

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
COORDENADORIA ESPECIAL DE OCEANOGRAFIA
CURSO BACHARELADO EM OCEANOGRAFIA

LEANDRO JOSÉ ROCHA MAGINA

**ESTUDO DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS E DA PREVISIBILIDADE DA OSCILAÇÃO
MADDEN-JULIAN COM O MODELO OLAM**

FLORIANÓPOLIS

2018

LEANDRO JOSÉ ROCHA MAGINA

**ESTUDO DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS E DA PREVISIBILIDADE DA OSCILAÇÃO
MADDEN-JULIAN COM O MODELO OLAM**

Projeto apresentado ao Curso de Bacharelado em Oceanografia, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para o desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso.

Orientador: Prof. Renato Ramos da Silva

FLORIANÓPOLIS

2018

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de
Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.**

Magina, Leandro José Rocha

Estudos dos processos envolvidos na previsibilidade da Oscilação Madden Julian com o modelo OLAM / Leandro José Rocha Magina; orientador, Renato Ramos da Silva.- Florianópolis, SC, 2018.

98 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia.

Inclui referências

1. Oscilação Madden Julian, 2. OLAM, 3. Interação oceano-atmosfera, 4. Temperatura da superfície do mar, 5. Parametrização cumulus. I Ramos da Silva, Renato. II Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Oceanografia. III. Título.

LEANDRO JOSÉ ROCHA MAGINA

**ESTUDO DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS E DA PREVISIBILIDADE DA
OSCILAÇÃO MADDEN-JULIAN COM O MODELO OLAM**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia pela Universidade Federal de Santa Catarina e aprovado em sua forma final.

Florianópolis, 21 de novembro de 2018.

Prof.^a Dr.^a Juliana Leonel,
Coordenador do Curso

Prof. Dr. Renato Ramos da Silva,
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Dr.^a Regina Rodrigues Rodrigues
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Reinaldo Haas
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Um ciclo muito importante e está se encerrando na minha vida e é impossível dizer que cheguei até aqui sozinho, pois se não fosse a ajuda de cada pessoa que atravessou meu caminho nos últimos seis anos eu não seria a pessoa que me tornei. Sem o apoio delas eu jamais teria concretizado um dos maiores sonhos da minha vida e mesmo com a distância, suas presenças me fortaleceram e me incentivaram a continuar.

Agradeço imensamente a minha família, em especial à minha mãe Zenaide por todo seu carinho, amor, afeto e suporte emocional nos momentos mais difíceis, ao meu pai Laércio por ter me incentivado sempre a seguir meu caminho e correr atrás dos meus sonhos e minha irmã Larissa que sempre foi um porto seguro para desabafos e risos.

À minha querida avó Cidinha que sempre me ilumina com suas ideias e me faz crer que sempre estive no caminho certo, aos meus tios Beatriz (Didita) e tio Valdeci que me acolheram quando saí de minha cidade, dando-me suporte e abrigo para o início de minha jornada.

A todos os meus amigos em especial a turma de 2012 Oceanografia-UFES, amigos os quais posso chamar de irmãos, pois foram essenciais para me sentir em casa mesmo com a distância.

Em especial um imenso agradecimento para minhas amigas Lyla Narah (Alma Solar) e Priscilla Karen de Sousa (Pri Floresta) que foram dois faróis na minha vida nos últimos anos, Sol e Lua, meus amores, que sempre me apresentaram um norte nesse oceano de dores e alegrias.

Aos meus outros amigos florestas, Maíra Fernandes, Patrícia Ribeiro e Gabriel Falcão que sempre estavam comigo apesar da distância, sendo as partes de mim espalhadas por esse mundão. E também, em especial, a meu amigo Pedro (Pedroca, PP, pai), que desde o primeiro dia que conheci já sabia que era minha família.

Eu não poderia deixar de ressaltar a importância de algumas pessoas que cruzaram meu caminho e por compartilhar seus conhecimentos permitiram uma perspectiva mais enriquecedora da minha graduação. Como a orientação da Prof. Dr. Renato Ramos da Silva que, com toda sua paciência e prestatividade, sempre se apresentou como um exemplo de pessoa e profissional a ser seguido além de que também tenho um carinho gigantesco.

Aos membros da banca por aceitarem participar da construção deste trabalho, Prof^a. Dr^a. Regina R. Rodrigues. Dr. Reinaldo Haas.

“Tudo aquilo que o homem ignora, não existe para ele. Por isso, o Universo de cada um, se resume ao tamanho do seu saber.”

Albert Einstein

RESUMO

A Oscilação Madden Julian (OMJ) é um modo de variabilidade climático intrasazonal de escala planetária que influencia a distribuição espacial da convecção e da precipitação. O fenômeno geralmente tem início sobre o Oceano Índico Tropical e se propaga lentamente para leste (cerca de 5-6 m/s) ao longo da região de temperaturas mais quentes dos oceanos Índico, Pacífico e Atlântico. Estudos recentes mostram que esta oscilação tem a capacidade de influenciar não só a região tropical, mas também as regiões dos subtropicais e extratropicais. Deste modo, melhorar a previsibilidade deste fenômeno é de grande importância para a sociedade de forma geral. Este trabalho tem como objetivo de avaliar a capacidade do modelo de previsão numérica Ocean Land Atmosphere Model (OLAM) na previsibilidade de um evento da OMJ ocorrido entre os meses de março e abril de 2015. O modelo OLAM possui grades não estruturadas que se distribuem sobre o globo terrestre possibilitando um aumento na resolução espacial através do refinamento de grade. No presente estudo foram feitas três simulações de 31 dias para este evento. A primeira simulação foi feita utilizando a média mensal climatológica da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e a parametrização cumulus do tipo Kain-Fritsch; a segunda utilizando campos de TSM atualizados semanalmente e parametrização cumulus do tipo Kain-Fritsch; e por fim com a TSM atualizada semanalmente com parametrização cumulus do tipo Grell-Freitas. A grade espacial foi configurada a nível global com espaçamento de 200 km e com refinamento para a região tropical com espaçamento de 100 km. Para a avaliação e comparação dos resultados gerados pelo modelo com dados observacionais, foram utilizados dados de precipitação obtidos a partir das observações do satélite TRMM e do satélite GPM e dados de reanálise do projeto National Center for Environmental Prediction (NEP) para os campos de ventos. Os resultados mostram que o modelo consegue prever melhor a precipitação durante este episódio da OMJ quando configurado com o tipo de parametrização cumulus Grell-Freitas, segundo os mapas de precipitação acumulada e anomalia de precipitação para o período. Além disso, esta configuração apresenta o melhor viés de precipitação para o modelo. Para os campos de ventos os resultados mostram que a configuração utilizando a

parametrização do tipo Kain-Fritsch apresenta melhores resultados se comparados com os observados nos mapas de vento da propagação da OMJ. Portanto, conclui-se que, o tipo de parametrização utilizada na configuração do modelo para a previsibilidade deste evento da OMJ foi mais relevante do que a própria mudança da TSM de climatológica para a TSM atualizada semanal nestas simulações.

Palavras-chave: Oscilação Madden Julian, OLAM, variabilidade climática, TSM, parametrização cumulus.

ABSTRACT

The Madden Julian Oscillation (MJO) is a mode of intrasazonal climate variability of planetary scale that has an influence on the spatial distribution of convection and precipitation. The phenomenon usually begins on the tropical Indian Ocean and spreads slowly eastwards (about 5-6 m / s) along the hottest region of the Indian, Pacific and Atlantic oceans. Recent studies show that this oscillation has the ability to influence not only the tropical region, but also the subtropical and extratropical regions. In this way, improving the predictability of this phenomenon is of great importance for society in general, so this work aims to evaluate the capacity of the Ocean Land Atmosphere Model (OLAM) numerical prediction model in the predictability of an event of the OMJ occurred between the months of March and April 2015. The OLAM model has unstructured grids that distribute over the terrestrial globe allowing an increase in spatial resolution through grid refinement. In the present study three 31-day simulations were performed for this event. The first simulation was done using the monthly climatological average of the Sea Surface Temperature (SST) and the Kain-Fritsch cumulus parameterization; the second using weekly updated SST fields and Kain-Fritsch cumulus parameterization; and finally with the SST updated weekly with Cumulus parameterization of the Grell-Freitas type. The spatial grid was configured at a global level with spacing of 200 km and with refinement for the tropical region with spacing of 100 km. For the evaluation and comparison of the results generated by the model with observational data, precipitation data obtained from the observations of the TRMM satellite and the GPM satellite were used and the National Center for Environmental Prediction (NEP) data for wind fields . The results show that the model can better predict the precipitation during this episode of OMJ when configured with the Grell-Freitas clustering parameter, according to the maps of accumulated precipitation and precipitation anomaly for the period. In addition, this configuration presents the best precipitation skill for the model. For the wind fields, the results show that the configuration using the Kain-Fritsch parameterization presents better results when compared to those observed in the wind maps of the OMJ propagation. Therefore, it is concluded that the type of parameterization used in the configuration of the model for the

predictability of this event of the OMJ was more relevant than the change from the SST of climatological to the weekly updated SST in these simulations.

Keywords: Madden Julian oscillation, OLAM, climatic variability, SST, cumulus parameterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Anomalias de ROL da sequência de fases da OMJ (fases 2, 3, 6 e 7 não mostradas). A cor vermelha (azul) indica anomalias positivas (negativas) com nível de confiança melhor que 95%.....	24
Figura 2 - Índice de desenvolvimento independente para o caso da OMJ de março/abril de 2015, criado por Wheeler e Hendon (2004). Fonte: http://www.cpc.ncep.noaa.gov (2018).	25
Figura 3- Icosaedro	29
Figura 4- Grade icosaédrica usada no modelo OLAM.	30
Figura 5- Ilustração do refinamento das grades horizontais.....	31
Figura 6 - Ilustração das etapas conduzidas durante uma integração numérica do modelo OLAM.	35
Figura 7- Altura do relevo e refinamento espacial das grades sobre o globo com espaçamento de 200 km e 100 km para o cinturão tropical.	37
Figura 8 - Precipitação média acumulada para Período1; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.....	42
Figura 9 – Precipitação média acumulada para a os dias 5 – 10 março de 2015 simuladas pelo modelo e pelos satélites TRMM E GPM; barras a esquerda região do cinturão tropical, barras centrais região NEB e barras a direita região sul do Brasil.43	
Figura 10– Anomalia de Precipitação Acumulada para o Período1; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.....	44
Figura 11- Precipitação média acumulada para Período2; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.....	46

Figura 12– Precipitação média acumulada para a os dias 10 – 15 março de 2015 simuladas pelo modelo e pelos satélites TRMM E GPM; barras a esquerda região do cinturão tropical, barras centrais região NEB e barras a direita região sul do Brasil.	47
Figura 13- Anomalia Precipitação Acumulada para o Período2; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.	48
Figura 14– Precipitação média acumulada para Período3; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.	49
Figura 15– Precipitação média acumulada para a os dias 15 – 20 março de 2015 simuladas pelo modelo e pelos satélites TRMM E GPM; barras a esquerda região do cinturão tropical, barras centrais região NEB e barras a direita região sul do Brasil.	50
Figura 16- Anomalia de Precipitação Acumulada para o Período2; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.	52
Figura 17– Precipitação média acumulada para o Período4; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.	54
Figura 18– Precipitação média acumulada para a os dias 20 – 25 março de 2015 simuladas pelo modelo e pelos satélites TRMM E GPM; barras a esquerda região do cinturão tropical, barras centrais região NEB e barras a direita região sul do Brasil.	55
Figura 19- Anomalia de Precipitação Acumulada para o Período2; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.	56
Figura 20 – Precipitação média acumulada para O Período5; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.	58

Figura 21– Precipitação média acumulada para a os dias 20 – 25 março de 2015 simuladas pelo modelo e pelos satélites TRMM E GPM; barras a esquerda região do cinturão tropical, barras centrais região NEB e barras a direita região sul do Brasil.	59
Figura 22- Anomalia de Precipitação Acumulada para o Período5; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.	60
Figura 23 – Precipitação média acumulada para o Período6; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.	62
Figura 24 – Imagem do satélite MODIS-NASA do Oceano Índico Tropical, a) no dia 4 de abril de 2015, b) no dia 7 de abril de 2015 com dois ciclones tropicais formados, Joalane a esquerda, e Ikola, a direita. Fonte: https://worldview.earthdata.nasa.gov .	63
Figura 25– Precipitação média acumulada para o período de 30 de março a 04 de abril de 2015 simuladas pelo modelo e pelos satélites TRMM E GPM; barras a esquerda região do cinturão tropical, barras centrais região NEB e barras a direita região sul do Brasil.	64
Figura 26- Anomalia de Precipitação Acumulada para o Período6; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.	66
Figura 27– Precipitação média acumulada para o período inteiro; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.	68
Figura 28– Análise da Série Temporal das três simulações com o modelo OLAM e as precipitações observadas pelo satélite para a região Tropical levando em consideração todo o período de 5 de março a 4 de abril de 2015.	69
Figura 29 – Análise da Série Temporal das três simulações com o modelo OLAM e as precipitações observadas pelo satélite para a região NEB levando em consideração todo o período de 5 de março a 4 de abril de 2015.	70

Figura 30– Análise da Série Temporal das três simulações com o modelo OLAM e as precipitações observadas pelo satélite para a região Sul do Brasil levando em consideração todo o período de 5 de março a 4 de abril de 2015.....	71
Figura 31– Viés das três simulações do modelo OLAM para a região dos Trópicos, a) com base no satélite TRMM, b) com base no satélite GPM-NASA.....	72
Figura 32– Viés das três simulações do modelo OLAM para a região do NEB, a) com base no satélite TRMM, b) com base no satélite GPM-NASA.....	74
Figura 33 – Viés das três simulações do modelo OLAM para a região Sul do Brasil, a) com base no satélite TRMM, b) com base no satélite GPM-NASA.....	76
Figura 34- Anomalia do vento zonal a 850hPa para o Período 1; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.	78
Figura 35- Anomalia do vento zonal a 850hPa para o Período 2; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.	80
Figura 36- Anomalia do vento zonal a 850hPa para o Período 3; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.	82
Figura 37- Anomalia do vento zonal a 850hPa para o Período 4; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.	84
Figura 38- Anomalia do vento zonal a 850hPa para o Período 5; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.	86
Figura 39- Anomalia do vento zonal a 850hPa para o Período 6; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.	88

Figura 40- Diagrama *Hovmöller* a 250hPa; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP. 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Configurações do modelo OLAM .

36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
2. OBJETIVOS	27
2.1 OBJETIVO GERAL	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3. METODOLOGIA.....	27
3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO	28
3.1.1 Estrutura de Grade	28
3.1.2 Equações Dinâmicas Governantes.....	32
3.1.3 Discretização Numérica	33
3.1.4 Parametrizações Físicas.....	33
3.2 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS NUMÉRICOS.....	35
3.3 DADOS UTILIZADOS	37
4. RESULTADOS	39
4.1 PERÍODO DE 5-10 DE MARÇO DE 2015	40
4.1.1 Análise da precipitação acumulada	40
4.1.2 Análise da anomalia de precipitação	43
4.2 PERÍODO DE 10-15 DE MARÇO DE 2015	44
4.2.1 Análise da precipitação acumulada	45
4.2.2 Análise da anomalia de precipitação	47
4.3 PERÍODO DE 15-20 DE MARÇO DE 2015	48
4.3.1 Análise da precipitação acumulada	48
4.3.2 Análise da anomalia de precipitação	50
4.4 PERÍODO DE 20-25 DE MARÇO DE 2015	52
4.4.1 Análise da precipitação acumulada	53

4.4.2	Análise da anomalia de precipitação	55
4.5	PERÍODO DE 25-30 DE MARÇO DE 2015	56
4.5.1	Análise da precipitação acumulada	57
4.5.2	Análise da anomalia de precipitação	59
4.5	PERÍODO DE 30 DE MARÇO-04 DE ABRIL DE 2015	60
4.6.1	Análise da precipitação acumulada	60
4.6.2	Análise da anomalia de precipitação	64
4.7	ANÁLISE TEMPORAL PARA O PERÍODO TODO	66
4.7.1	Análise da precipitação acumulada para o período total	66
4.7.2	Análise da série temporal para a região tropical	69
4.7.3	Análise da série temporal para a região NEB	69
4.7.4	Análise da série temporal para a região Sul	70
4.8	ANÁLISES DO VIÉS DO MODELO PARA A PRECIPITAÇÃO.....	71
4.8.1	Análise do viés do modelo para a região dos Trópicos.....	71
4.8.2	Análise do viés do modelo para a região NEB.....	73
4.8.3	Análise do viés do modelo para a região Sul.....	74
4.9	ANÁLISE ESPACIAL DOS VENTOS	76
4.9.1	Análise espacial da anomalia de ventos para o período de 5 a 10 de março de 2015.....	77
4.9.2	Análise espacial da anomalia de ventos para o período de 10 a 15 de março de 2015.....	79
4.9.3	Análise espacial da anomalia de ventos para o período de 15 a 20 de março de 2015.....	81
4.9.4	Análise espacial da anomalia de ventos para o período de 20 a 25 de março de 2015.....	83
4.9.5	Análise espacial da anomalia de ventos para o período de 25 a 30 de março de 2015.....	85

4.9.6 Análise espacial da anomalia de ventos para o período de 30 de março a 4 de abril de 2015	87
4.9.7 Análise diagrama <i>Hovmöller</i> para as três simulações	88
5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
REFERÊNCIAS	93

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AS	América do Sul
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellites
GPM	Global Precipitation Measurement
GRADS	Grid Analysis and Display System
IMG	Imageador de Micro-ondas GPM
JAXA	Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial
MCGA	Modelos de Circulação Geral da Atmosfera
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NEB	Nordeste do Brasil
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OLAM	Ocean-Land-Atmosphere Model
OMJ	Oscilação Madden Julian
ROL	Radiação de Ondas Longas

RPD	Radar de Precipitação de Dupla frequência
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ZCPS	Zona de Convergência do Pacífico Sul

1. INTRODUÇÃO

A grande dificuldade no entendimento dos fenômenos envolvidos na interação entre o oceano e atmosfera tem se tornado fonte de inspiração para diversos cientistas do mundo em tornar menos complexa a compreensão desses eventos que influenciam, não só na vida diária das pessoas, mas também diversas esferas sociais e econômicas. Portanto, aprimorar o conhecimento de tais eventos pode servir como argumento científico e estratégia política entre os tomadores de decisão.

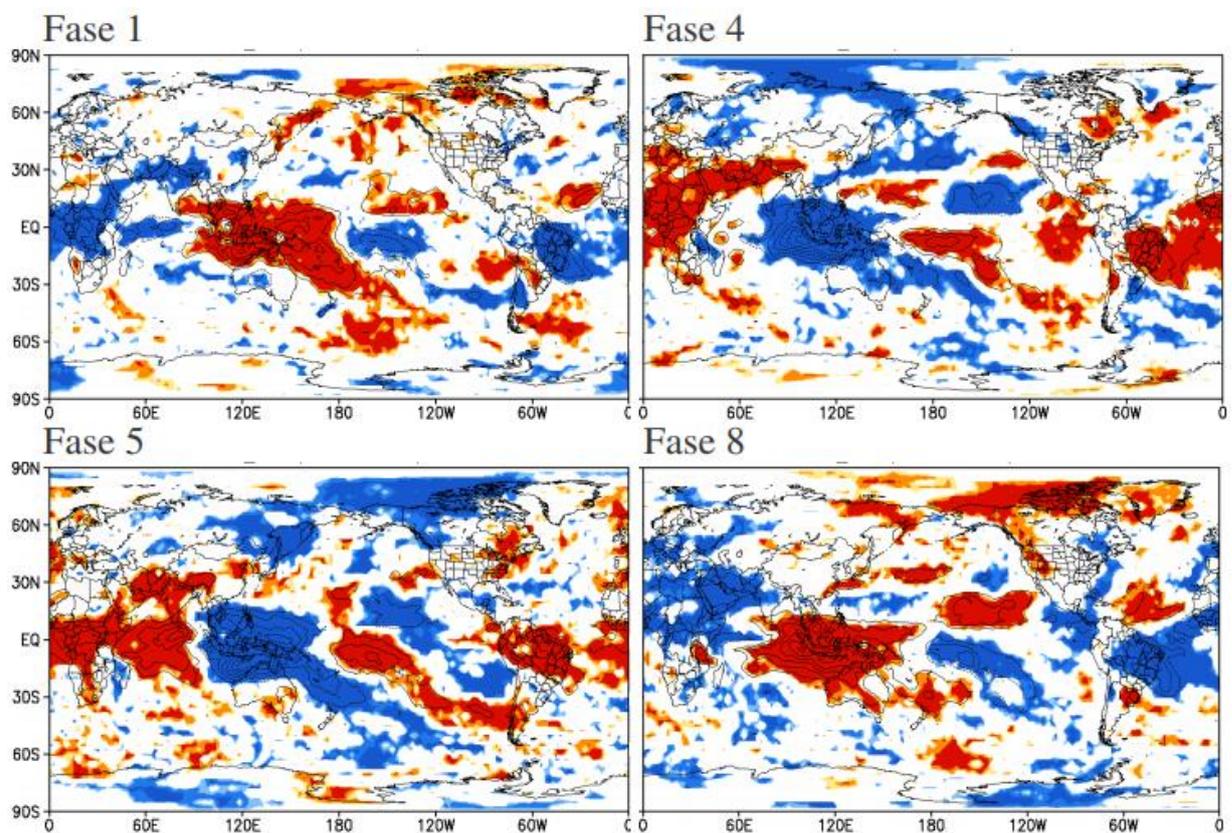
A partir disso, muitos estudos sugerem que há a ligação entre fenômenos oceânicos e atmosféricos pouco conhecidos com eventos climáticos extremos, os quais têm maior impacto na sociedade em geral. Assim, entender a escala espacial e temporal desses fenômenos, os processos físicos envolvidos e a interação mútua entre eles são vitais nos dias de hoje.

Entre os fenômenos tidos como intrasazonais, com período de duração menor do que o período de uma estação do ano, a Oscilação Madden Julian (OMJ) mostra-se como um fenômeno que possui importante impacto no clima (Madden & Julian, 1972). A OMJ consiste em um modo de variabilidade climática de escala planetária que influencia os campos de convecção e precipitação. O fenômeno origina-se sobre o Oceano Índico Tropical e se propaga lentamente para leste (cerca de 5-6 m/s) ao longo da região de temperaturas quentes do Indo-Pacífico (Madden and Julian, 1972). Após calcularem espectros e espectros cruzados das observações disponíveis, os pesquisadores Rolland A. Madden e Paul R. Julian perceberam a grande coerência entre a pressão de superfície, vento zonal e temperatura em vários níveis da atmosfera em um período de 41 a 53 dias (Madden & Julian, 1971). Estudos recentes têm mostrado que a OMJ influencia a variabilidade climática em várias partes do planeta inclusive a região da América do Sul (Valadão et al., 2015, Alvarez et al., 2016).

