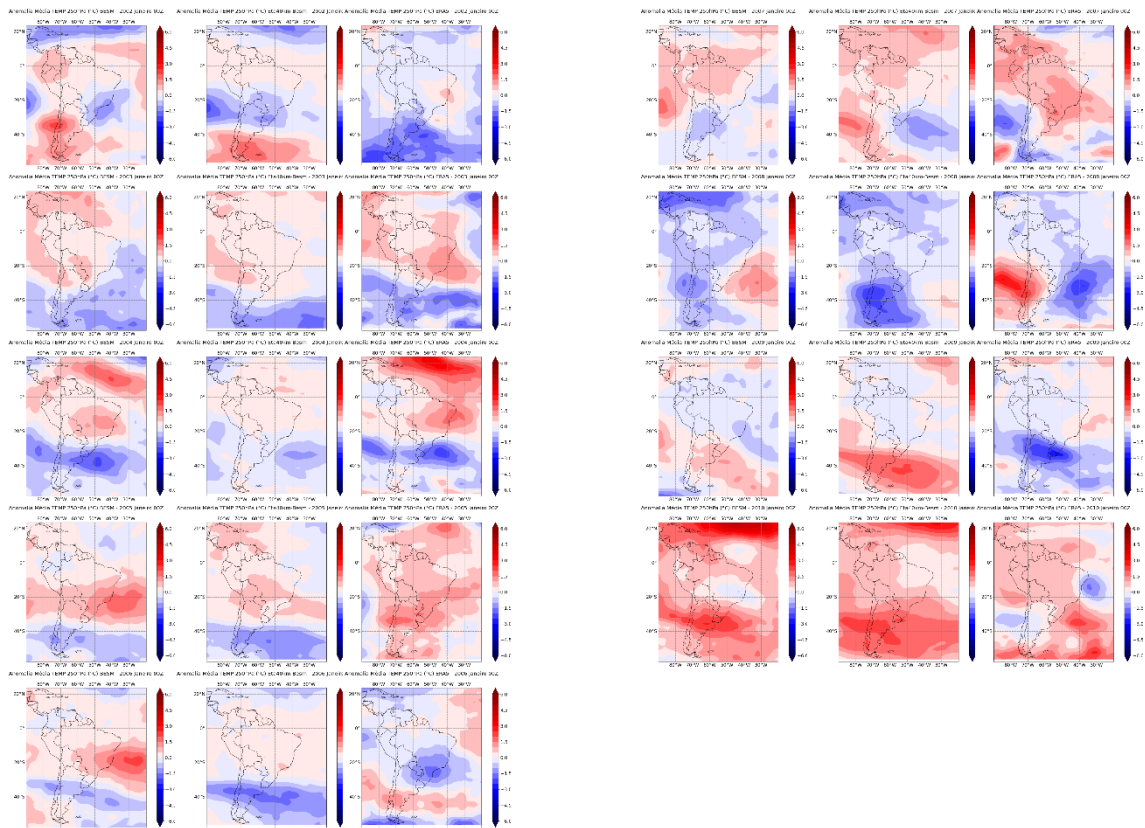
produzisse previsões mais próximas aos valores observados nos anos de 1993, 1996, 1997 e 2010. Por outro lado, a divergência do Eta40BESM fez com que o seu desempenho fosse inferior ao BESM nos anos de 2001 e 2004.

Figura 4.10 - Anomalias de temperatura em 250 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de janeiro do período de 1988 até 2010.



(Continua)

Figura 4.10 – Continuação.



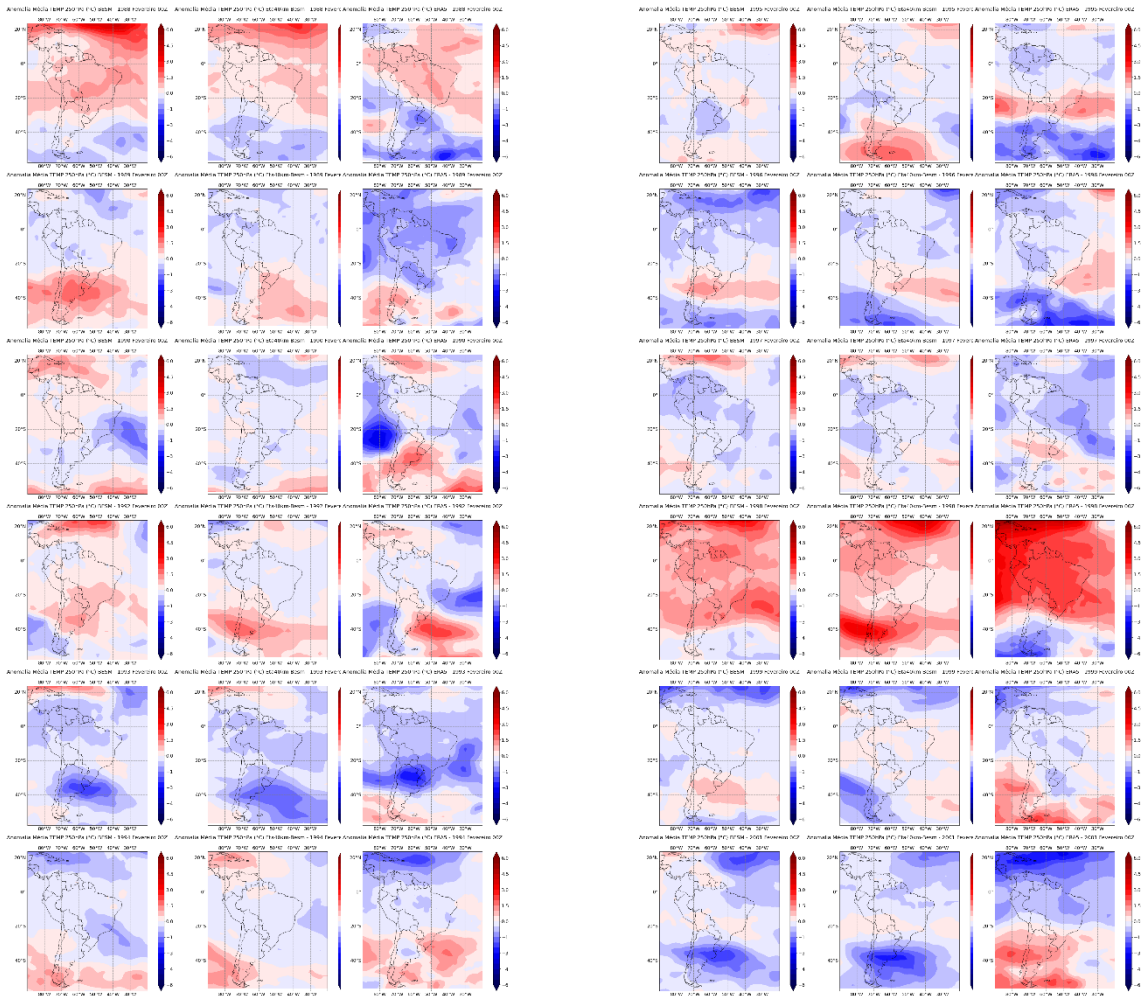
Na Figura 4.11 estão dispostas as anomalias de temperatura a 250 hPa do modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e valores observados pela reanálise do ERA5 para o mês de fevereiro no período de 1988 a 2010.

Assim como foi visto em janeiro, as previsões de fevereiro do modelo regional Eta40BESM simulam anomalias de temperatura bastante próximas às do global BESM, com pequenas variações na localização e intensidade dos sinais das anomalias, como tem sido notado para os outros meses e níveis de pressão. Essas variações resultaram em previsões do Eta40BESM mais próximas ao observado pelo ERA5 nos anos de 1992, 2003, 2007, 2009 e 2010. Por outro lado, as variações também levaram o modelo regional a produzir previsões de qualidade inferior ao global nos anos de 1998, 1999 e 2004.

Em geral, as previsões de temperatura a 250 hPa de janeiro e fevereiro produzidas pelos modelos Eta40BESM e BESM indicaram uma forte relação entre os dois modelos, com o Eta40BESM acompanhando as mesmas tendências de anomalia simuladas pelo BESM, herdando seus erros assim como acertos, mas também apresentando variações próprias.