Com o passar dos anos e o melhoramento do entendimento deste fenômeno, Wheeler e Hendon (2004) propuseram uma metodologia que evidencia o sinal da propagação da OMJ ao longo do globo. Este sinal é baseado nos campos de

anomalias de Radiação de Ondas Longas (ROL) indicando o aumento da atividade convectiva em uma determinada região e/ou aumento da supressão de atividade convectiva. Na figura 1 é possível identificar a propagação da OMJ e fica evidente a forma com que períodos de maior atividade convectiva são intercalados com períodos de menor atividade, tanto nas regiões tropicais quanto nas regiões extratropicais como, por exemplo, a região sul do Brasil (Grimm, 2012).

Figura 1- Anomalias de ROL da seqüência de fases da OMJ (fases 2, 3, 6 e 7 não mostradas). A cor vermelha (azul) indica anomalias positivas (negativas) com nível de confiança melhor que 95%.

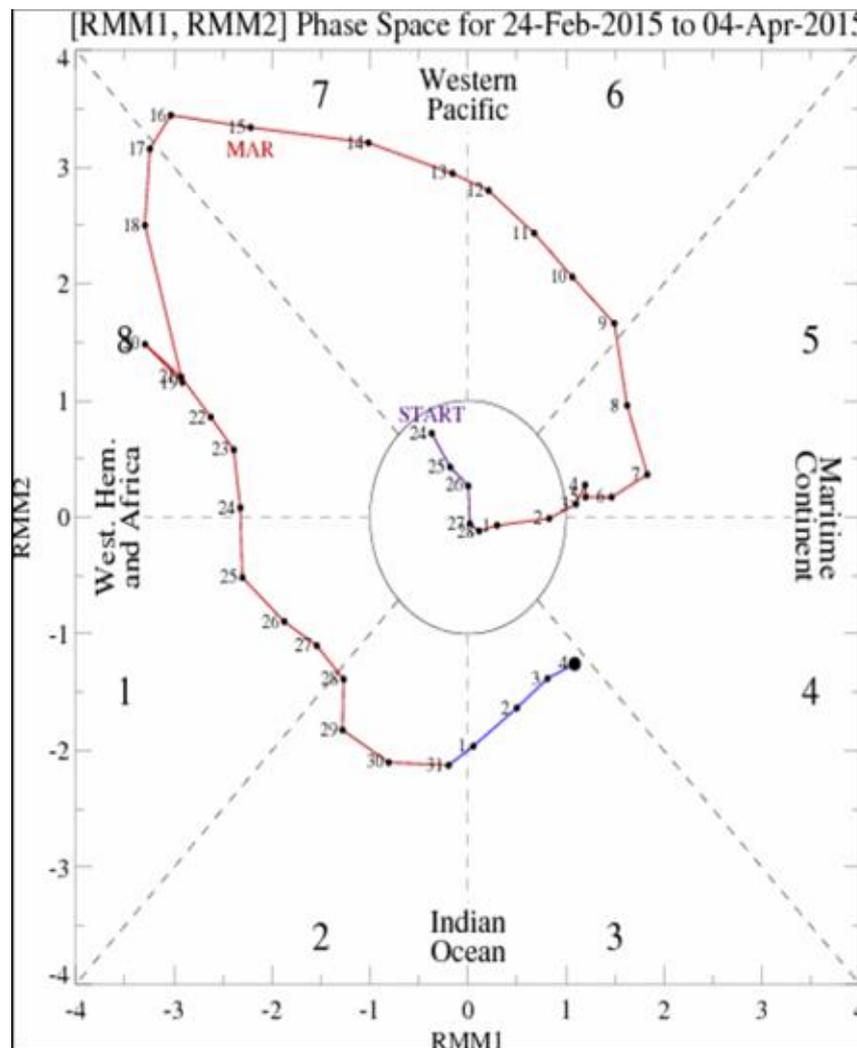


Adaptada de Grimm (2012).

Além disso, em uma escala de tempo intrasazonal, a propagação para leste da oscilação é acompanhada por um sinal significativo no campo de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), sugerindo que esta oscilação não é um modo unicamente atmosférico e que a mesma depende de uma interação oceano-atmosfera para auto sustentar-se (BARBOSA, 2012).

No ano de 2015 um forte episódio da OMJ atuou na região tropical e se propagou por todo o globo. Este fenômeno teve início na região do sudeste asiático, próximo à Indonésia, região conhecida como *Maritime Continent* por volta do dia 07 de março daquele ano e se propagou por toda a região tropical ao longo de aproximadamente um mês (Figura 02).

Figura 2 - Índice de desenvolvimento independente para o caso da OMJ de março/abril de 2015, criado por Wheeler e Hendon (2004). Fonte: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov> (2018).



Na Figura 2 podemos ver o índice de desenvolvimento independente criado por Wheeler e Hendon (2004) para o evento em específico. O índice é estimado baseado nas componentes principais da Função Ortogonal Empírica da média dos campos de vento zonal a 850 hPa e 200 hPa e Radiação de Onda Longa (ROL) a partir de dados de satélite. Os pontos representam os dias do mês e conforme

maior a distância do centro da imagem a intensidade do fenômeno é mais pronunciada, tendo ocorrido um máximo por volta do dia 16 de março de 2015. Os números de 1 a 8 representam as fases da oscilação e suas respectivas regiões de atuação. Estes dados mostram que após sua intensificação a oscilação se propaga pelo Oceano Pacífico entre os dias 09 e 16 de Março. Posteriormente, entre os dias 17 e 28 de março, ela propaga-se pela região do Hemisfério Oeste sobre a região da América do Sul, do Oceano Atlântico e da África. Finalmente, entre os dias 29 de março e 04 de abril, a oscilação retorna pela região do Oceano Índico, quando começa a diminuir de intensidade.

Estudos observacionais e de modelagem numérica sugerem uma forte interação entre o mar e o ar durante a formação e propagação da OMJ. Flutuações coerentes dos campos de TSM, fluxos de calor e de radiação na superfície do mar apresentam-se como resultados das passagens de eventos convectivos, como por exemplo, a OMJ (WOOLNOUGH et al., 2000; KEMBALL-COOK & WEARE, 2001). Vários esforços têm sido empreendidos na tentativa de prever numericamente a formação e propagação dessa perturbação. No entanto, os resultados de modelagem da OMJ ainda não conseguem representar suas características de evolução e propagação corretamente. Embora alguns modelos consigam reproduzir a propagação da OMJ estes não conseguem reproduzir a correta velocidade de propagação, as distribuições espaciais e o correto acoplamento entre a dinâmica e a convecção (Ching et al., 2015).

Testes recentes de modelagem numérica apresentaram relativo sucesso na representação da OMJ através de ajustes da parametrização de cumulus (Bechtold et al., 2008). Portanto, novos estudos numéricos com opções mais recentes de parametrização cumulus seriam de grande importância para avaliar a capacidade de previsão da propagação da OMJ (DAEHYUN et al., 2014).

O modelo global Ocean-Land-Atmosphere Model (OLAM), desenvolvido na Duke University (WALKO & AVISSAR, 2006) que utiliza modernos recursos em sua formulação matemática tem a capacidade de representar os fenômenos em escalas globais e regionais simultaneamente. Além disso, este modelo apresenta um

aperfeiçoamento em relação aos processos dinâmicos, configurações de grade, estrutura de memória e técnicas de soluções numéricas das equações prognósticas (RAMOS DA SILVA et al., 2009).

Este estudo tem como objetivo não só avaliar a capacidade do modelo OLAM em representar a escala espaço-temporal da OMJ, mas também, avaliar como a variabilidade da TSM e novas opções de parametrização cumulus influenciam nos resultados das simulações. Estas avaliações são feitas baseando-se em dados observacionais dos campos de vento e precipitação aplicados ao evento desta oscilação ocorrido no ano de 2015.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade do modelo OLAM na previsibilidade de um evento da OMJ ocorrida entre meados de março e abril de 2015.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente estudo irá:

- Analisar os efeitos da propagação da OMJ sobre a região tropical do globo.
- Avaliar a capacidade do modelo OLAM na simulação do caso a ser estudado.
- Avaliar o impacto da TSM atualizada na simulação do modelo OLAM.
- Avaliar as possíveis melhorias da parametrização cumulus na simulação com o modelo OLAM e na previsibilidade da OMJ.

3. METODOLOGIA

A seguir são apresentadas a descrição do modelo OLAM, a descrição dos experimentos numéricos a serem conduzidos e os dados meteorológicos e oceanográficos usados na avaliação do desempenho do modelo com relação a o caso estudado.

3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

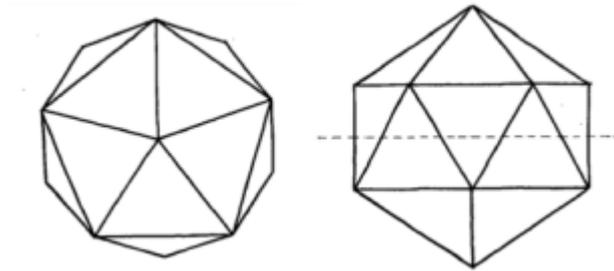
3.1.1 Estrutura de Grade

O uso de grades basicamente uniformes que dividem a esfera terrestre em elementos que sejam iguais em forma e superfície é importante para a integração das equações que regem os movimentos atmosféricos no globo (SADOURNY; ARAKAWA; MINTZ, 1968).

Em modelagem numérica da atmosfera e do sistema climático, durante a integração do modelo, os processos físicos e/ou químicos cuja escala de tempo e comprimento são menores do que aquelas representadas pela resolução do modelo devem ser simuladas através de funções de outros parâmetros representados pelo modelo, especialmente quando seus efeitos médios na área e no tempo não são desprezíveis. Esse procedimento é chamado de parametrização física. Os processos físicos mais frequentemente parametrizados são os processos turbulentos do fluido, a transferência radiativa, a interação solo-vegetação, a microfísica de nuvens, a estrutura da camada limite planetária (região da baixa troposfera, bem próxima à superfície com altura típica de 1 km em que a duração dos fenômenos é cerca de 1 hora ou menos) e a convecção associada às nuvens cumulus (SAMPAIO, G.; SILVA DIAS, P. L., 2014).

Neste caso, o modelo OLAM utiliza-se de grades do tipo não estruturada, a qual permite um refinamento mais ajustável em que as células possuem um formato triangular ou hexagonal na direção horizontal. Esse tipo de grade é mais conveniente para a representação da atmosfera terrestre, pois permite um preenchimento total da esfera. Primeiramente essa triangulação ocorre através da divisão da esfera terrestre em triângulos equiláteros em um icosaedro (RAMOS DA SILVA et al., 2009).

Figura 3- Icosaedro

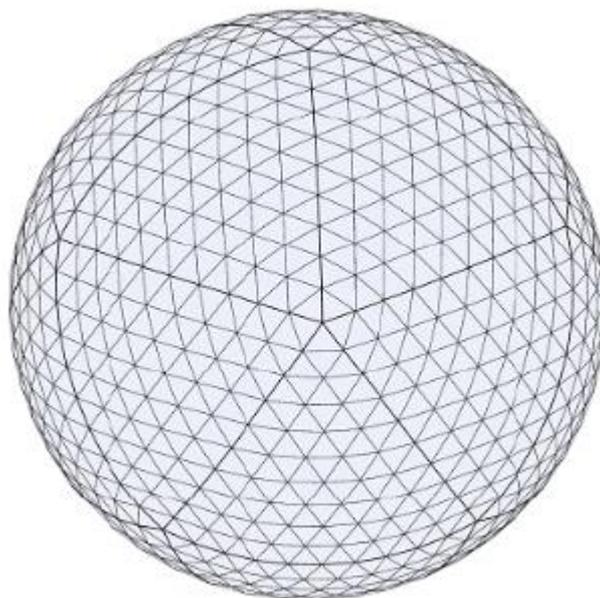


Adaptado de (SADOURNY; ARAKAWA; MINTZ, 1968).

A um cada dos triângulos do icosaedro pode ser subdividido em n triângulos menores, onde n pode ser qualquer número inteiro maior que um, permitindo assim construir uma malha de maior resolução para qualquer grau desejado. Esse tipo de grade geodésica possui vantagens em relação às grades de latitude-longitude que são as mais usadas comumente.

Esta subdivisão acrescenta à figura $30 \times (n^2 - 1)$ novas arestas para o original de 30 e $10 \times (n^2 - 1)$ novos vértices para os originais 12, com 6 arestas que se unem em cada novo vértice (D'ALESIO, 2015).

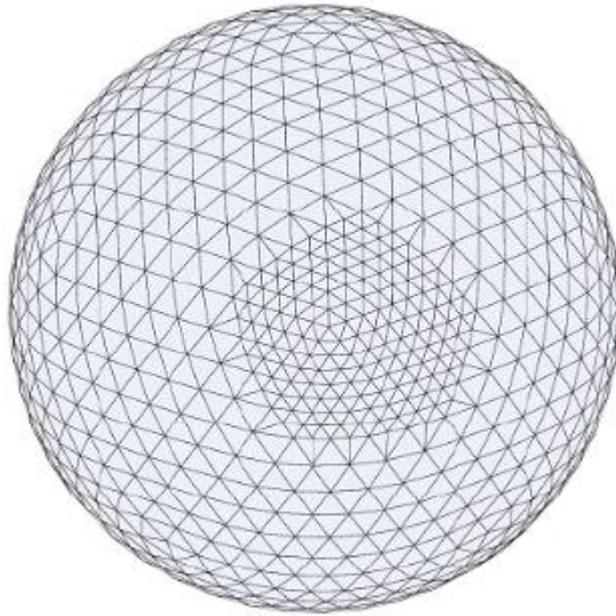
Figura 4- Grade icosaédrica usada no modelo OLAM.



Adaptada de Walko e Avissar (2008).

Além disso, o modelo OLAM permite o aumento da resolução espacial para uma determinada região de interesse, mantendo outras regiões com espaçamento maior, podendo assim representar uma simulação no nível global e regional simultaneamente. Este método mantém na mesma localidade as faces do triângulo original da grade de menor resolução. Nas regiões internas, cada grade triangular equilátero é dividida em quatro novos triângulos conforme a Figura 4.

Figura 5- Ilustração do refinamento das grades horizontais.



Adaptada de Walko e Avissar, (2008).

Com as faces dos triângulos originais mantidas esse método faz com que não ocorra a sobreposição de grades de diferentes tamanhos de resolução, assim não há a necessidade de algoritmos especiais de aninhamento para corrigi-las, evita ruídos numéricos e mantém a conservação de energia, permitindo assim, um aumento ilimitado da resolução espacial e, inclusive, a possibilidade de um refinamento de grade em regiões distintas do globo ao mesmo tempo (RAMOS DA SILVA et al., 2009).

O modelo OLAM representa a topografia por um método que assume grades superficiais fracionadas de seu volume original (Adcroft et al., 1997; Marshall et al., 1997). Este método mantém as superfícies de grade na horizontal, evitando os problemas existentes em outros métodos menos eficientes, em que as grades se ajustam ao terreno e necessitam de projeções especiais de termos verticais e horizontais (Messinger et al., 1988).

Deste modo esse método promove importante melhoria na representação de processos atmosféricos nas regiões de topografia íngreme, como no caso da cadeia de montanhas dos Andes, onde geralmente ocorrem problemas de instabilidade numérica, ou seja, os erros resultantes da representação dos números e os erros cometidos nas operações envolvidas não afetam muito o resultado final.

3.1.2 Equações Dinâmicas Governantes

Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) possuem a função de reproduzir aproximações numéricas de equações matemáticas representadas pelas leis físicas que regem os movimentos da atmosfera e oceanos além de suas interações com outros componentes do sistema climático.

O modelo OLAM considera as leis de conservação de massa, conservação do momento e conservação da energia, equação de estado e conservação de outras variáveis escalares através do método de volumes finitos (WALKO; AVISSAR, 2008b). A seguir são apresentadas algumas dessas equações:

a) conservação de massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{V}$$

Equação 1

b) conservação do momento para a componente x

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (v_i \vec{V}) - (\nabla p)_i - (2\rho \vec{\Omega} \times \vec{v})_i + \rho g_i + F_i$$

Equação 2

c) conservação da energia

$$\frac{\partial(\rho \Theta)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\Theta \vec{V}) + H$$

Equação 3

Nestas equações ρ representa a densidade do ar, t a variável de tempo, V o vetor momento, v o vetor velocidade, o sub índice i representa a componente do vetor na direção x_i , p a pressão, Ω a velocidade angular da terra, g a força gravitacional, e F_i o tensor das forças de atrito.

3.1.3 Discretização Numérica

O OLAM resolve as equações de Navier-Stokes através do método de volumes finitos, assim a discretização espacial se dá através da integração sobre volumes de controle (ψ) contornados por superfícies de área (σ), conforme descrito em Adcroft et al. (1997) e Wenneker et al. (2002).

Para a integração temporal, o modelo usa um passo de tempo longo para o cálculo da maioria dos termos prognósticos, e usa um passo de tempo menor para os termos acústicos como, por exemplo, para a força de gradiente de pressão. O esquema numérico de Adams-Bashforth de segunda ordem é usado na estimativa da maioria dos termos advectivos (MARSHALL et al., 1997).

3.1.4 Parametrizações Físicas

Como o estado da atmosfera em um dado instante é resultado de complexas interações entre as diversas componentes do sistema físico climático, os MCGAs devem considerar todas as componentes, ou seja, as interações mútuas da atmosfera com a hidrosfera, a biosfera, e a criosfera.

Para simular o comportamento da atmosfera muitos processos físicos são representados através de parametrizações. Tais processos devem ser parametrizados, pois a escala espacial em que ocorrem é, muitas vezes, bem menor

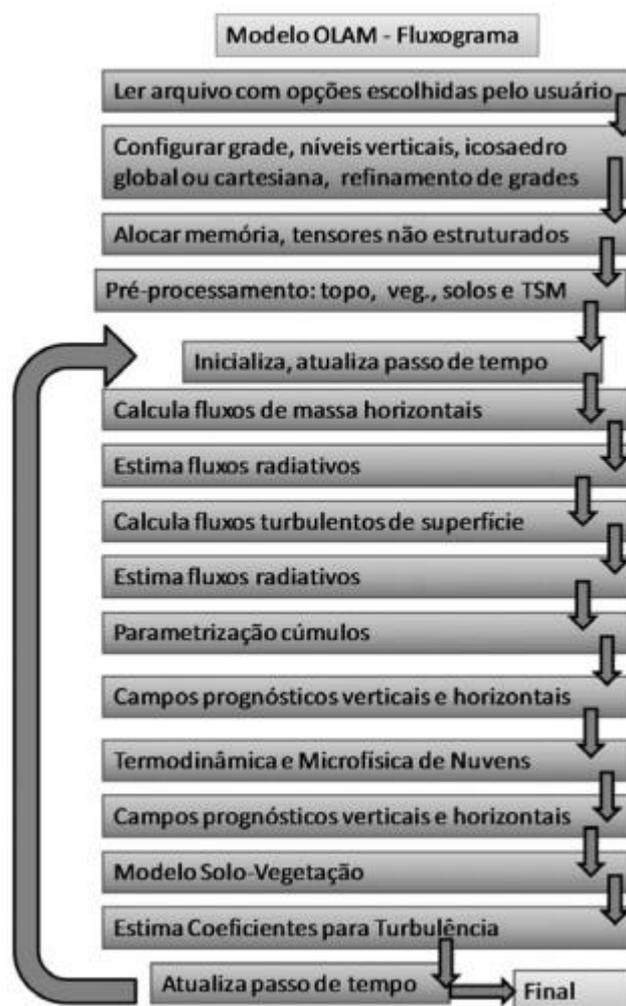
que a escala de representação do modelo. Como exemplos têm: radiação de onda longa e onda curta, parametrização cumulus, microfísica de nuvens, fluxos turbulentos, e modelos de solo-vegetação onde ocorrem trocas de energia e massa na superfície.

As parametrizações físicas adotadas no OLAM são em sua grande maioria advindas do modelo de mesoescala RAMS (Pielke et al., 1992, Cotton et al., 2003). O modelo considera parametrizações físicas para difusão turbulenta, transferências de radiação de onda curta e onda longa, formação de nuvens e precipitação em suas várias formas líquidas e sólidas (Meyers et al., 1997; Walko et al., 1995), processos convectivos associados a nuvens cumulus (Tremback, 1990), e as trocas de calor sensível e latente entre a superfície e a atmosfera, incluindo várias camadas de solo, e um modelo para o dossel da vegetação (Avisar e Pielke, 1989; Walko et al., 2000).

Para a formação de nuvens a parametrização de cumulus possíveis são as de Kuo (KUO, 1974), Grell (GRELL, 1993), Kain-Fritsch (KAIN; FRITSCH, 1993), Emanuel (EMANUEL, 1991) e mais recentemente Grell-Freitas (GRELL & FREITAS, 2014). Para a microfísica de nuvens em suas formas líquidas e sólidas a parametrização de Walko permite a possibilidade de configuração de gotas de nuvens, chuva, granizo, neve, agregados, e cristais de gelo (WALKO et al., 1995).

A Figura 06 ilustra o fluxograma de uma integração numérica do modelo OLAM. Nota-se que após os procedimentos de pré-processamento são feitas várias chamadas para sub-modelos que perfazem os cálculos. Após as etapas de integração ocorre a fase de pós-processamento dos resultados.

Figura 6 - Ilustração das etapas conduzidas durante uma integração numérica do modelo OLAM.



Adaptada de Ramos da Silva et al., (2009).

3.2 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

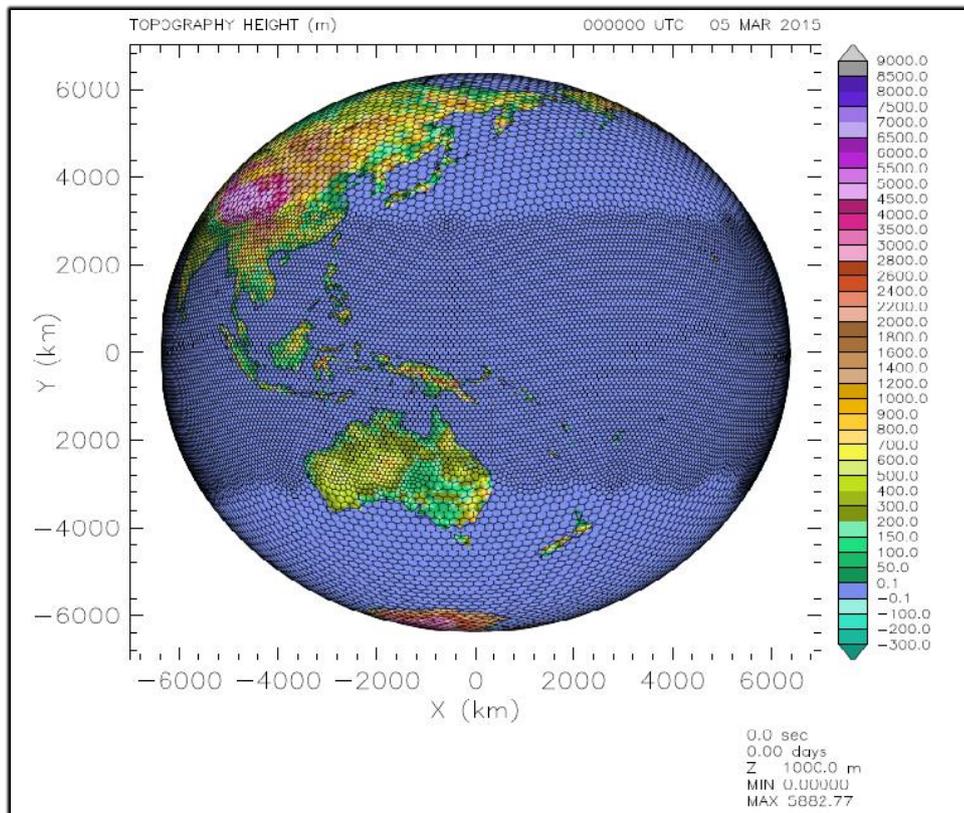
Com o intuito de avaliar o desempenho do modelo, foram realizadas três simulações de 31 dias para o evento da OMJ ocorrida entre os meses de Março e Abril do ano de 2015. A primeira simulação foi feita utilizando a média mensal climatológica da TSM e a parametrização cumulus do tipo Kain-Fritsch (KAIN, 2004); a segunda utilizando campos de TSM atualizados semanalmente e parametrização cumulus do tipo Kain-Fritsch; e por fim com a TSM atualizada semanalmente com parametrização cumulus do tipo Grell-Freitas (GRELL & FREITAS, 2014). A

configuração das opções adotadas nas três simulações está apresentada na Tabela 1. A grade espacial foi configurada a nível global com espaçamento de 200 km e com refinamento para a região tropical com espaçamento de 100 km, conforme mostrado na Figura 7. Esta região de refinamento foi escolhida devido ao fato de ser a região por onde se propaga a OMJ. O período total de integração foi de 31 dias, iniciando no dia 5 de Março a 00 UTC até o dia 4 de Abril de 2015 a 00 UTC.