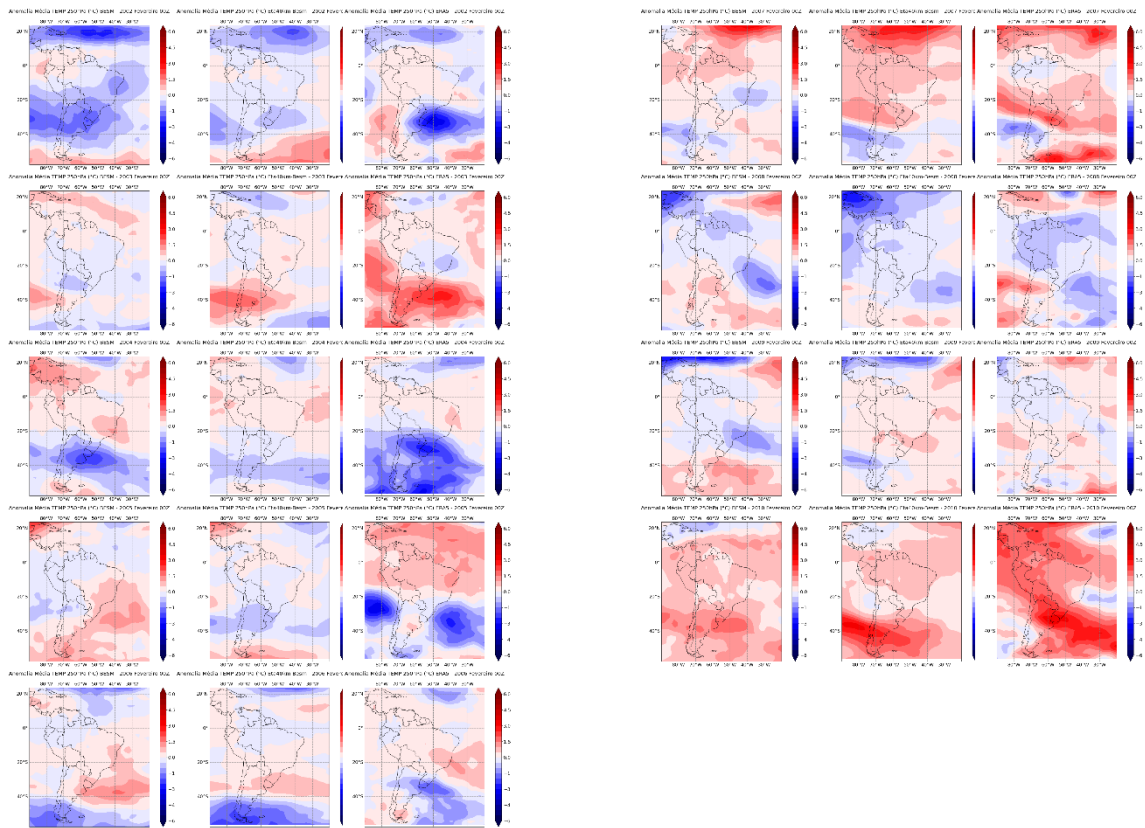
Com isso, as previsões de temperatura a 250 hPa demonstraram as mesmas características observadas nas temperaturas de outros níveis de pressão.

Figura 4.11 - Anomalias de temperatura em 250 hPa (°C) previstas pelo modelo global BESM, modelo regional Eta40BESM e observadas pelo ERA5, respectivamente, na América do Sul, para o mês de fevereiro do período de 1988 até 2010.



(Continua)

Figura 4.11 – Continuação.



4.2 Correlação

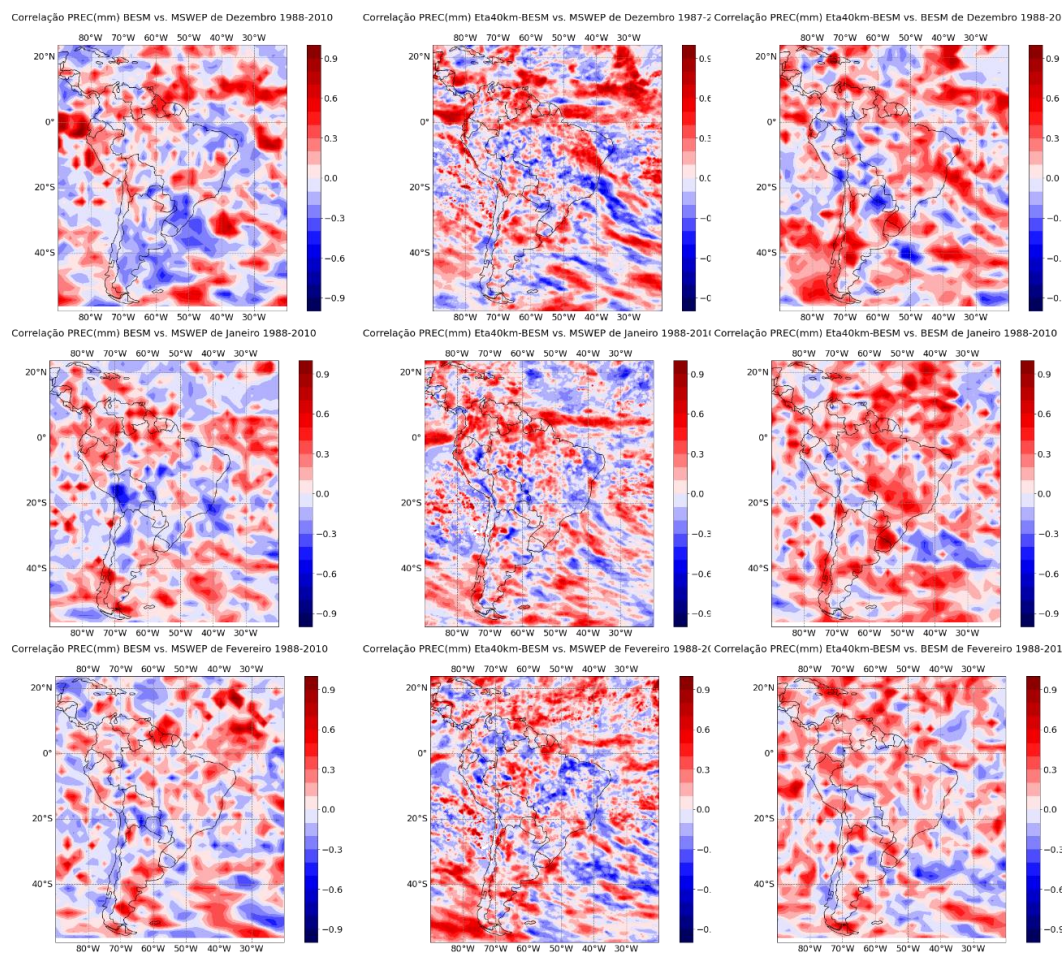
4.2.1 Precipitação

Na Figura 4.12 estão representadas as correlações entre as previsões do modelo global BESM e valores observados de precipitação do MSWEP, entre o modelo regional Eta40BESM e MSWEP e entre o modelo BESM e o Eta40BESM, para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro no período de 1988 a 2010.

Analisando primeiramente a correlação entre os modelos de previsão e os valores de observação, é possível notar que tanto para o BESM quanto o Eta40BESM não foram identificadas tendências específicas de correlações positivas ou negativas, uma vez que os sinais, padrões espaciais e as intensidades das correlações variaram em regiões diferentes para cada mês, sem apresentar um sinal predominante.

Através das correlações entre o modelo regional Eta40BESM e o modelo global BESM, foi possível notar uma predominância de correlação positiva nas previsões, sugerindo que o modelo Eta40BESM produziu simulações de precipitação que acompanharam os valores simulados pelo BESM, reafirmando as semelhanças anteriormente vistas entre as previsões dos dois modelos.

Figura 4.12 – Coeficientes de correlação entre as previsões de precipitação do modelo BESM e valores observados pelo MSWEP, entre previsões do Eta40BESM e observações do MSWEP e entre previsões do Eta40BESM e BESM, respectivamente, para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988-2010.