Tabela 1 Configurações das simulações com o modelo OLAM.

Simulação	TSM	Parametrização cumulus
1 ^a	Climatológica	Kain-Fritsch
2 ^a	Atualizada	Kain-Fritsch
3 ^a	Atualizada	Grell-Freitas

Figura 7- Altura do relevo e refinamento espacial das grades sobre o globo com espaçamento de 200 km e 100 km para o cinturão tropical.



3.3 DADOS UTILIZADOS

Dados de reanálises do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) foram usados como condição inicial da atmosfera (KANAMITSU et al., 2002). Estes dados incluem temperatura do ar, componentes de vento, umidade do ar, pressão atmosférica e altura geopotencial. Estes dados foram usados apenas como condição inicial e como o modelo é global, não foi necessário aplicar condições de fronteira laterais. Além disto, tem-se como objetivo avaliar a capacidade do modelo de prever a evolução da OMJ estudada.

Dados da TSM obtidos da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) foram usados como condição de superfície dos oceanos (REYNOLDS et al., 2002). Dois tipos de dados foram usados: no primeiro foi usada uma média

climatológica mensal do período 1971 a 2000 e posteriormente dados de média semanais que foram corrigidos durante a integração do modelo.

Os resultados do modelo foram comparados com dados de precipitação do mesmo período obtidos a partir das estimativas do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) e dados do satélite *Global Precipitation Measurement* (GPM). O Satélite TRMM contém cinco instrumentos básicos. O *radar de precipitação*, primeiro instrumento espacial concebido para fornecer mapas tridimensionais da estrutura de uma tempestade. O *imageador de micro-ondas*, um sensor de micro-ondas passivo projetado para fornecer informações quantitativas de precipitação sobre uma ampla área sob o satélite. O imageador de micro-ondas quantifica o vapor de água, a água de nuvens e a intensidade da precipitação na atmosfera. O *scanner de radiação visível e infravermelha* que também fornece indicação da chuva, e se conecta as observações recolhidos pelo TRMM com aqueles coletados pelo *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES) e outras missões. O *sistema de nuvens e energia radiante da Terra* monitora a energia trocada entre o sol; a atmosfera terrestre, a superfície e nuvens, e o espaço. Finalmente, o *sensor de imageamento de raios*, um instrumento altamente sofisticado capaz de detectar e localizar um relâmpago na região tropical do globo (Passow, 2010).

O satélite GPM faz parte de uma rede internacional composta pela *National Aeronautics and Space Administration* – NASA e a Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA) com o objetivo de unificar as medições de precipitação feitas por esta rede de satélites internacionais pelo mundo. Os dados coletados do satélite GPM Core servem como um padrão de referência que unifica as medições de precipitação de satélites de pesquisa e operacionais. O satélite GPM Core mede chuva e neve usando dois instrumentos científicos: o Imageador de Micro-ondas GPM (IMG) e o Radar de Precipitação de Dupla frequência (RPD). O IMG captura intensidades de precipitação e padrões horizontais, enquanto o RPD fornece melhor compreensão sobre a estrutura tridimensional de partículas precipitantes. Juntos, esses instrumentos fornecem um banco de dados de medições contra as quais as observações de micro-ondas de outros satélites parceiros podem ser

significativamente comparadas e combinadas para formar um conjunto de dados de precipitação global.

Três regiões de interesse foram definidas para avaliar a precipitação acumulada separadamente. Estas regiões compreendem a região do cinturão tropical adotada entre os paralelos 30 N e 30 S do globo todo; a região entre os paralelos 5 N e 15 S e meridianos 30 W e 15 W, como a região que engloba o nordeste do Brasil (NEB); e a região entre os paralelos 21 S e 30 S e meridianos 48 W e 58 W como a região Sul do Brasil.

Para fazer a comparação entre os mapas de ventos feitos pelo modelo e o observado foram feitos mapas de campos de ventos utilizando sua componente zonal para toda a região do cinturão tropical do globo dos dados de reanálises do NCEP.

O software livre *Grid Analysis and Display System* GrADS versão 2.2.0, ferramenta computacional interativa para a análise e exibição de dados, foi usado para a geração de tais gráficos e análises estatísticas. Análise da propagação da OMJ foi avaliada através de diagramas *Hovmöller* da componente do vento. Análise da previsão da precipitação foi avaliada para várias regiões incluindo a região tropical, e as regiões Nordeste e Sul do Brasil através de comparações com as observações e com análise estatística de erros.

4. RESULTADOS

A seguir são apresentados resultados das três simulações feitas com o modelo OLAM e suas comparações com dados observacionais para as variáveis de precipitação acumulada e ventos.

Para avaliar o desempenho do modelo OLAM e compreender melhor a propagação da OMJ, separou-se o período total de simulação que corresponde a 31 dias, em seis pênadas. Além disso, foi feita uma análise a parte, separando

determinadas regiões de interesse a serem analisadas separadamente, como o caso da NEB e sul do Brasil. Para cada um desses períodos foi feito:

- Análise dos resultados de precipitação média acumulada gerada pelo modelo OLAM e pelo satélite TRMM;
- Comparação entre o valor do cálculo de precipitação média acumulada para a região tropical, região Nordeste e região Sul do Brasil gerado pelo modelo com dados do satélite TRMM e do satélite GPM-NASA;
- Mapa da anomalia de precipitação considerando a média total do período analisado para as três simulações e para os valores observados;
- Mapa de anomalia de vento zonal a 850hPa considerando o período analisado para as três simulações e para valores de reanálise do NCEP.

Posteriormente foi analisado o período completo e para este foi feito:

- Mapa com a precipitação acumulado para o período completo e o observado pelo satélite TRMM para o mesmo período.
- Análise da série temporal das três simulações feitas pelo o modelo com as observações feitas pelo satélite TRMM e pelo satélite GPM-NASA.
- Viés do modelo, que leva em consideração o valor simulado menos o observado pelos dois satélites TRMM e GPM nas três simulações e para as três principais regiões analisadas separadamente.
- Diagrama *Hovmöller* no nível de 250hPa.

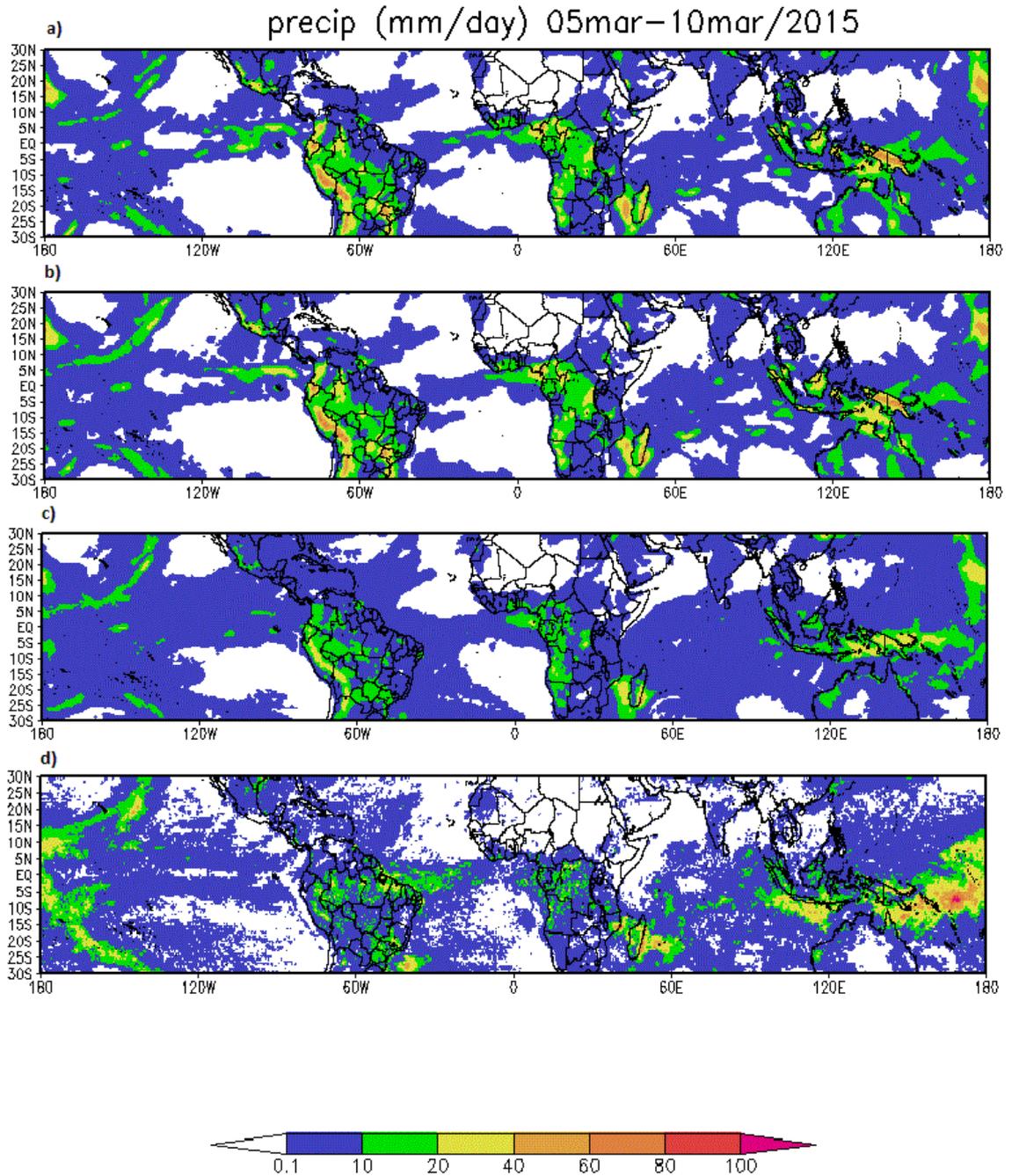
4.1 PERÍODO DE 5-10 DE MARÇO DE 2015

4.1.1 Análise da precipitação acumulada

Na figura 8 podemos observar o mapa de precipitação acumulada para a primeira pênstada, sendo que a Figura 8a mostra a simulação feita pelo modelo OLAM levando em conta a TSM climatológica para o período e a parametrização cumulus do tipo Kain-Fritsch; já na Figura 8b temos a TSM atualizada semanalmente

e também a parametrização Kain-Fritsch; na Figura 8c a TSM atualizada semanalmente e a parametrização do tipo Grell-Freitas, por último a Figura 8d a anomalia de chuva registrada pelo satélite TRMM para este período. No início da simulação a OMJ se encontrava entre as fases 5 e 6, fases em que a maior atividade convectiva se encontra sobre a região conhecida como *Maritime Continent*, ou seja, a região entre o leste do Oceano Índico, norte da Austrália e oeste do Oceano Pacífico. Os resultados mostram que o modelo consegue simular estes principais centros convectivos deste período, inclusive os máximos que ocorrem nas regiões continentais.

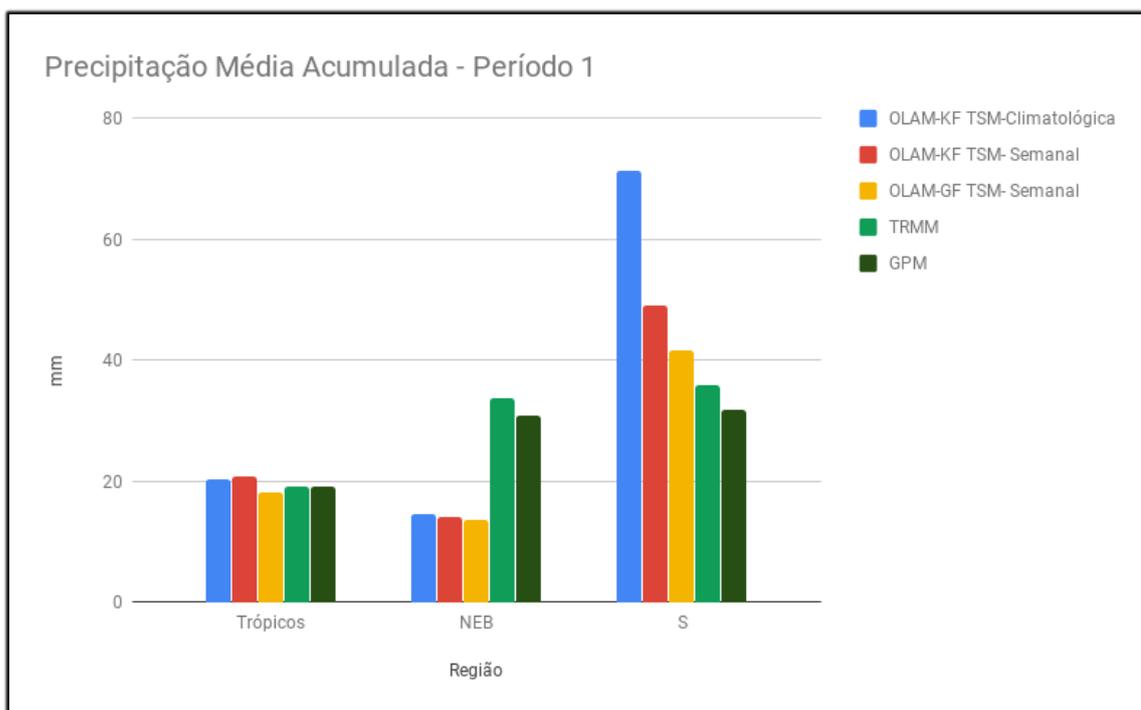
Figura 8 - Precipitação média acumulada para Período1; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.



A Figura 9 apresenta, separadamente, a precipitação média acumulada de chuva no mesmo período, considerando as três regiões compreendidas como o cinturão tropical o NEB e o sul do Brasil. Nota-se que para a região dos trópicos o modelo conseguiu representar bem a precipitação acumulada nas três simulações,

porém para a região NEB o modelo subestimou a precipitação, já na região Sul o modelo superestima a precipitação havendo uma melhora na simulação com a TSM corrigida semanalmente e com uso da parametrização cumulus do tipo Grell-Freitas.

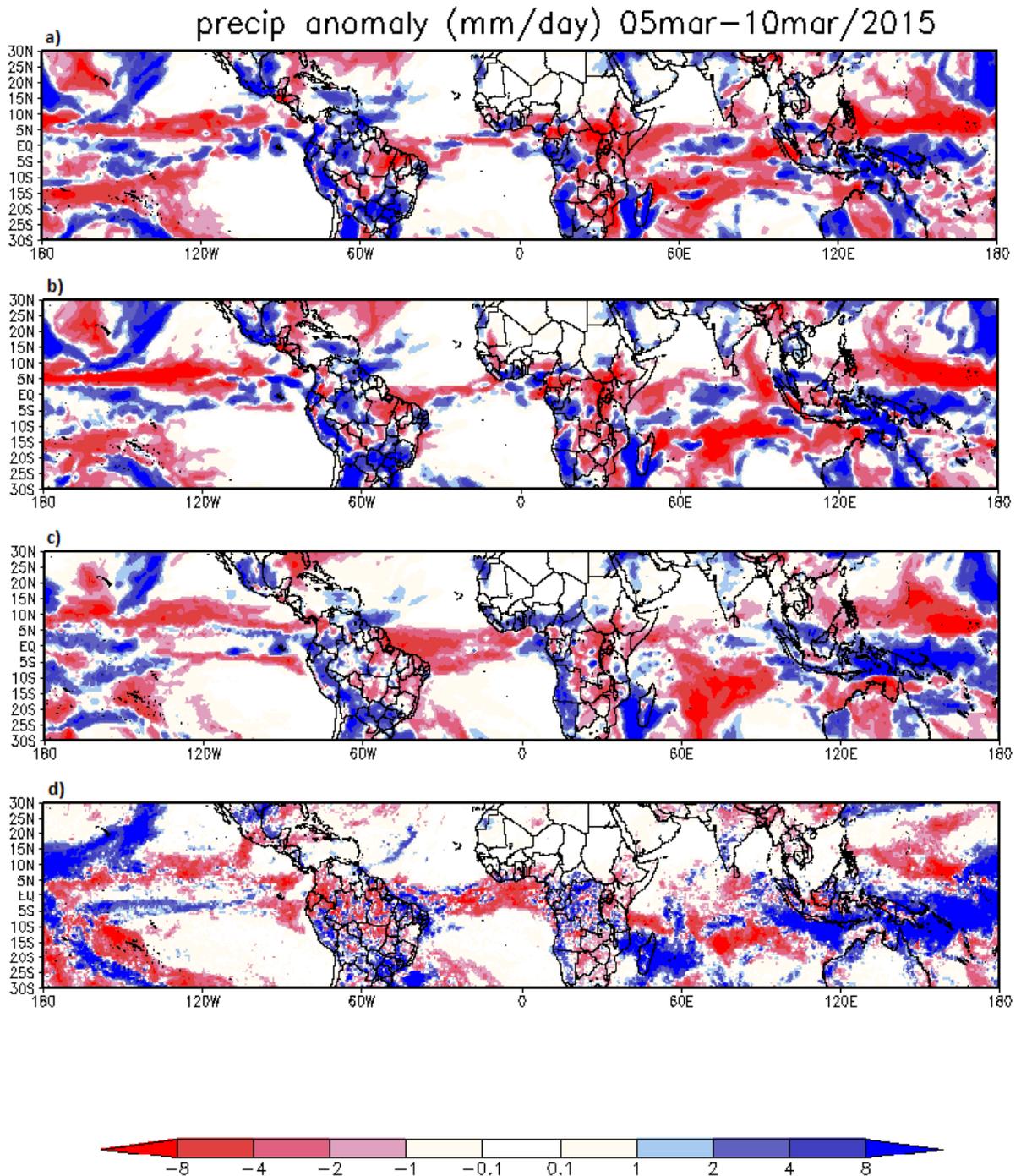
Figura 9 – Precipitação média acumulada para os dias 5– 10 março de 2015 simuladas pelo modelo e pelos satélites TRMM E GPM; barras a esquerda região do cinturão tropical, barras centrais região NEB e barras a direita região sul do Brasil.



4.1.2 Análise da anomalia de precipitação

Na Figura 10 podemos ver que o modelo consegue representar os principais eventos convectivos sobre a América do Sul (AS), continente africano e sobre a região do Indo-Pacífico. No entanto, os valores aparecem mais grosseiros nas duas primeiras simulações Figura 10a e 10b, principalmente sobre os continentes AS e África. Na terceira simulação com a TSM atualizada semanalmente e a parametrização do tipo Grell-Freitas o sinal de anomalia sobre os continentes se aproxima do observado pelo satélite. No entanto, na região do Oceano Índico, o campo de precipitação aparece subestimado pelo modelo (Figura 10c).

Figura 10– Anomalia de Precipitação Acumulada para o Período 1; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.

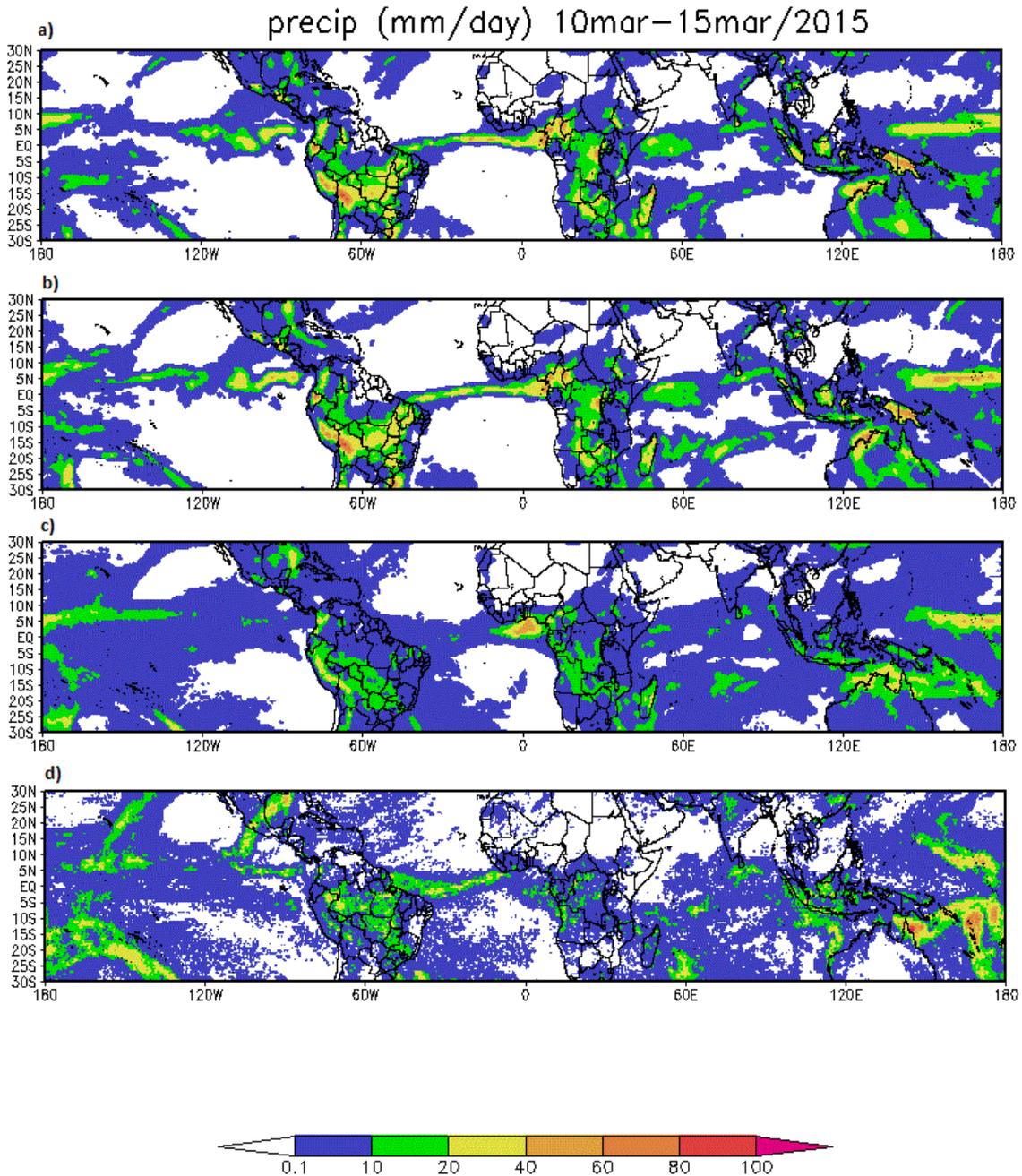


4.2 PERÍODO DE 10-15 DE MARÇO DE 2015

4.2.1 Análise da precipitação acumulada

A Figura 11 representa a precipitação média acumulada para o segundo período (i.e. 10-15 de março). Neste período a OMJ se encontra entre as fases 6 e 7, com os maiores acúmulos de chuva ocorrendo na região oeste e central do Oceano Pacífico. Os resultados para estas regiões mostram que a melhor representação espacial da Zona de Convergência Intertropical ocorre através da parametrização de Grell-Freitas (Figura 11c), pois as simulações com as parametrizações de Kain-Fritsch não representam bem as regiões de menor precipitação (Figuras 11a e 11b).