4.2.2 Temperatura em 850 hPa

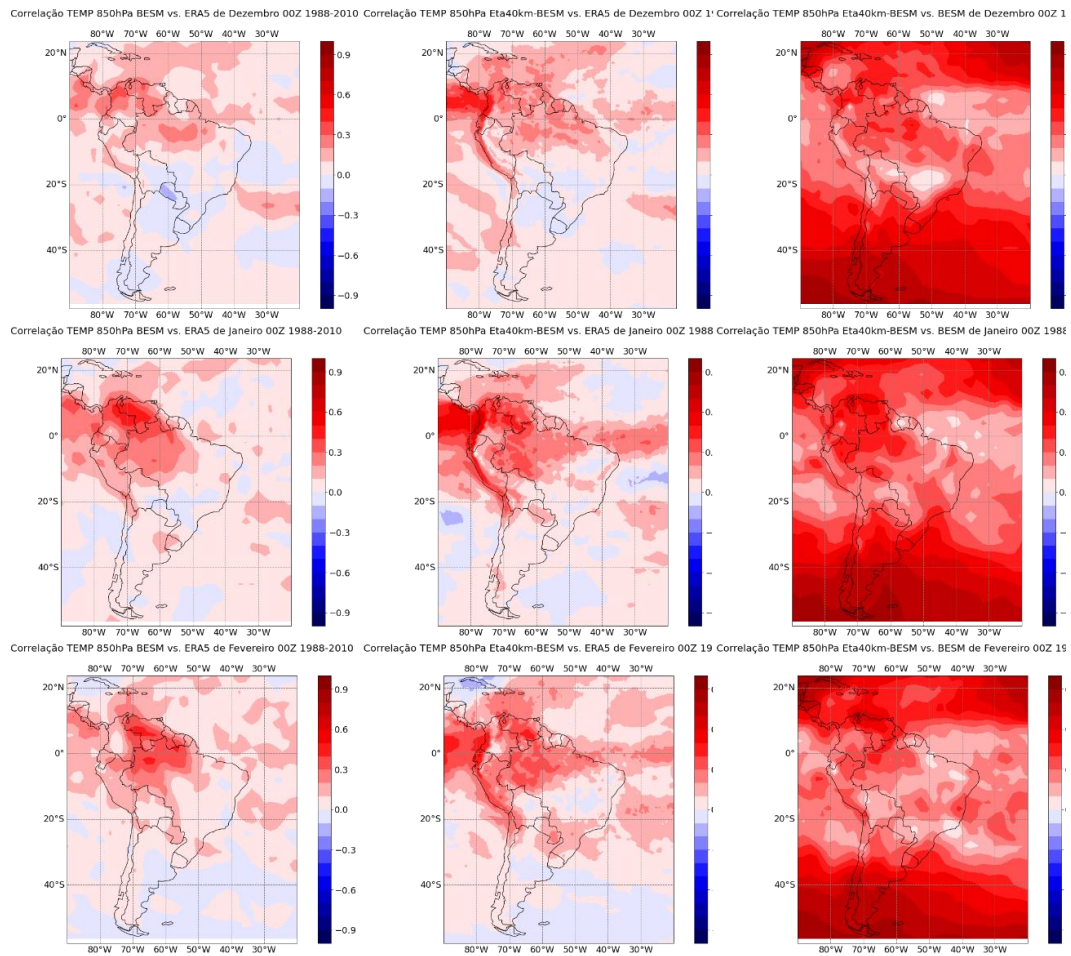
A Figura 4.13 apresenta as correlações entre as previsões do modelo global BESM e valores observados de temperatura em 850 hPa do ERA5, entre o modelo regional

Eta40BESM e ERA5 e entre o modelo BESM e o Eta40BESM, para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro no período de 1988 a 2010.

Através das correlações entre os modelos e os valores observados, é possível notar que tanto o BESM quanto o Eta40BESM apresentaram uma predominância de correlação próxima a zero, ou seja, nenhuma ou baixa correlação entre as previsões e os valores observados. Dito isso, as regiões de baixa latitude apresentaram os maiores valores de correlação entre as previsões e observações, principalmente sobre a porção norte do continente sul-americano. Esses valores positivos foram vistos em ambos os modelos, apresentando correlação positiva mais intensa no Eta40BESM, o que sugere uma melhora em suas previsões em relação ao BESM. Em relação a variações mensais, os maiores valores foram vistos no mês de janeiro e os menores em dezembro.

Para as correlações entre o modelo regional Eta40BESM e o global BESM, foram vistos altos valores de correlação entre um e outro, indicando que as previsões realizadas pelo modelo regional acompanharam fortemente as previsões do global, confirmando o que havia sido visto anteriormente em relação às simulações do Eta40BESM herdarem erros do BESM. As regiões onde os menores valores de correlação foram vistos são as de baixa latitude, as mesmas onde as previsões dos modelos apresentaram suas melhores correlações com os valores observados. Essa fraca correlação entre as previsões dos dois modelos nas baixas latitudes sugere que a boa correlação entre o Eta40BESM e os valores observados não é totalmente explicada pelo BESM, mas também por uma melhora que o modelo regional proporciona às previsões do global.

Figura 4.13 - Coeficientes de correlação entre as previsões de temperatura em 850 hPa do modelo BESM e valores observados pelo ERA5, entre previsões do Eta40BESM e observações do ERA5 e entre previsões do Eta40BESM e BESM, respectivamente, para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988-2010.



4.2.3 Temperatura em 500 hPa

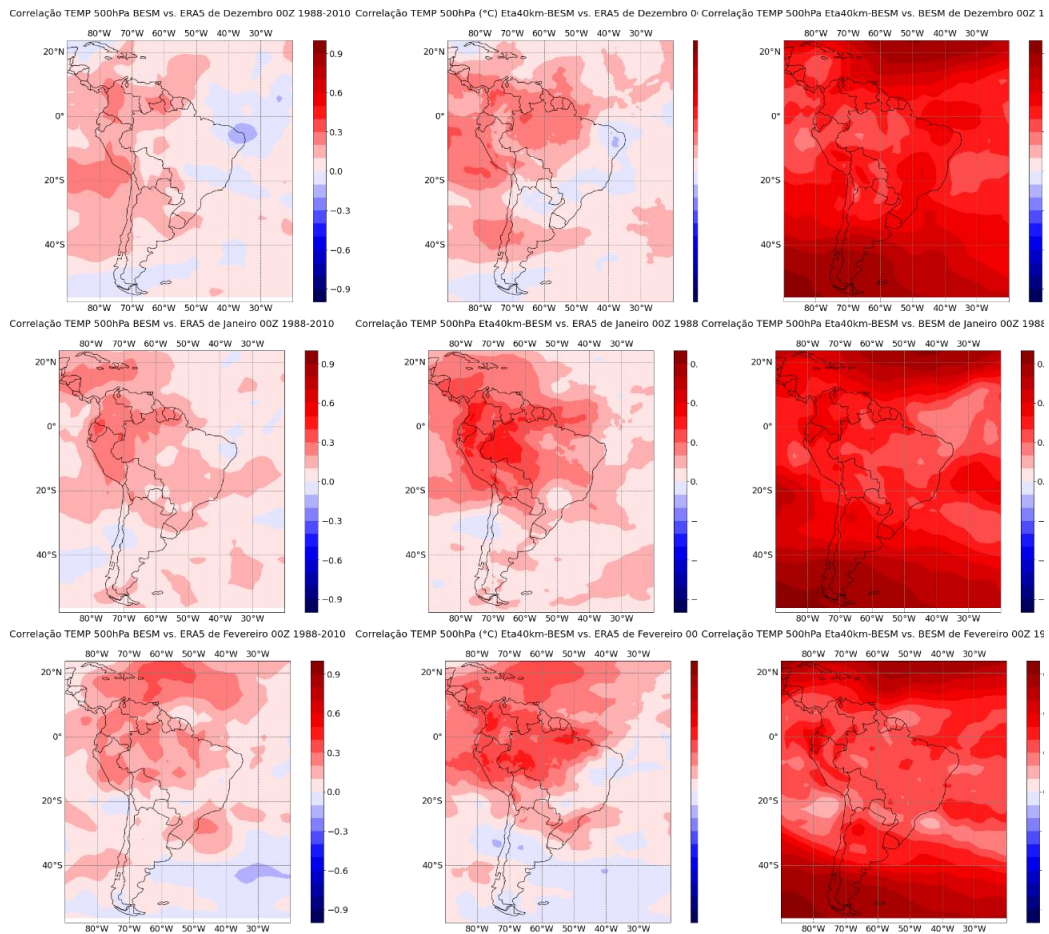
Na Figura 4.14 estão representadas as correlações entre as previsões do modelo global BESM e valores observados de temperatura em 500 hPa do ERA5, entre o modelo regional Eta40BESM e ERA5 e entre o modelo BESM e o Eta40BESM, para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro no período de 1988 a 2010.

Assim como foi visto para 850 hPa, as correlações de temperatura em 500 hPa de ambos os modelos Eta40BESM e BESM apresentaram uma predominância de valores baixos ou próximos a zero, com as correlações mais fortes se concentrando nas latitudes baixas, principalmente a região mais a norte do continente sul-americano. O modelo regional

Eta40BESM apresentou uma melhor correlação entre suas previsões e os valores observados do que o modelo BESM, indicando uma melhora nas previsões com a sua utilização. Em relação aos meses estudados, janeiro e fevereiro apresentaram as melhores correlações, enquanto dezembro teve os valores mais baixos.