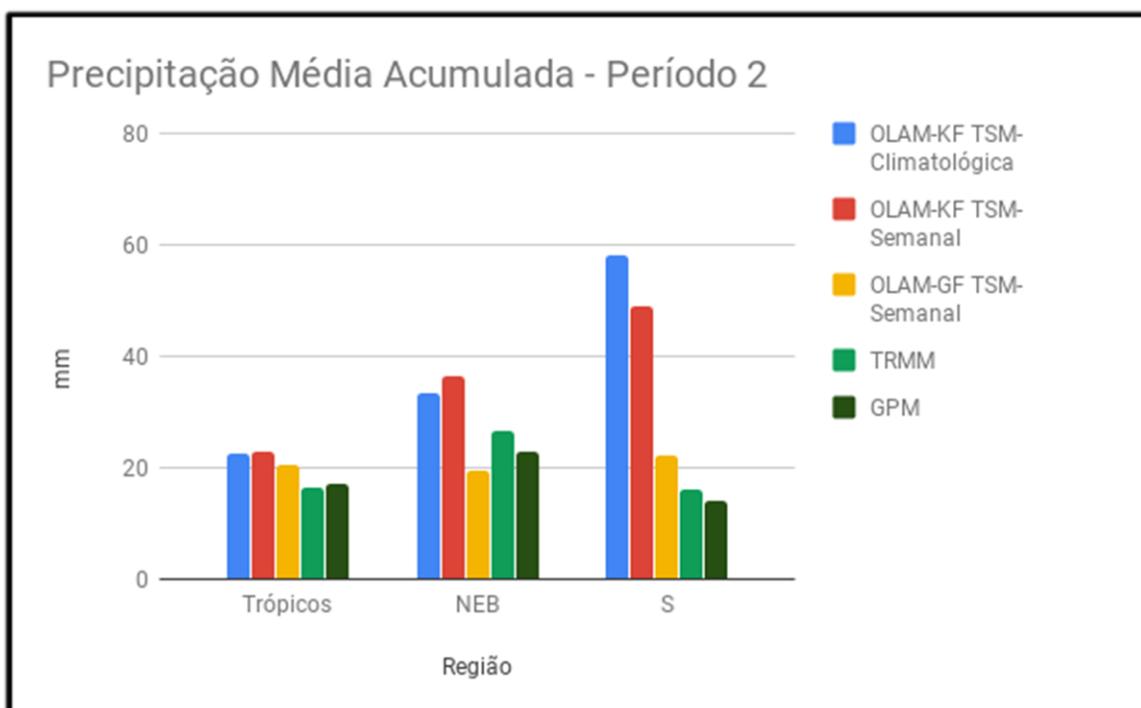
Figura 11- Precipitação média acumulada para Período2; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.



O gráfico da Figura 12 mostra a precipitação média acumulada para o segundo período. Os resultados mostram certa concordância entre os valores observados e os valores das três simulações para a região tropical que correspondem a uma precipitação média acumulada de 20 mm. Resultados da precipitação acumulada para as regiões do NEB e do Sul mostram os valores da

simulação com a TSM atualizada semanalmente e a parametrização do tipo Grell-Freitas apresentam resultados mais próximos ao observado, sendo que para a região sul os valores das duas primeiras simulações ultrapassam o dobro do observado.

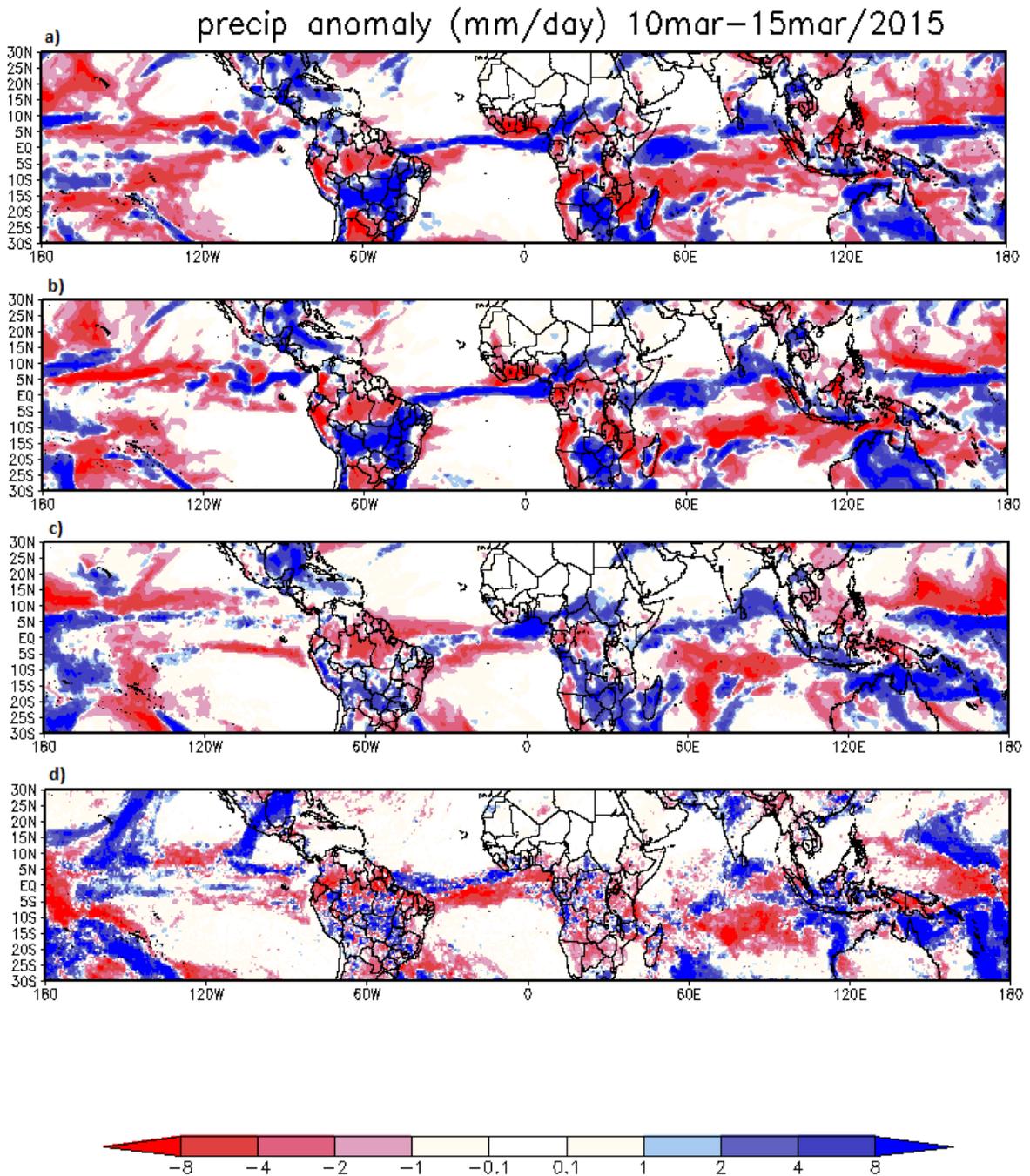
Figura 12– Precipitação média acumulada para a os dias 10 – 15 março de 2015 simuladas pelo modelo e pelos satélites TRMM E GPM; barras a esquerda região do cinturão tropical, barras centrais região NEB e barras a direita região sul do Brasil.



4.2.2 Análise da anomalia de precipitação

Na figura 13 é possível observar que nas duas primeiras simulações o modelo superestima a precipitação sobre a região da AS, região sul do continente africano e sobre a Austrália (Figura 13a e 13b), já na terceira simulação os valores são mais próximos ao observado principalmente sobre a AS e a Austrália. Por outro lado, a terceira simulação apresenta uma boa representação das anomalias observadas na região da AS (Figura 13c).

Figura 13- Anomalia Precipitação Acumulada para o Período2; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.

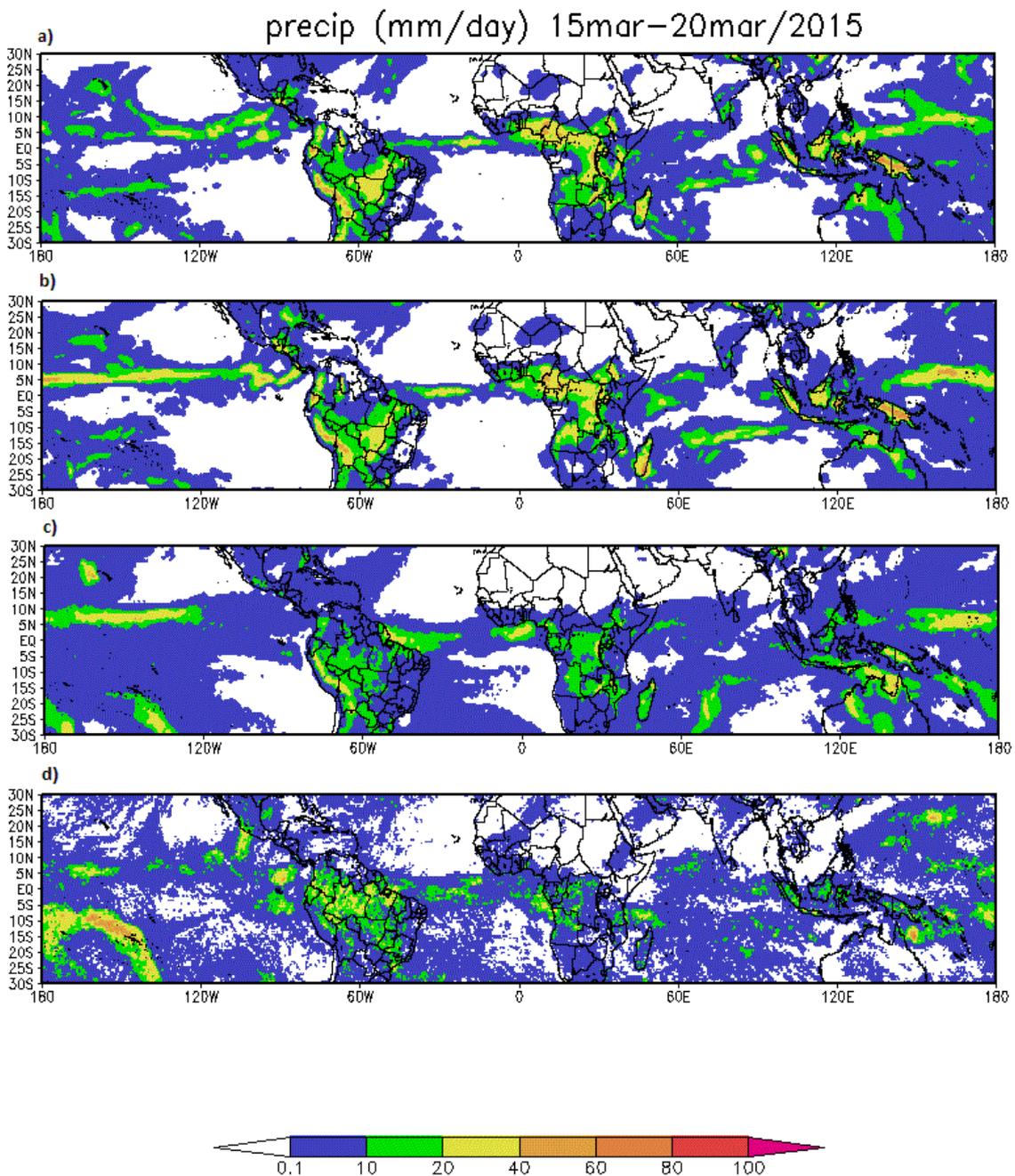


4.3 PERÍODO DE 15-20 DE MARÇO DE 2015

4.3.1 Análise da precipitação acumulada

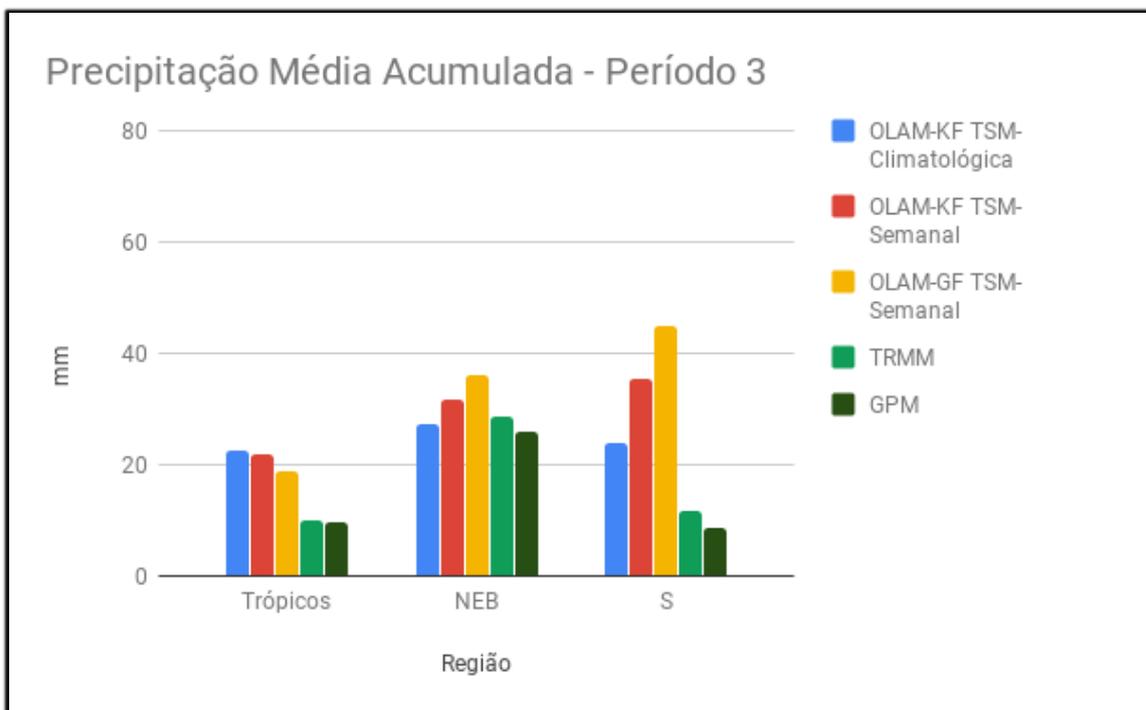
No terceiro período (i.e. 15 a 20 de março) a maior atividade convectiva da OMJ ainda se encontra na região mais central do Oceano Pacífico. Sua localização nesta região promove uma tendência de aumento na precipitação sobre a região norte da AS, incluindo o NEB que apresenta precipitações médias acumuladas superiores a 20 mm, caracterizando as fases 7 e 8 da oscilação.

Figura 14– Precipitação média acumulada para Período3; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.



A Figura 15 mostra que, apesar do modelo ter apresentado valores próximos ao observado para a região do NEB, houve uma diminuição de precipitação média acumulada na região Sul que não foi acompanhada pelos valores das três simulações. Além disso, as simulações superestimaram a precipitação para esta região. Já na região dos trópicos todas as simulações obtiveram valores acima do esperado para o período.

Figura 15– Precipitação média acumulada para a os dias 15 – 20 março de 2015 simuladas pelo modelo e pelos satélites TRMM E GPM; barras a esquerda região do cinturão tropical, barras centrais região NEB e barras a direita região sul do Brasil.

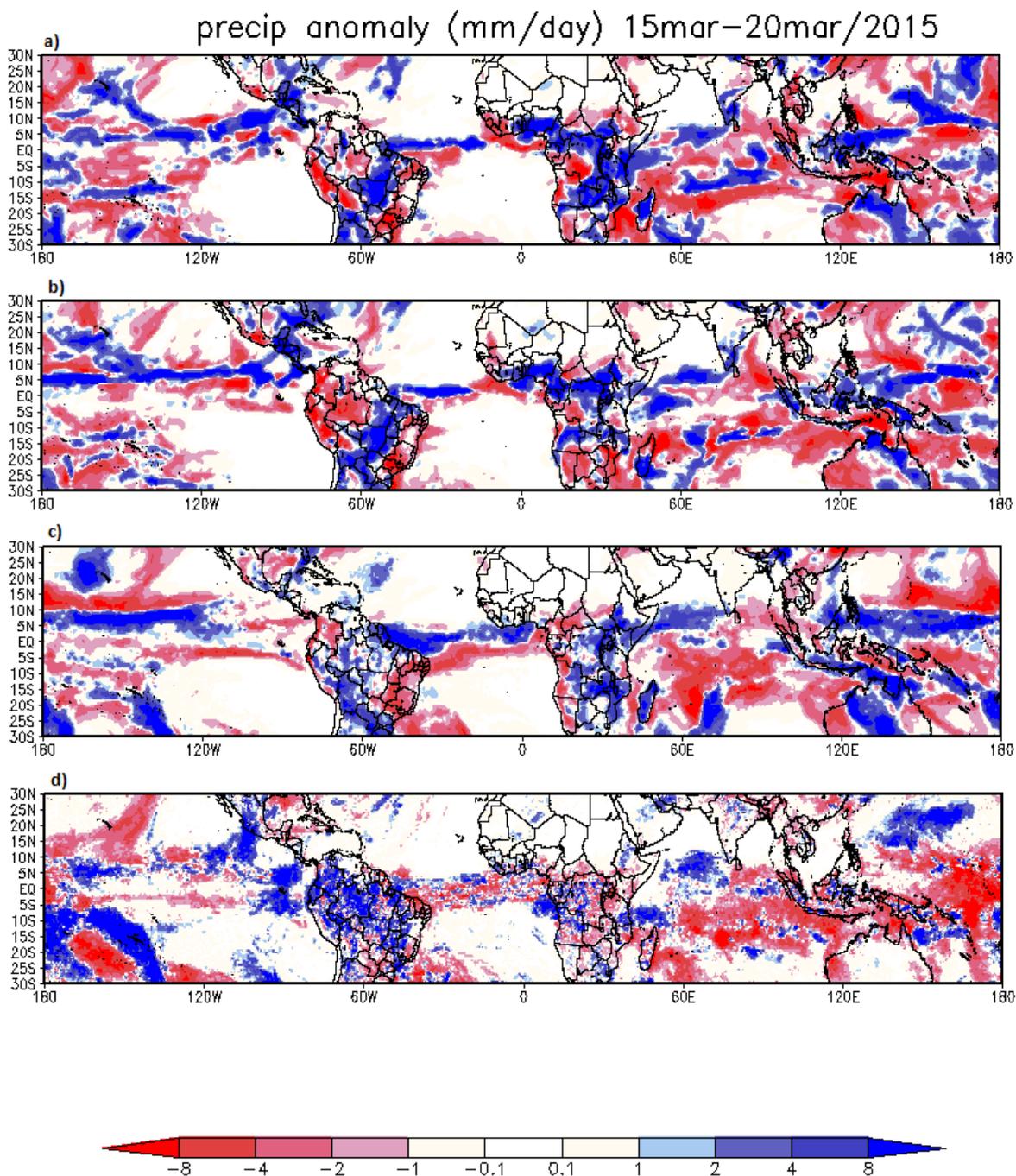


4.3.2 Análise da anomalia de precipitação

No terceiro período é observado maiores valores de precipitação sobre a região norte do Brasil, com aumento provocado pela atuação da OMJ nesta região. Esses valores são representados nas áreas em azul sobre as regiões Centro-Oeste e norte do Brasil, com exceção do estado do Amazonas que apresenta uma anomalia negativa para esse período nas duas primeiras simulações (Figura 16a e

16b). Já na terceira simulação ocorre uma maior distribuição de chuvas se comparadas com os dados observados neste período. Pouca correlação no continente africano e na Austrália, com exceção ao oeste deste país que apresentou um déficit de chuvas nas três simulações e corrobora com o observado.

Figura 16- Anomalia de Precipitação Acumulada para o Período2; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.

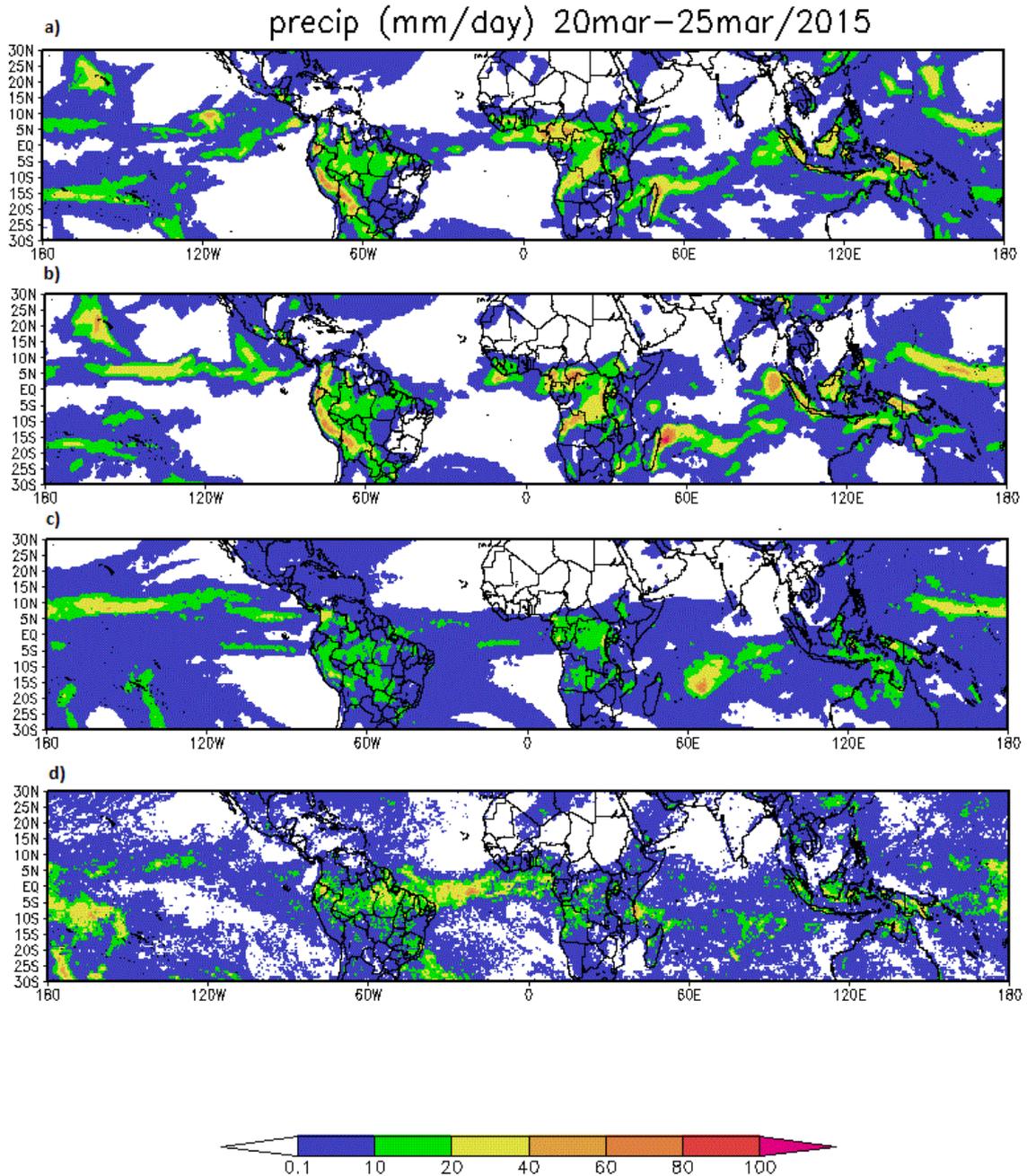


4.4 PERÍODO DE 20-25 DE MARÇO DE 2015

4.4.1 Análise da precipitação acumulada

No quarto período (i.e. 20-25 de março), entre as fases 8 e 1, é o período em que se espera a maior atividade convectiva da OMJ sobre a região NEB do Brasil e sobre a região equatorial do Oceano Atlântico. Por outro lado, a região do norte da Austrália e regiões próximas a Indonésia encontram-se num período de menores índices pluviométricos (Figura 17). As observações mostram que as regiões da ITCZ do Atlântico e da Zona de Convergência do Atlântico Sul, estiveram bastante ativas neste período (Figura 17d). No entanto, os resultados do modelo mostram que a maior parte da precipitação ocorreu nas regiões continentais ao invés das regiões marítimas (Figuras 17a, 17b e 17c).

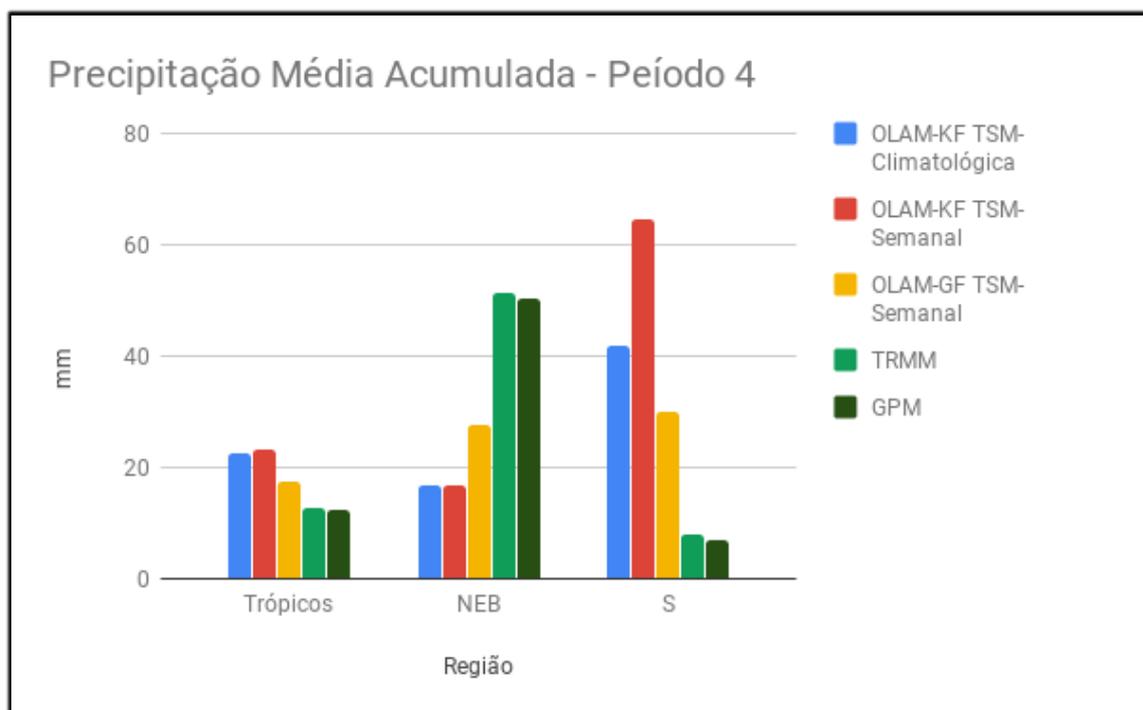
Figura 17– Precipitação média acumulada para o Período4; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.



Na Figura 18 vemos que para este período, o modelo subestima a precipitação observada na região do NEB e superestima a precipitação observada na região sul. Porém, de modo geral para a região tropical o modelo tem maior acurácia, apesar de superestimar nas três simulações. Destaca-se neste período o maior acúmulo de precipitação sobre a região nordeste, caracterizando a atividade

da OMJ. Adicionalmente, nota-se que a parametrização Grell-Freitas é novamente a que mais se assemelha aos valores observados.

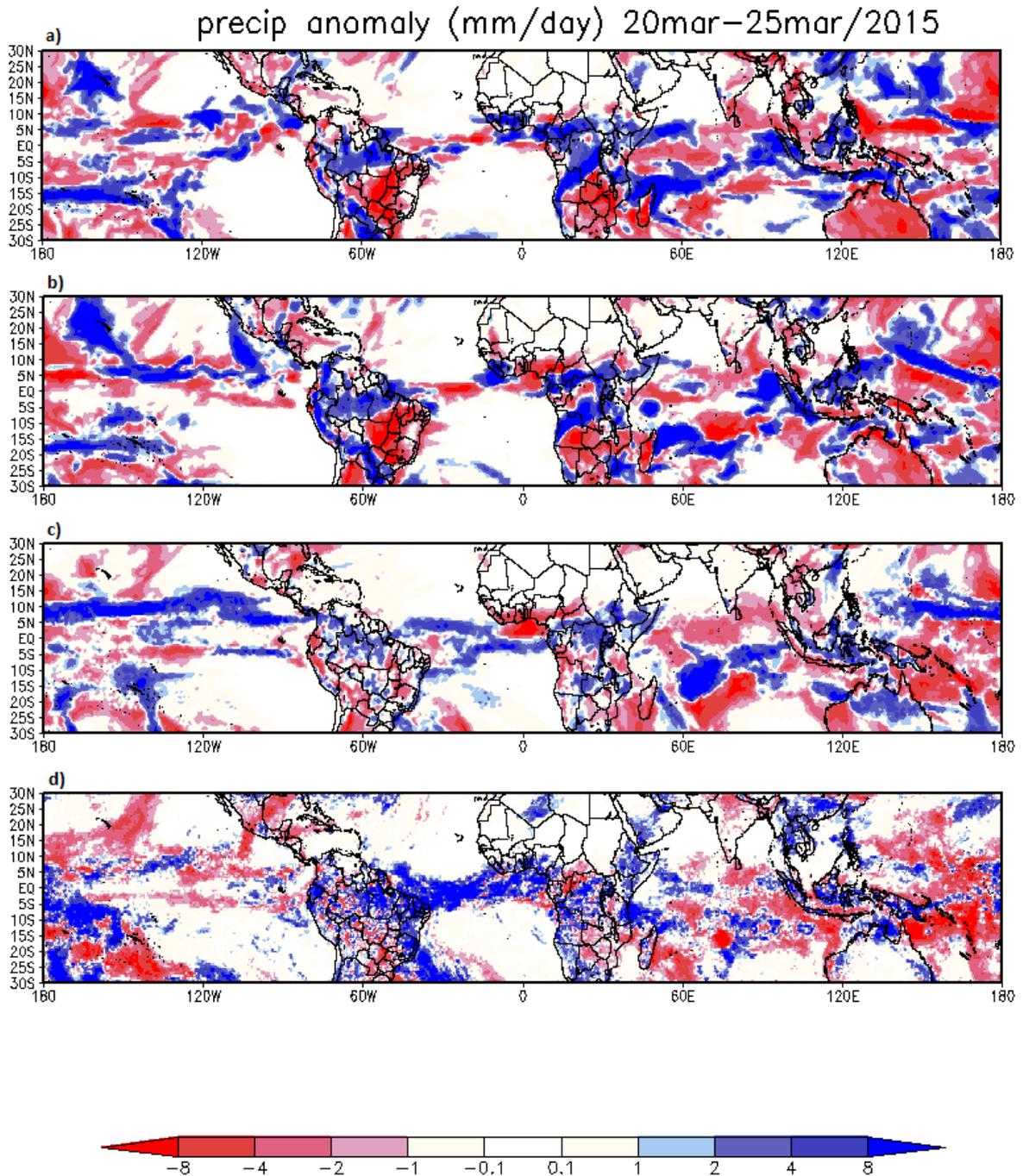
Figura 18– Precipitação média acumulada para a os dias 20 – 25 março de 2015 simuladas pelo modelo e pelos satélites TRMM E GPM; barras a esquerda região do cinturão tropical, barras centrais região NEB e barras a direita região sul do Brasil.



4.4.2 Análise da anomalia de precipitação

Na Figura 19 a atuação da OMJ se mostra bem presente sobre a AS e Oceano Atlântico Equatorial, em especial sobre a região nordeste do Brasil, com os maiores acumulados de chuva caindo neste período (Figura 19d). Porém, as duas primeiras simulações não conseguem representar bem esta distribuição de chuvas, subestimando e até mostrando anomalias negativas (Figura 19a e 19b). Na terceira simulação com a TSM atualizada semanalmente e a parametrização Grell-Freitas esse déficit é suavizado. Sobre o continente africano alguns núcleos são bem representados, porém bastante superestimados na região do Oceano Índico e subestimado na Austrália conforme a Figura 19c.

Figura 19- Anomalia de Precipitação Acumulada para o Período2; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.

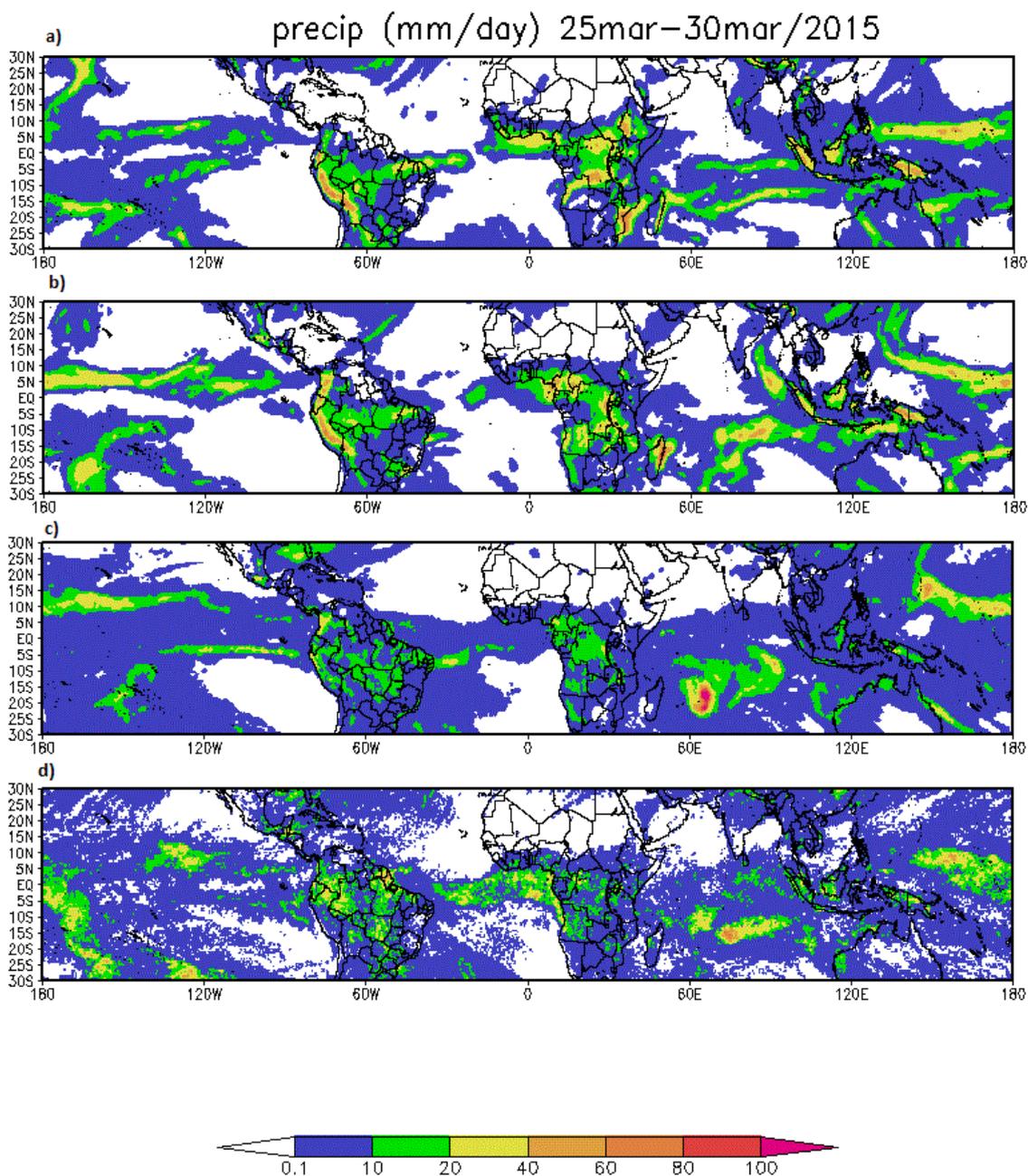


4.5 PERÍODO DE 25-30 DE MARÇO DE 2015

4.5.1 Análise da precipitação acumulada

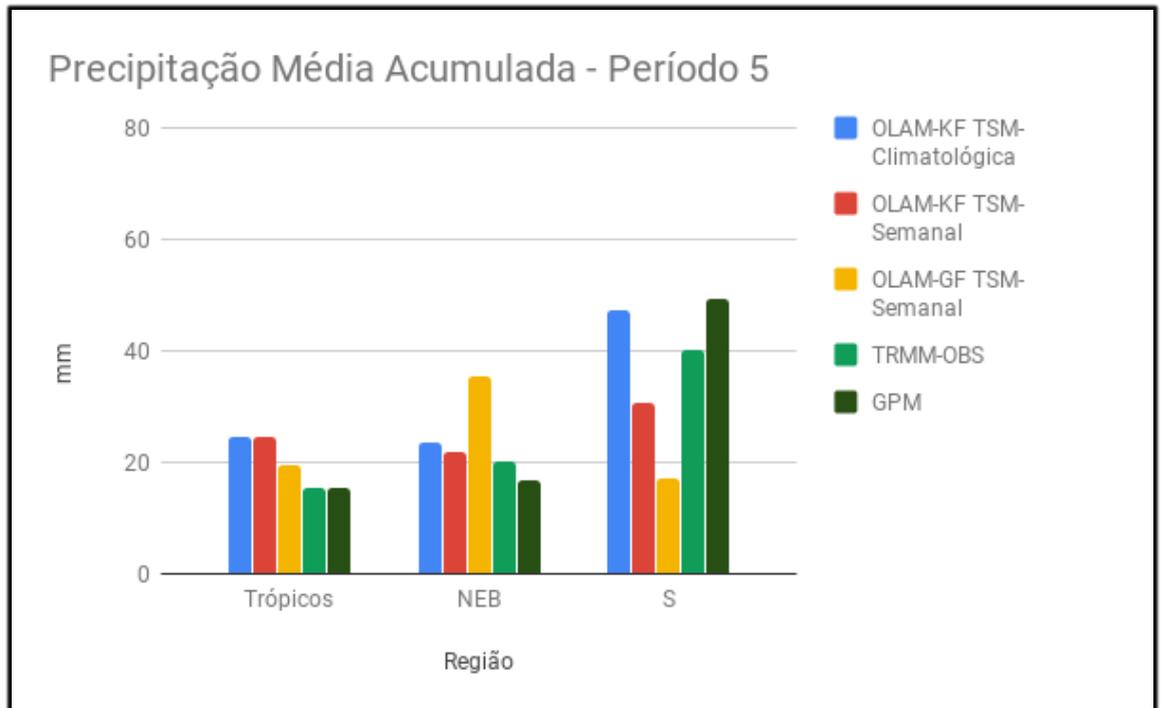
No penúltimo período analisado (i.e. 25-30 de março), a atividade da OMJ se estende desde a região leste do Oceano Atlântico Equatorial até sobre parte do continente africano, fases 1 e 2 (Figura 20). Além disso, neste período, observa-se uma tendência à formação de uma tempestade tropical sobre o Oceano Índico, sinal mais presente na última simulação (Figura 20c), que posteriormente irá se desenvolver em um ciclone tropical.

Figura 20 – Precipitação média acumulada para O Período5; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.



Os resultados para a precipitação média acumulada mostra certa concordância entre os valores estimados para os trópicos e para o NEB, sendo que a última simulação com a TSM atualizada e a parametrização tipo Grell-Freitas superestima os valores para esta região (Figura 21). Já na região Sul do Brasil, os valores foram abaixo dos observado na simulação com a TSM atualizada tanto para a parametrização Grell Freitas quanto para a parametrização Kain-Fritsch.

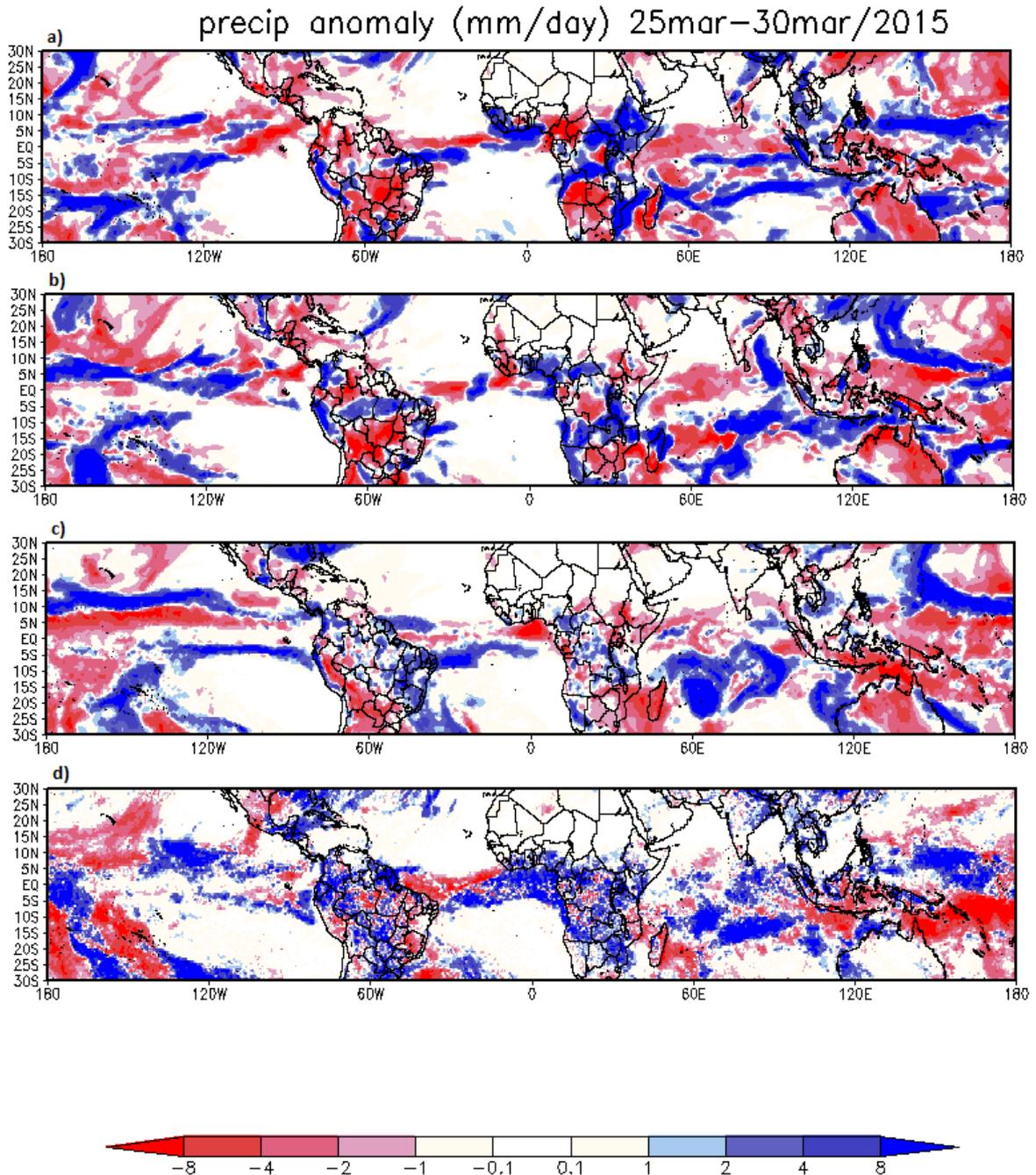
Figura 21– Precipitação média acumulada para a os dias 20 – 25 março de 2015 simuladas pelo modelo e pelos satélites TRMM E GPM; barras a esquerda região do cinturão tropical, barras centrais região NEB e barras a direita região sul do Brasil.



4.5.2 Análise da anomalia de precipitação

Neste período o maior núcleo de convecção associado a OMJ atravessa o Oceano Atlântico, já na 1-2, e sua maior atuação é sobre o continente africano (Figura 22d). Há, neste caso, uma subestimação de chuvas nas duas primeiras simulações para a AS, porém na região da África mostra-se com uma situação mais próxima do observado (Figura 22a e 22b). Na terceira simulação a região o Oceano Índico é bem representada com grandes núcleos de chuva representados pelas áreas em azul (Figura 22c). Portanto, novamente nota-se que a parametrização Grell-Freitas permite representar melhor os centros convectivos formados em decorrência da OMJ.

Figura 22- Anomalia de Precipitação Acumulada para o Período5; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.