Ao realizar a correlação entre os dois modelos, o regional Eta40BESM e o global BESM, é possível notar uma forte correlação entre suas previsões, indicando que as simulações do modelo regional acompanharam o que o global simulou, como havia sido notado anteriormente. Essa forte correlação entre os dois modelos reafirma que o Eta40BESM tenha herdado erros do BESM em suas previsões. Os valores mais altos de correlação entre os dois modelos estão próximos às regiões polares, enquanto os menores se concentram nas baixas latitudes, embora ainda sejam considerados valores altos.

Figura 4.14 - Coeficientes de correlação entre as previsões de temperatura em 500 hPa do modelo BESM e valores observados pelo ERA5, entre previsões do Eta40BESM e observações do ERA5 e entre previsões do Eta40BESM e BESM, respectivamente, para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988-2010.



5 CONCLUSÃO

Nesse estudo, foram avaliadas as previsões do modelo regional Eta40km aninhado ao BESM em comparação ao modelo global BESM e dados de observação do MSWEP e reanálise do ERA5, analisando suas anomalias e correlações a fim de se identificar a origem dos erros encontrados nas previsões do Eta40BESM em etapas anteriores do estudo.

Em geral, foi possível notar que as previsões do modelo regional Eta40BESM apresentaram alto grau de parentesco com as previsões do modelo global BESM, reproduzindo sinais e padrões espaciais de anomalias bastante próximos entre si, contando apenas com pequenas variações em localização e intensidade dos valores anômalos. Essa similaridade entre as previsões do Eta40BESM e do BESM foi vista em todas as variáveis analisadas de precipitação e temperatura em níveis de pressão, com precipitação demonstrando a maior divergência do modelo regional em relação ao global.

As previsões de anomalia de temperatura em 850, 500 e 250 hPa produzidas pelo modelo regional Eta40BESM apresentaram valores fortemente influenciados pelas previsões geradas pelo BESM, com seus erros tendo origem aparente no modelo BESM. Em anos onde o as simulações do BESM não tiveram erros muito significativos, o Eta40BESM foi capaz de melhorar as previsões através de variações no posicionamento e intensidade das anomalias, tornando-as mais próximas dos valores observados. Apesar disso, o modelo regional também acabou reduzindo a qualidade das previsões em alguns anos da série. Nos níveis de 850 hPa, o Eta40BESM tendeu a prever anomalias menos intensas do que o BESM sobre o continente e mais fortes sobre o oceano, enquanto em 500 hPa o modelo regional previu anomalias mais intensas em ambas as superfícies. Em 250 hPa não foi identificada uma tendência específica.

Para as previsões de precipitação, a similaridade entre as simulações do Eta40BESM e do BESM foram menos visíveis do que nas de temperatura, resultado esperado ao considerar as diferentes formas que o modelo Eta40BESM trabalha ao prever essas variáveis, mas ainda assim demonstraram influência significativa do modelo global sobre o regional. Boa parte dos erros nas previsões do Eta40BESM pôde ser identificada como

originária do modelo BESM, mas não consegue explicar em sua totalidade, sendo necessária uma investigação mais aprofundada.

O modelo regional Eta40BESM demonstrou uma melhor correlação entre suas previsões de temperatura e valores observados do que o modelo global BESM, indicando que sua implementação permitiu melhoras na qualidade das previsões. Apesar disso, os dois modelos continuaram a ter uma baixa correlação predominante em suas previsões com as observações, tendo os valores mais altos situados sobre baixas latitudes. Ao comparar as previsões dos modelos entre si, eles demonstraram forte correlação, indicando que as previsões do Eta40BESM acompanharam o comportamento das previsões do BESM. A menor correlação entre os modelos foi vista sobre baixas latitudes, a mesma região onde apresentaram uma melhor relação com dados de observação, sugerindo que a região onde o Eta40BESM tem seu melhor desempenho nas previsões é onde ele possui a maior divergência do modelo BESM.