4.5 PERÍODO DE 30 DE MARÇO-04 DE ABRIL DE 2015

4.6.1 Análise da precipitação acumulada

No último período da simulação a OMJ (i.e. 30 de março a 04 de abril) se encontra entre as fases 2 e 3, ativa sobre o Oceano Índico. Como podemos notar na Figura 23, os maiores valores da precipitação média acumulada se encontram sobre o Oceano Índico. Além disso, é possível observar o surgimento de dois fenômenos atmosféricos sobre esta região, o ciclone tropical Joalane que se formou no final do mês de março e início do mês de abril de 2015 e o outro ciclone tropical Ikola, que se formou nos primeiros dias de abril, mais próximo a Austrália (Figura 24). Liebmann et al. (1994) e Hall et al. (2001) mostraram que ciclones extratropicais nos oceanos Índico e Pacífico Oeste ocorrem mais frequentemente durante o aumento da fase convectiva da OMJ.

Figura 23 – Precipitação média acumulada para o Período6; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.

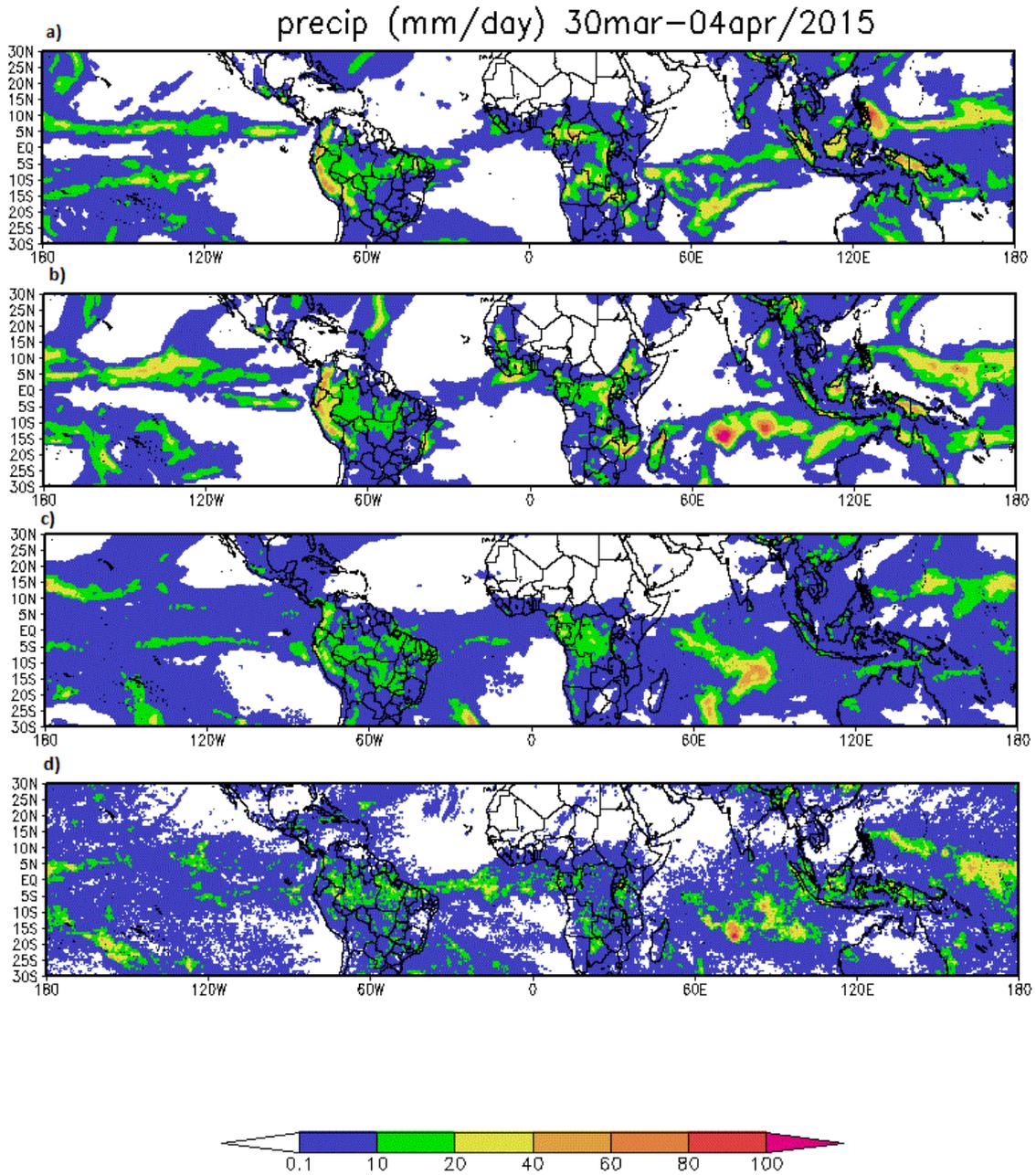
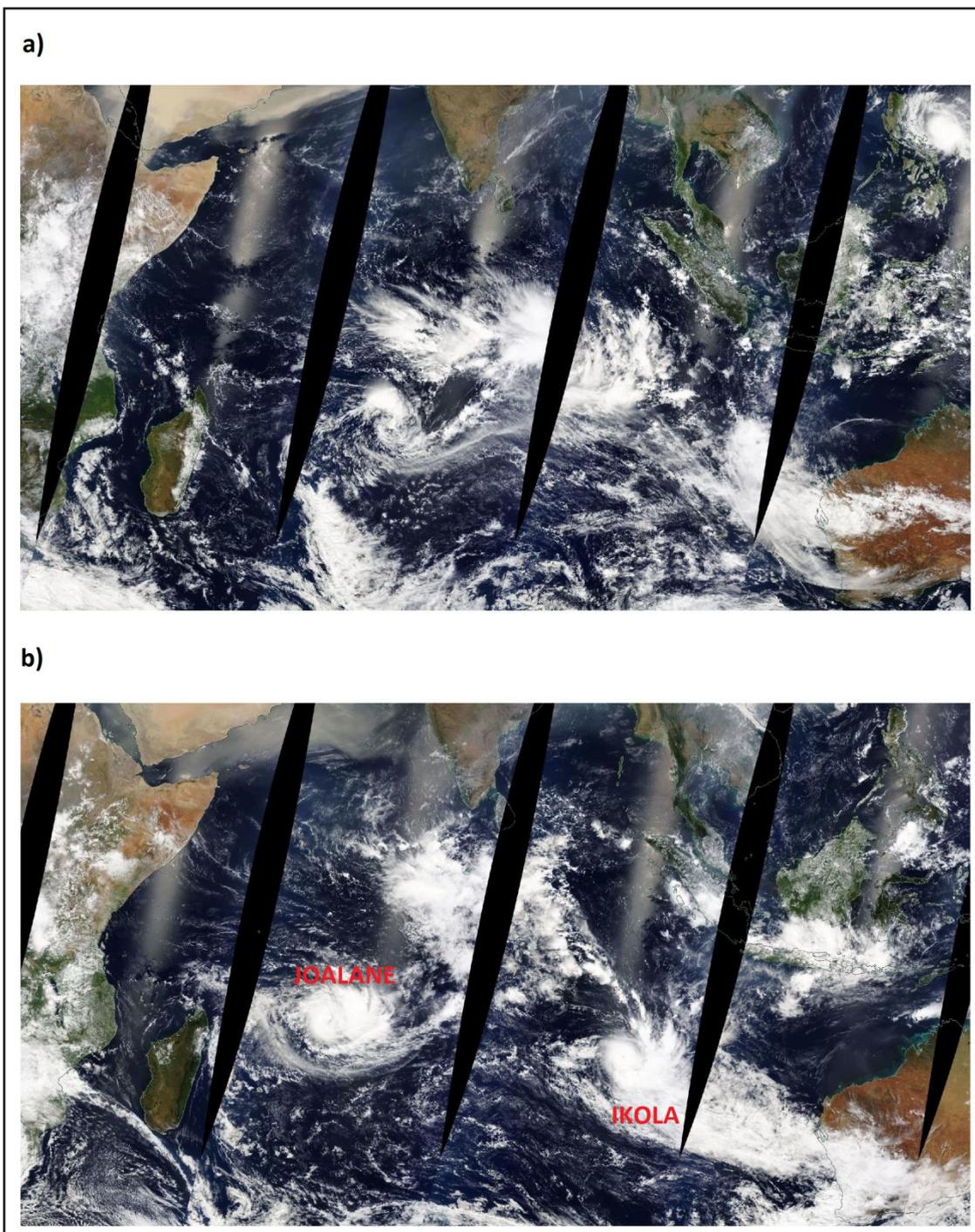


Figura 24 – Imagem do satélite TERRA-NASA do Oceano Índico Tropical, a) no dia 4 de abril de 2015, b) no dia 7 de abril de 2015 com dois ciclones tropicais formados, Joalane a esquerda, e Ikola, a direita. Fonte: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>.

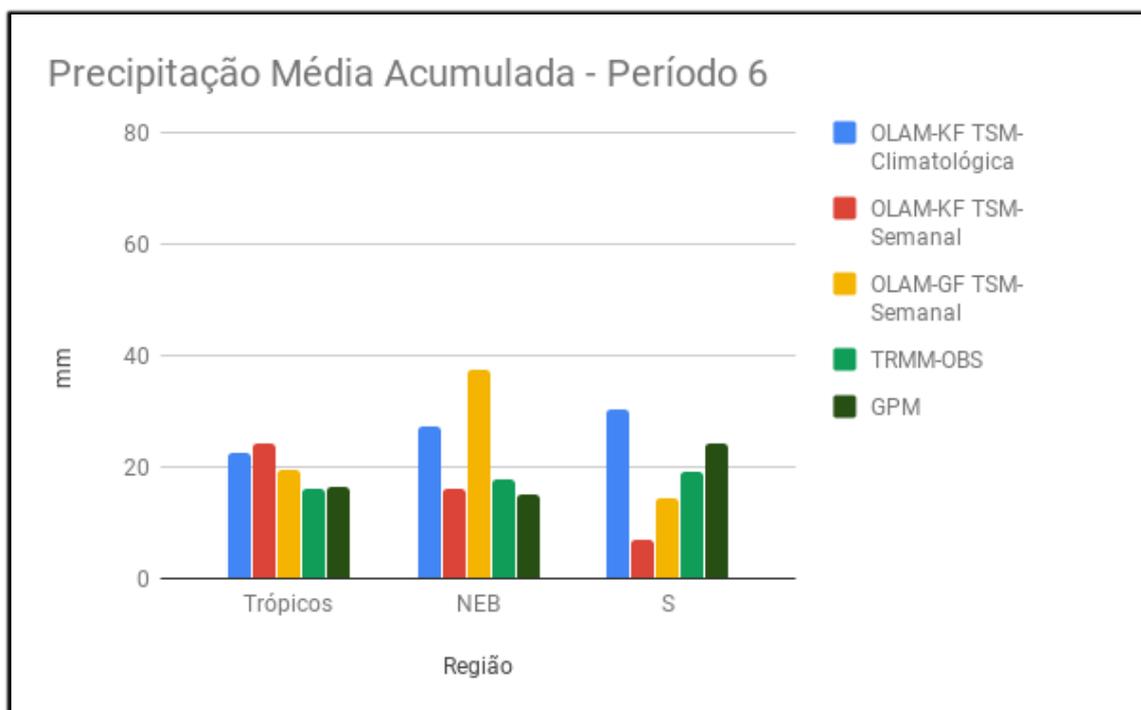


Na Figura 24a do satélite Terra feita pelo sensor o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), fornecido pela NASA, para a data quatro de abril de 2015, último período de simulação, mostra uma região de convecção

associada OMJ na região do Oceano Índico Central. Já na Figura 24b para o dia 7 de abril essa convecção já aparece associada com dois ciclones tropicais, um mais próximo à região leste do continente africano, próximo à ilha de Madagascar (Joalane) e o segundo mais a noroeste da Austrália (Ikola).

O gráfico do último período mostra que as simulações variaram mais entre si nas regiões NEB e Sul do Brasil e não indicam muita concordância com os valores observados. Porém, para a região dos trópicos, os valores de precipitação média acumulada variam menos entre si e aproximam-se do observados pelos satélites.

Figura 25– Precipitação média acumulada para o período de 30 de março a 04 de abril de 2015 simuladas pelo modelo e pelos satélites TRMM E GPM; barras a esquerda região do cinturão tropical, barras centrais região NEB e barras a direita região sul do Brasil.

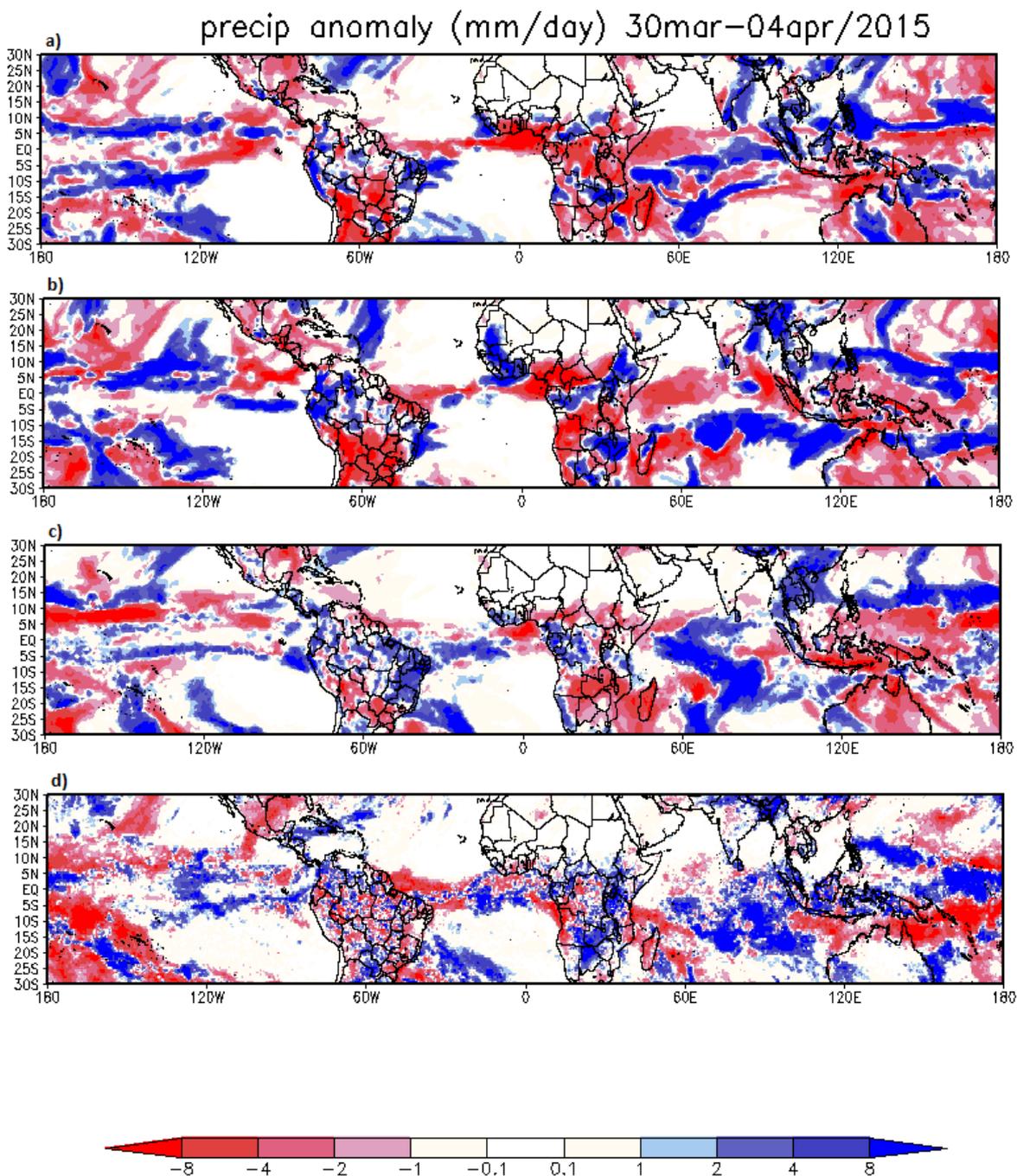


4.6.2 Análise da anomalia de precipitação

No último período da simulação os principais núcleos de convecção associados à OMJ estão sobre o Oceano Índico, com a AS e África tendo seus valores de precipitação diminuindo em relação à média (Figura 25d). Com isso,

valores positivos de anomalia podem ser vistos na terceira simulação, com melhor distribuição em relação às duas primeiras, sobre o Oceano Índico, além de uma tendência a diminuição de chuvas na AS e África, de acordo com a respectiva fase da OMJ.

Figura 26- Anomalia de Precipitação Acumulada para o Período6; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.



4.7 ANÁLISE TEMPORAL PARA O PERÍODO TODO

4.7.1 Análise da precipitação acumulada para o período total

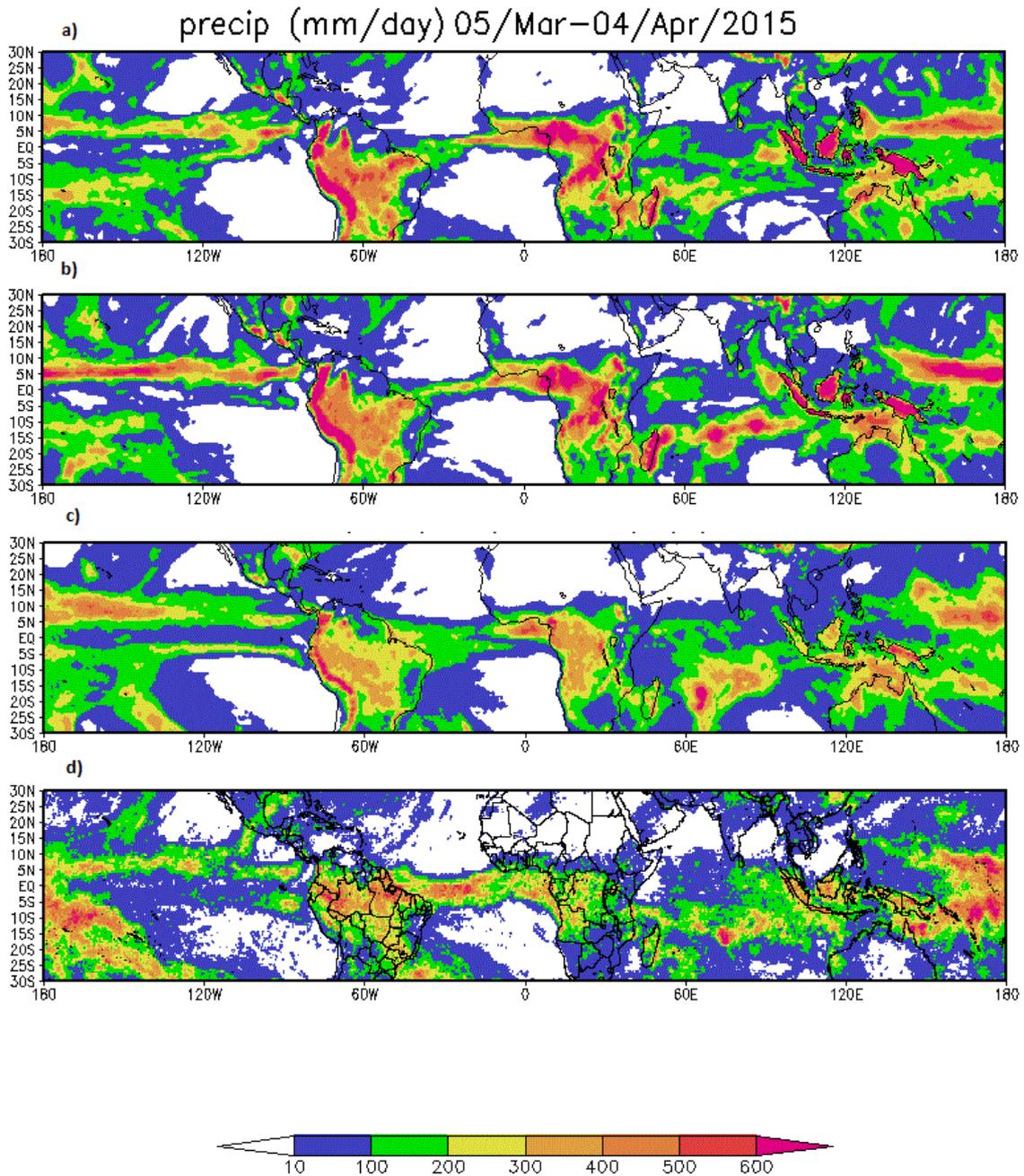
A análise da precipitação acumulada para todo o período, de 5 de março a 4 de abril de 2015, leva em conta a soma das precipitações acumuladas em todas as pântadas anteriores analisadas (Figura 27). No mapa é possível identificar algumas diferenças com relação às três simulações. Na primeira e na segunda simulação com a parametrização cumulus Kain-Fritsch e TSM climatológica e atualizada semanalmente, Figura 27a e 27b respectivamente, não há muito concordância dos acumulados em relação ao observado pelo satélite TRMM Figura 27d. Valores de precipitação sobre os continentes são particularmente superestimados, como é o caso da África, AS e região da Indonésia no sudeste asiático.

Já na terceira simulação com a TSM atualizada e parametrização cumulus tipo Grell-Freitas observa-se uma maior suavidade em relação às duas primeiras simulações Figura 27c, com valores de precipitação mais próximos ao observado na Figura 27d. Além disso, o continente africano e a AS não apresentam valores tão altos de precipitação conforme as duas primeiras simulações, ou seja, se apresentam mais de acordo com os dados observados pelo satélite TRMM. Outro fator que corrobora ainda com o resultado melhor da terceira simulação são os respectivos valores de coeficiente de correlação espacial calculados para cada uma das simulações em relação ao observado, sendo que, na primeira simulação o valor de correlação espacial é de 0,43, já na segunda simulação de 0,50 e na terceira simulação de 0,55, ou seja, observa uma maior correlação na mudança da TSM climatológica para semanal e também da parametrização cumulus Kain-Fritsch para Grell-Freitas.

Outro ponto que merece destaque é a região sudoeste do Oceano Pacífico Sul, onde geralmente forma-se a Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS). Nesta região os acumulados de precipitação foram bem expressivos durante o período, Figura 27d, provavelmente associados à intensificação da ZCPS devido à atuação da OMJ. A região onde ocorre a ZCPS sobre o *Maritime Continent* experimenta pulsos convectivos decorrentes da OMJ (Madden e Julian 1971), e esses pulsos são capazes de se propagarem dos trópicos para os subtropicos através da ZCPS (Matthews 2012), porém, sobre esta região o modelo não mostrou

resultados tão expressivos, superestimando nos três casos, com intensidade menor na terceira simulação, Figura 27c.

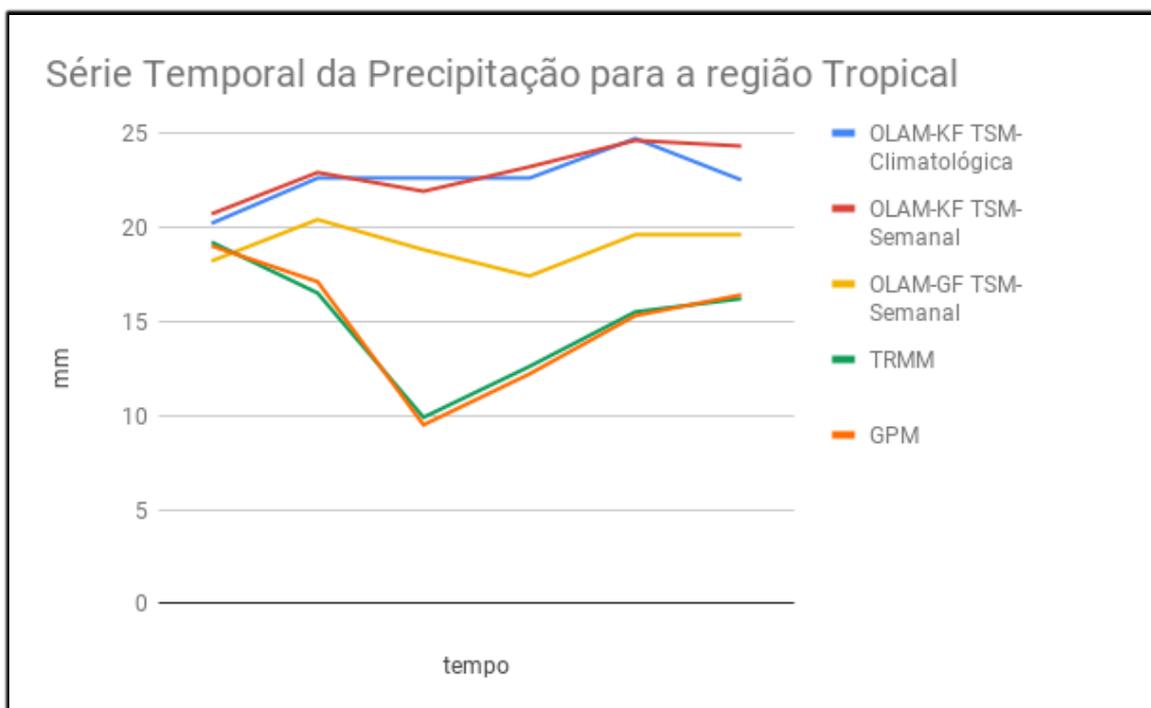
Figura 27– Precipitação média acumulada para o período inteiro; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) observada pelo satélite TRMM.



4.7.2 Análise da série temporal para a região tropical

Analisando o período todo, para a região tropical, podemos ver que as três simulações sempre superestimaram o valor observado, no início e no final do período menos do que no período intermediário. Porém destaca-se que a simulações em que variaram somente a TSM de climatológica para atualizada semanalmente, mantendo a parametrização do tipo Kain-Fritsch, praticamente obtiveram os mesmos resultados, de modo que a TSM não é o principal fator que melhoraria o tipo de previsão. Já para a simulação utilizando a TSM atualizada e a parametrização cumulus do tipo Grell-Freitas, apesar de também ter superestimado os valores são mais próximos aos valores observacionais dos satélites TRMM e GPM.

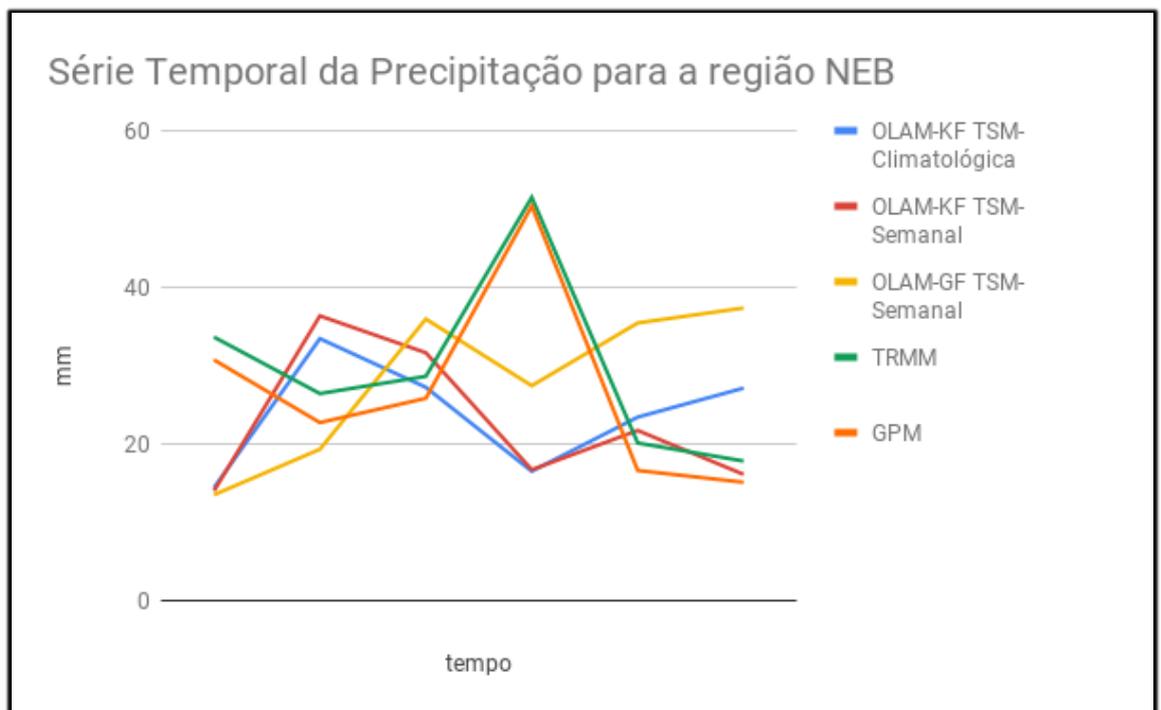
Figura 28– Análise da Série Temporal das três simulações com o modelo OLAM e as precipitações observadas pelo satélite para a região Tropical levando em consideração todo o período de 5 de março a 4 de abril de 2015.



4.7.3 Análise da série temporal para a região NEB

Para a região NEB a análise de série temporal mostra valores muito parecidos das duas primeiras simulações, novamente mostrando que a TSM não alterou tanto nos resultados da previsão. Na terceira simulação os resultados são um pouco mais próximos aos observados pelos satélites, porém quando a região registrou seu maior índice pluviométrico, entre os dias 20 a 25 de março, as três simulações mostram uma queda no volume de chuva esperado. Com essa tendência menos acentuada na última simulação.

Figura 29 – Análise da Série Temporal das três simulações com o modelo OLAM e as precipitações observadas pelo satélite para a região NEB levando em consideração todo o período de 5 de março a 4 de abril de 2015.

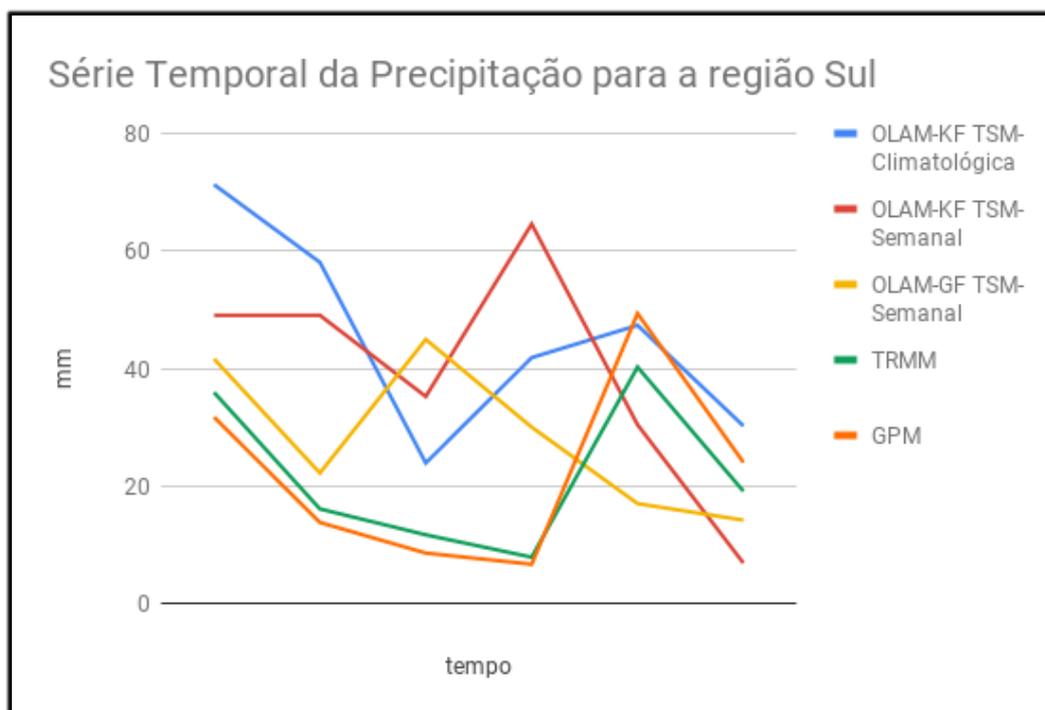


4.7.4 Análise da série temporal para a região Sul

Para a região Sul do Brasil, as duas primeiras simulações superestimam a precipitação e a terceira apresenta-se mais próxima ao observado. Porém, entre os dias 15 e 20 de março, período de menor índice de pluviosidade para esta região, ocorre que a terceira simulação superestima os valores enquanto que as duas primeiras acompanham a queda, apesar de apresentarem valores mais altos que os

dos satélites. Novamente no final do período ocorre uma tendência de aumento da precipitação que as duas primeiras simulações acompanham o observado e a terceira subestima o observado.

Figura 30– Análise da Série Temporal das três simulações com o modelo OLAM e as precipitações observadas pelo satélite para a região Sul do Brasil levando em consideração todo o período de 5 de março a 4 de abril de 2015.



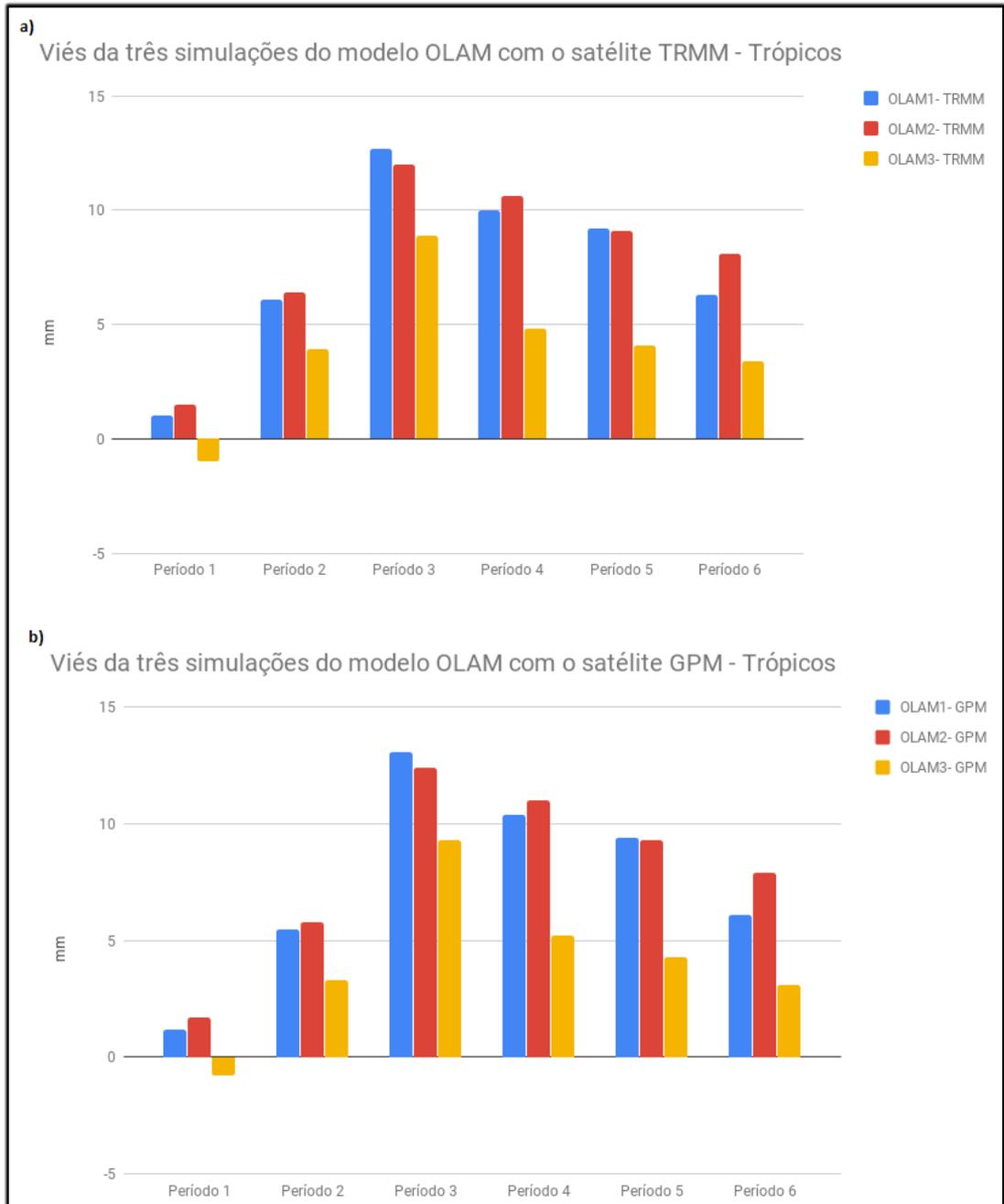
4.8 ANÁLISES DO VIÉS DO MODELO PARA A PRECIPITAÇÃO

4.8.1 Análise do viés do modelo para a região dos Trópicos

Para a região dos trópicos o modelo apresenta seu melhor desempenho, se comparado com as outras regiões. O gráfico mostra que, para a precipitação os valores são quase sempre maiores do que os observados pelo satélite TRMM e GPM. Porém, em nenhuma das três simulações esse valor ultrapassa 15 mm. Destaca-se também que nas duas primeiras simulações os valores são sempre muito parecidos, o que indica que o parâmetro da TSM não é o fator de maior relevância para o modelo simular a propagação da OMJ com relação a variável precipitação, evidenciando que a parametrização cumulus tem maior relevância

neste caso. Isso pode ser observado analisando os resultados da terceira simulação que foi utilizada a parametrização do tipo Grell-Freitas, a qual apresenta o menor viés para a região dos trópicos em todos os períodos analisados.

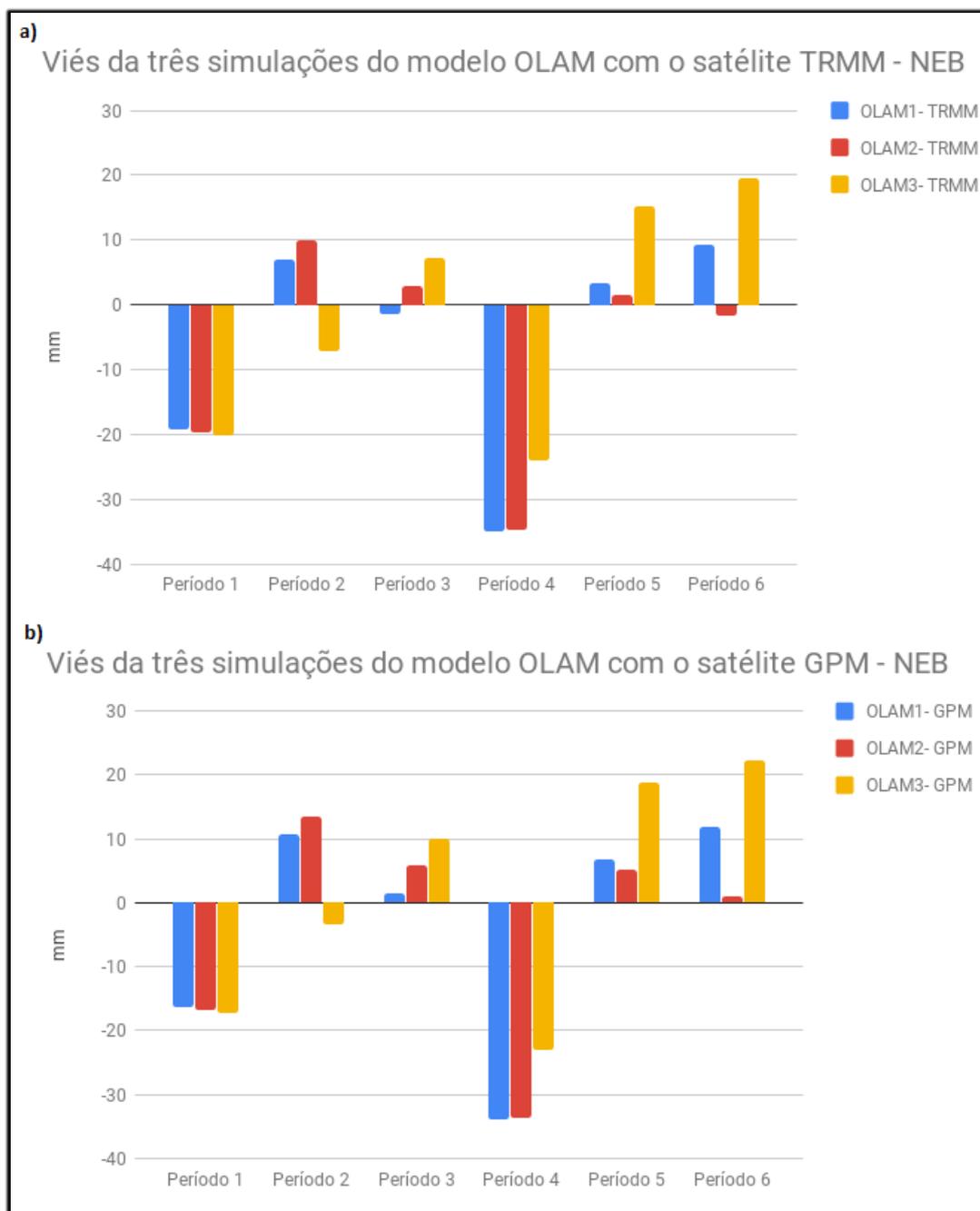
Figura 31– Viés das três simulações do modelo OLAM para a região dos Trópicos, a) com base no satélite TRMM, b) com base no satélite GPM-NASA.



4.8.2 Análise do viés do modelo para a região NEB

Na região do NEB, os valores do viés variaram em grande parte do período. Em alguns casos observam-se valores acima do esperado e em outros com valores abaixo do esperado, esse últimos um pouco mais expressivos. Notam-se também em alguns momentos as duas primeiras simulações apresentam um menor viés em relação à terceira. Outro fato importante é que quando a região apresentou o seu maior índice pluviométrico, Período 4, o modelo subestimou a precipitação nas três simulações, justamente neste período que a OMJ estava com seu núcleo de maior convecção sobre a região no NEB, fases 8 e 1 da oscilação.

Figura 32– Viés das três simulações do modelo OLAM para a região do NEB, a) com base no satélite TRMM, b) com base no satélite GPM-NASA.

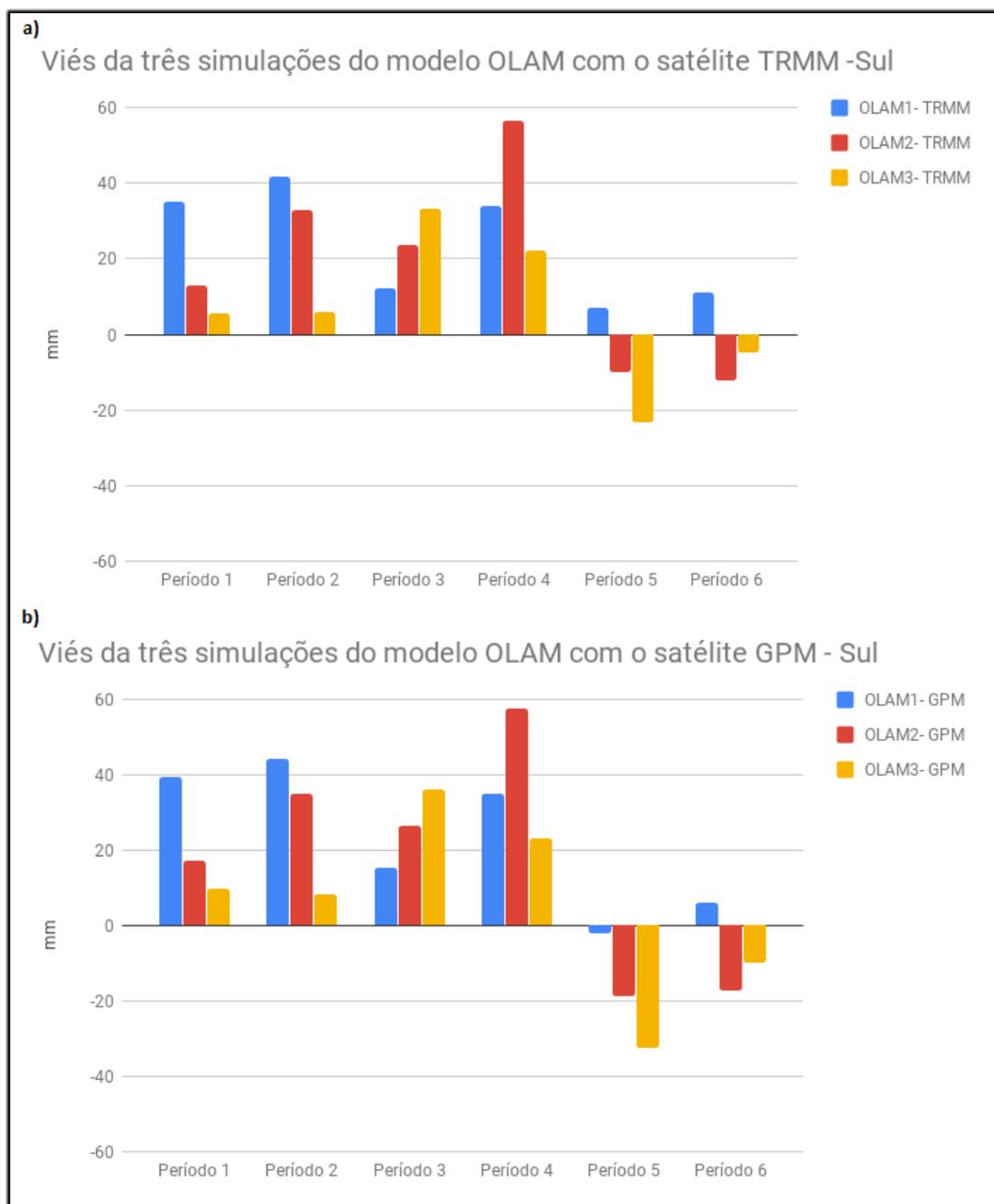


4.8.3 Análise do viés do modelo para a região Sul

Na Figura 33 temos o viés para a região sul do Brasil. Nesta figura observa-se que ambos gráficos se comportam de forma similar, tanto para o satélite TRMM (Figura 33a) quanto para o satélite GPM (Figura 33b). Essa região é também o local

onde o modelo apresentou os maiores valores de viés se comparado com os valores das outras regiões, alguns chegando a quase 60 mm (Período 4) para a segunda simulação. A terceira simulação se apresenta como a melhor nos dois primeiros períodos, tendo baixos valores de viés, porém a partir do terceiro período apresenta maior instabilidade. Nos dois últimos períodos os valores de viés diminuem novamente, porém invertem o sinal, subestimando os valores observados pelos dois satélites.