5.1 Próximos Passos

Nos próximos passos deste trabalho, as seguintes atividades serão elaboradas:

- a) Continuar a avaliação das previsões Eta-BESM abordando aspectos de reprodutibilidade de processos e fenômenos climáticos;
- b) Investigar a origem remota ou global das anomalias positivas e negativas de chuva no Sudeste;
- c) Relacionar os erros das previsões de precipitação e temperatura com os erros das variáveis de altos níveis e com anomalias de TSM.

5.2 Agradecimentos

Agradecimento especial ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao CNPQ pelo apoio ao trabalho, desenvolvido com bolsa CNPq PIBIC/CNPq/INPE 133540/2021-9.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHOU, S.C.; BUSTAMANTE, J.F.; GOMES, J. 2005. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, 12: 537-555. doi: <<https://doi.org/10.5194/npg-12-537-2005>>
- CHOU, S.C.; DEREZYNSKI, C.P.; GOMES, J.L.; PESQUERO, L.F.; ÁVILA, A.M.H.; RESENDE, N.C.; ALVES, L.F.; RUIZCÁRDENAS, R.; SOUZA, C.R.; BUSTAMANTE, J.F.F. 2020. Ten-year hindcasts of Eta seasonal forecasts. In Press. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**. doi: <<https://doi.org/10.1590/0001-3765202020181242>>
- NOBRE, P.; SIQUEIRA, L.S.P.; ALMEIDA, R.A.F.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELAO, G.P.; BOTTINO, M.J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S.N.; COSTA, M.C.; SILVA, M.B.; IRBER, JR. L.C.; MARCONDES, G.G. 2013. Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, 26: 6716-6732.
- MESINGER, F.; CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J.F.; et al. 2012. An upgraded version of the Eta model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 116, 63–79. doi: <<https://doi.org/10.1007/s00703-012-0182-z>>
- MESINGER, F.; JANJIC, Z.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D.G. 1988. The Step-Mountain Coordinate: Model Description and Performance for Cases of Alpine Lee Cyclogenesis and for a Case of an Appalachian Redevelopment, **Monthly Weather Review**, 116(7), 1493-1518.
- BLACK, T. L. 1994. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples, **Weather and Forecasting**, v. 9(2), 265-278.
- CHOU, S.C. 1996. **Modelo Regional Eta**. Climanálise. Edição Comemorativa de 10 anos, INPE, São José dos Campos. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/27.html>>
- HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. 2020; 146: 1999– 2049. doi: <<https://doi.org/10.1002/qj.3803>>

BECK, H.E.; WOOD, E.F.; PAN, M.; FISHER, C.K.; MIRALLES, D.G.; VAN DIJK, A.I.J.M.; MCVICAR, T.R.; ADLER, R.F. 2019. MSWEP V2 Global 3-Hourly 0.1° Precipitation: Methodology and Quantitative Assessment, **Bulletin of the American Meteorological Society**, 100(3), 473-500.

LAPRISE, R.; VARMA, M.R.; DENIS, B.; CAYA, D.; ZAWADZKI, I. 2000. Predictability of a Nested Limited-Area Model, **Monthly Weather Review**, 128(12), 4149-4154.

LAPRISE, R.; ELÍA, R.; CAYA, D.; BINER, S.; LUCAS-PICHER, P.; DIACONESCU, E.; LEDUC, M.; ALEXANDRU, A.; SEPAROVIC, L. 2008. Challenging some tenets of Regional Climate Modelling. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 100, 3–22 (2008). doi: <<https://doi.org/10.1007/s00703-008-0292-9>>

MENÉNDEZ, C.G.; SAULO, A.C.; LI, Z.X. 2001. Simulation of South American wintertime climate with a nesting system. **Climate Dynamics** 17, 219–231 (2001). doi: <<https://doi.org/10.1007/s003820000107>>

NICOLINI, M.; SALIO, P.; KATZFEY, J.J.; MCGREGOR, J.L.; SAULO, A.C. 2002. January and July regional climate simulation over South America, **Journal of Geophysical Research**, 107(D22), 4637. doi: <<https://doi.org/10.1029/2001JD000736>>

MISRA, V.; DIRMEYER, P.A.; KIRTMAN, B.P.; JUANG, H.M.H.; KANAMITSU, M. 2002. Regional simulation of interannual variability over South America, **Journal of Geophysical Research**, 107 (D20). doi: <<https://doi.org/10.1029/2001JD900216>>