Figura 33 – Viés das três simulações do modelo OLAM para a região Sul do Brasil, a) com base no satélite TRMM, b) com base no satélite GPM-NASA.



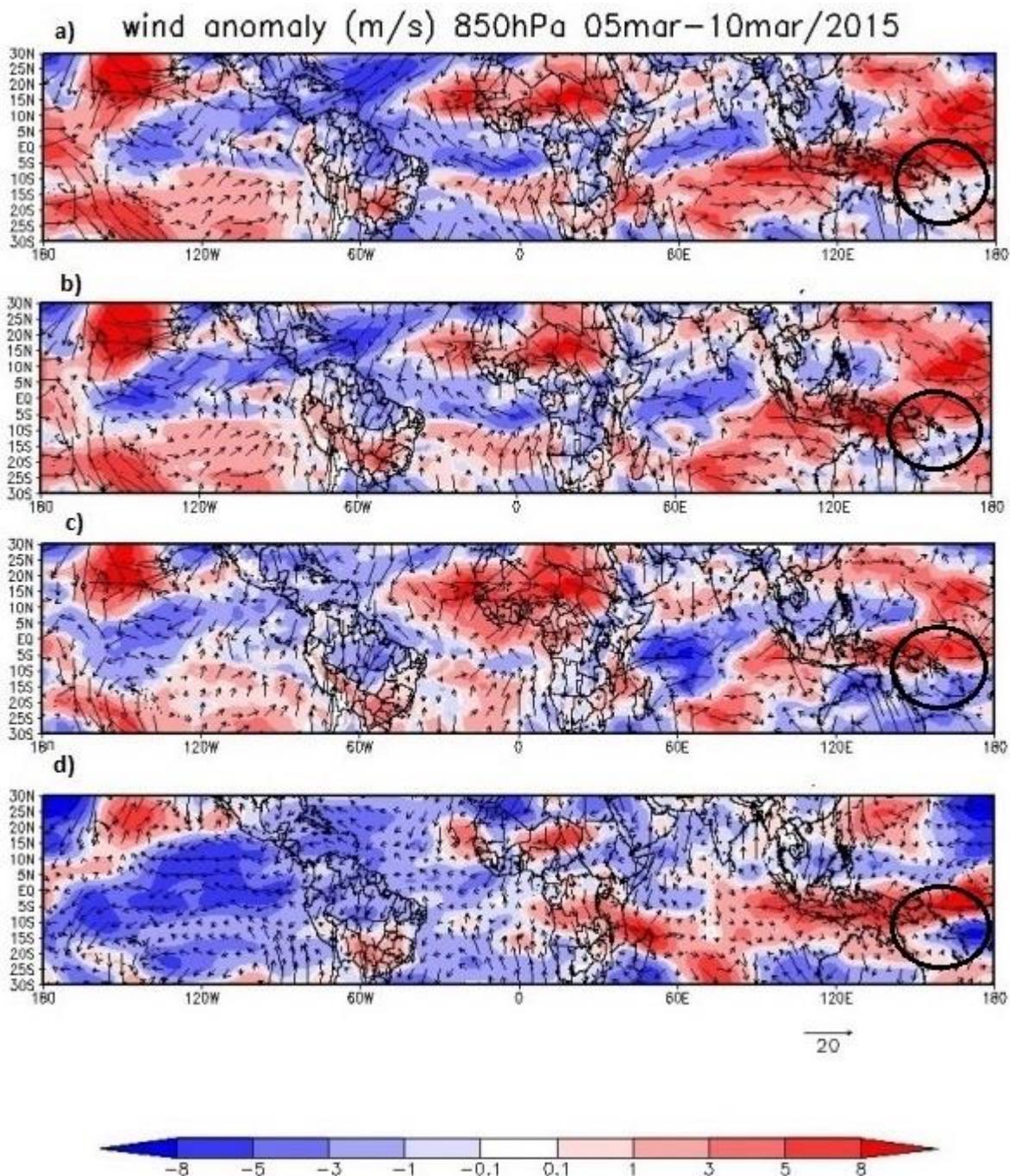
4.9 ANÁLISE ESPACIAL DOS VENTOS

Os mapas a seguir representam as anomalias de ventos em 850 hPa para o período analisado, separados também em 6 pênadas que juntas totalizam o período total de simulação. As regiões em vermelho mostram anomalias de ventos de oeste (positivo), já as regiões em azul representam anomalia de ventos de leste (negativo).

4.9.1 Análise espacial da anomalia de ventos para o período de 5 a 10 de março de 2015

Por volta do dia 7 de março de 2015 pode-se observar uma anomalia de ventos de oeste na região do *Maritime Continent* se estendendo desde o Índico Tropical até oeste do Oceano Pacífico (Figura 34 d). Esse período compreende a fase 5 da OMJ, a qual a maior pluviosidade ocorre na região do sudeste asiático e norte da Austrália. Nos mapas gerados pelo modelo (Figuras 34 a, 34b e 35c) podemos observar que nas três simulações o modelo consegue representar a anomalia de ventos nesta região.

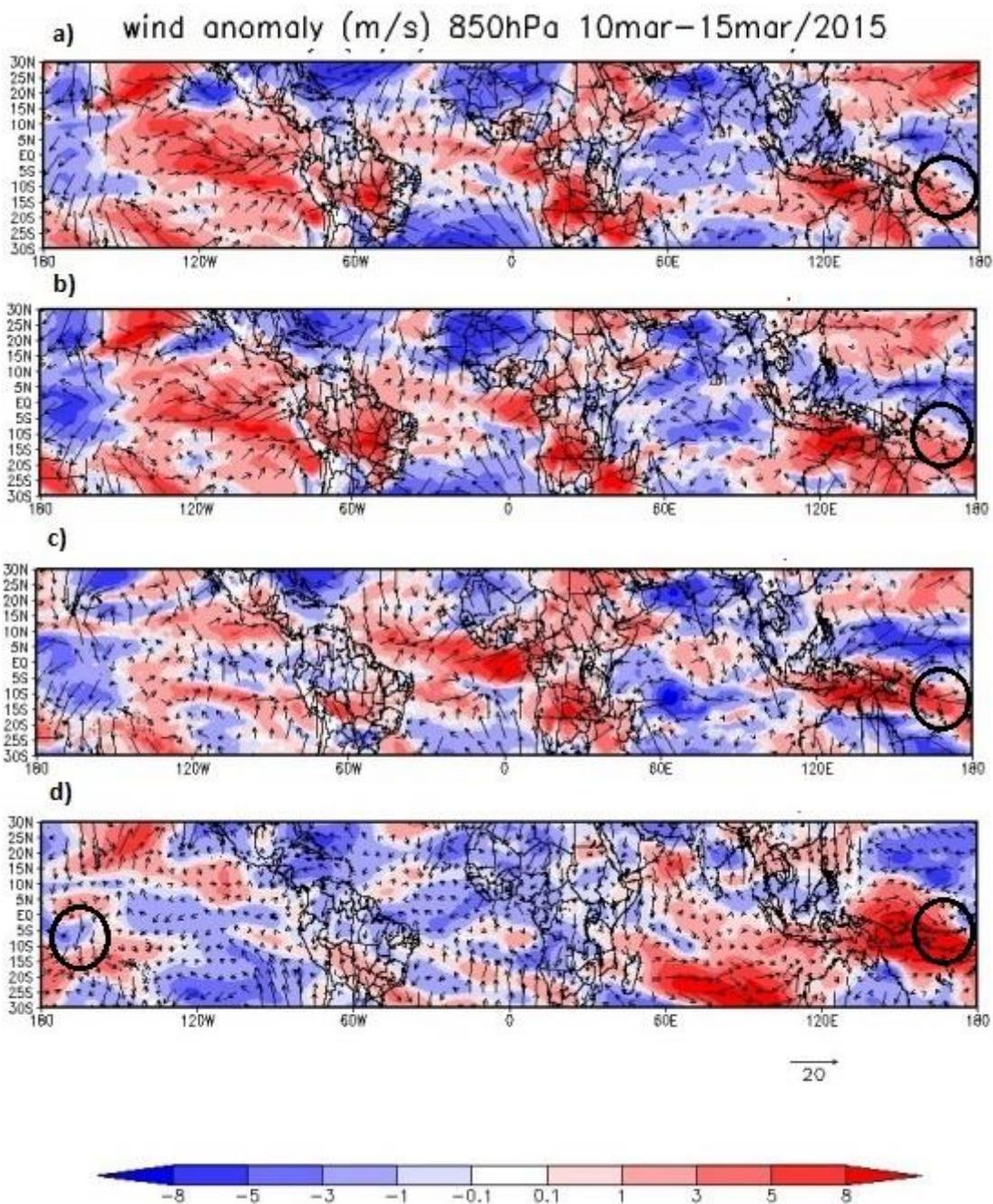
Figura 34- Anomalia do vento zonal a 850hPa para o Período 1; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.



4.9.2 Análise espacial da anomalia de ventos para o período de 10 a 15 de março de 2015

No segundo período, as anomalias de ventos de oeste (machas vermelhas) se intensificam na região oeste do Oceano Pacífico e norte da Austrália, intensificando o sinal da OMJ. A convergência desses ventos oeste (vermelho) e leste (azul) é possível observar próximo a linha de data na Figura 35d. Para a região de maior atividade da OMJ o modelo consegue representar essa anomalia de ventos de oeste nas três simulações (Figura 35a, 35b e 35c), porém nas duas primeiras simulações, sobre a região do Pacífico leste o modelo mostra uma antecipação dos ventos de oeste para o nível de 850 hPa.

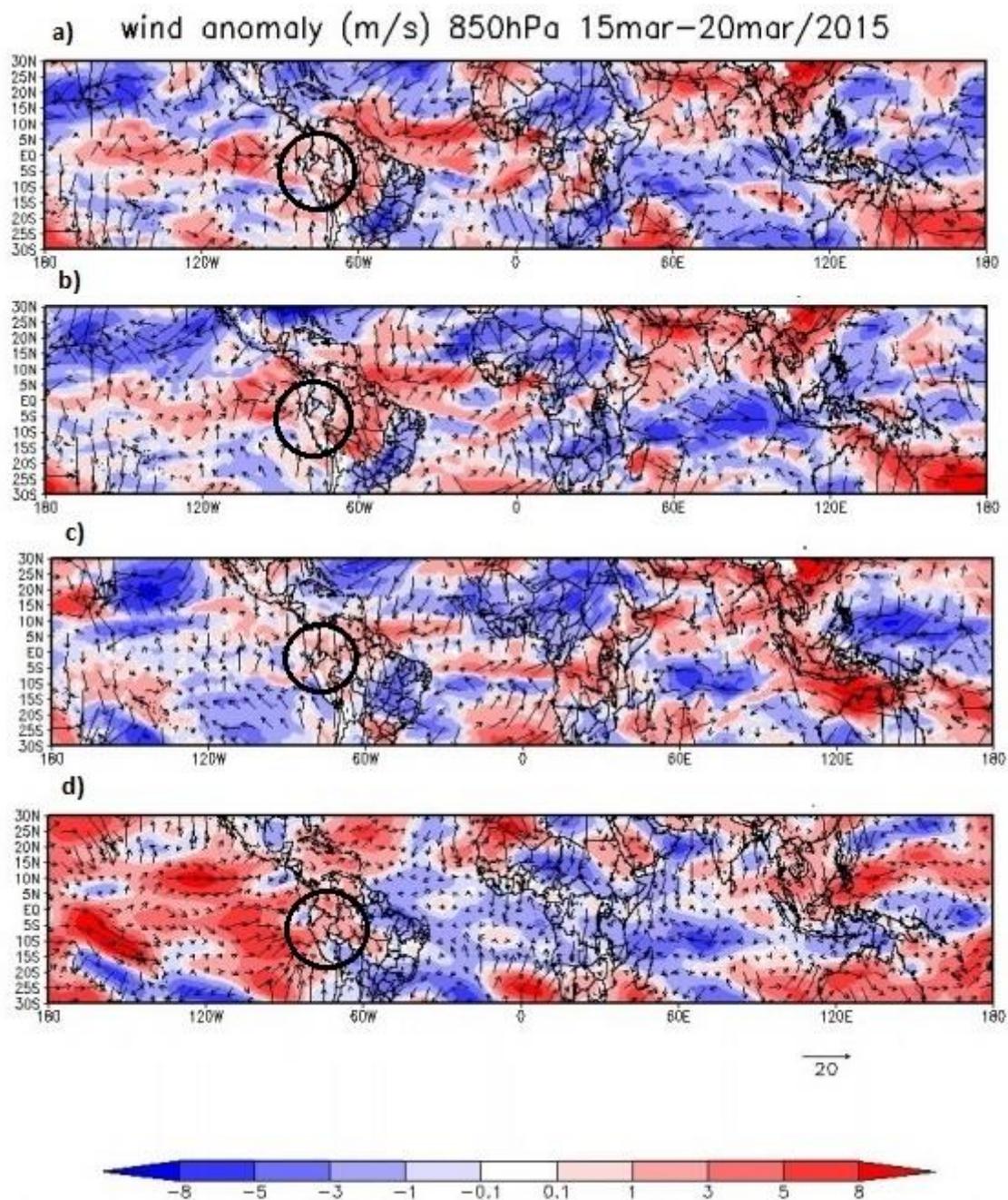
Figura 35- Anomalia do vento zonal a 850hPa para o Período 2; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.



4.9.3 Análise espacial da anomalia de ventos para o período de 15 a 20 de março de 2015

No terceiro período, observam-se as anomalias de ventos de oeste sobre praticamente todo o Oceano Pacífico, desde a linha de data até a costa americana. Além disso, sobre o Oceano Índico é possível observar anomalias de ventos de leste, característicos da fase 8 da OMJ (Figura 36d). Com relação às simulações feitas pelo OLAM, as duas primeiras Figuras 36a e 36b continuam mostrando anomalias de ventos de oeste sobre a região leste do Oceano Pacífico, bem como os dados de reanálise sugere Figura 36d. Apesar de menos evidente, o modelo consegue representar as anomalias na região do Pacífico na terceira simulação.

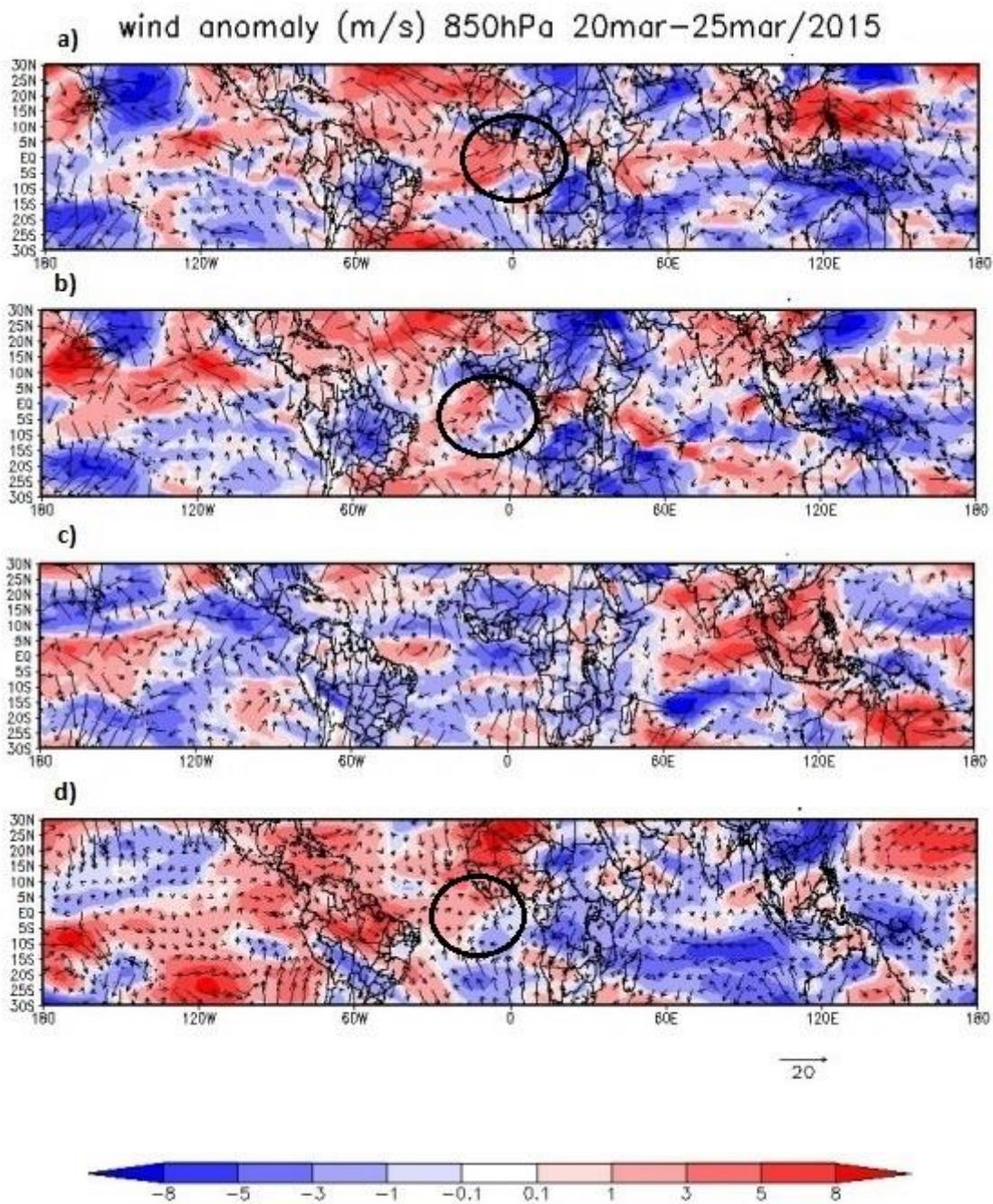
Figura 36- Anomalia do vento zonal a 850hPa para o Período 3; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.



4.9.4 Análise espacial da anomalia de ventos para o período de 20 a 25 de março de 2015

No quarto período a OMJ está mais ativa sobre a AS, tendo seus maiores volumes pluviométricos ocorrendo sobre o NEB neste período. As machas em vermelho sobre o Norte da AS mostram a propagação para leste com o seu núcleo convectivo sobre o Oceano Atlântico Tropical (Figura 37d). Observam-se também sobre toda a região do *Maritime Continent* anomalias de ventos de leste evidenciando pelas áreas em tom de azul. Nas duas primeiras simulações (Figura 37 a e b) é possível observar convergência de ventos na região do Oceano Atlântico Tropical e anomalias de ventos de leste sobre o *Maritime Continent*. Já na terceira simulação esse cenário não parece tão bem representado (Figura 37c).

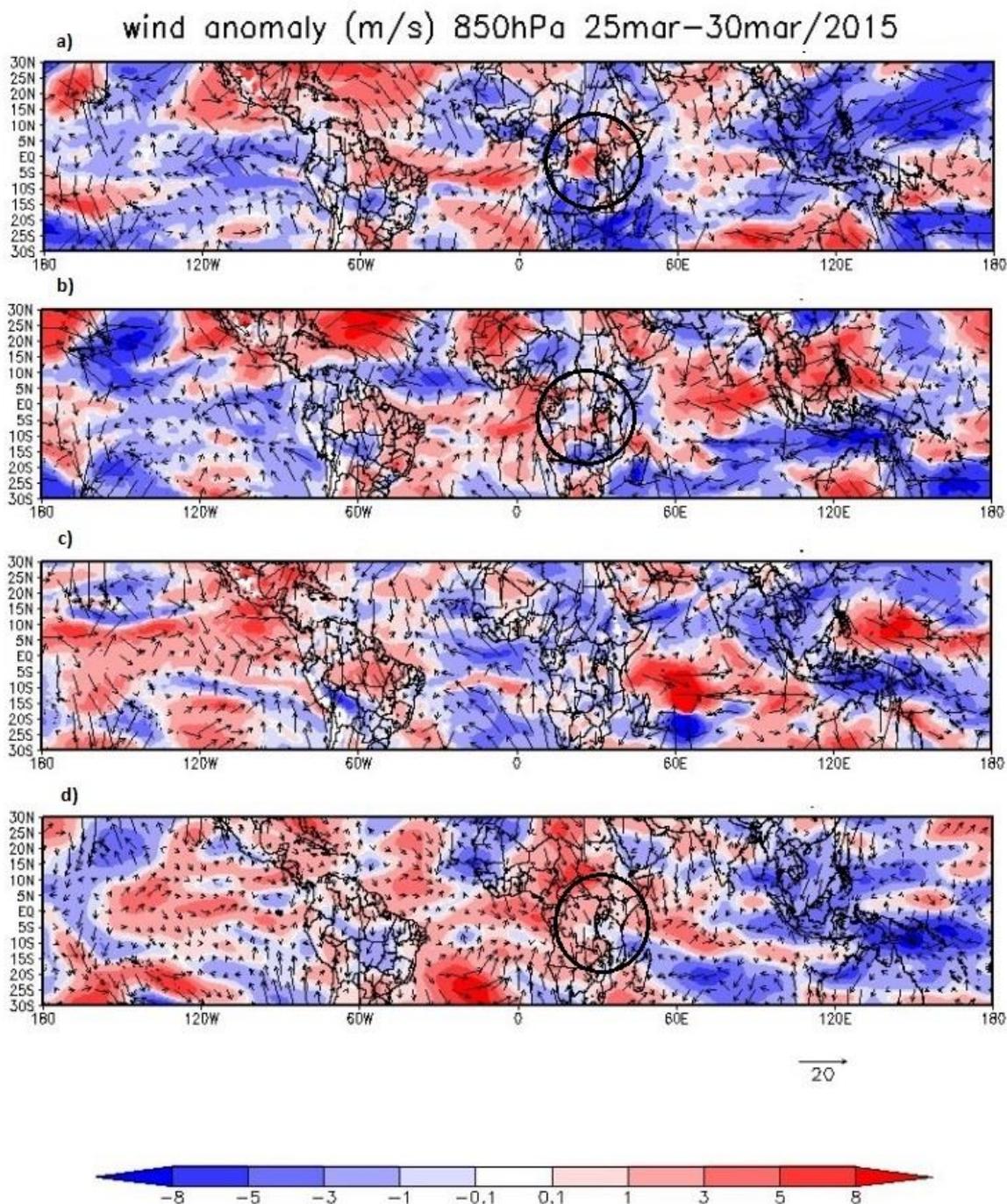
Figura 37- Anomalia do vento zonal a 850hPa para o Período 4; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.



4.9.5 Análise espacial da anomalia de ventos para o período de 25 a 30 de março de 2015

No quinto período a OMJ encontra-se entre as fases 1 e 2, com a convergência de ventos ocorrendo praticamente sobre toda a região tropical do continente africano e Oceano Índico, conforme mostra o mapa de ventos da Figura 38d. As simulações, apesar de dispersas não representam bem esta convergência de ventos neste período.

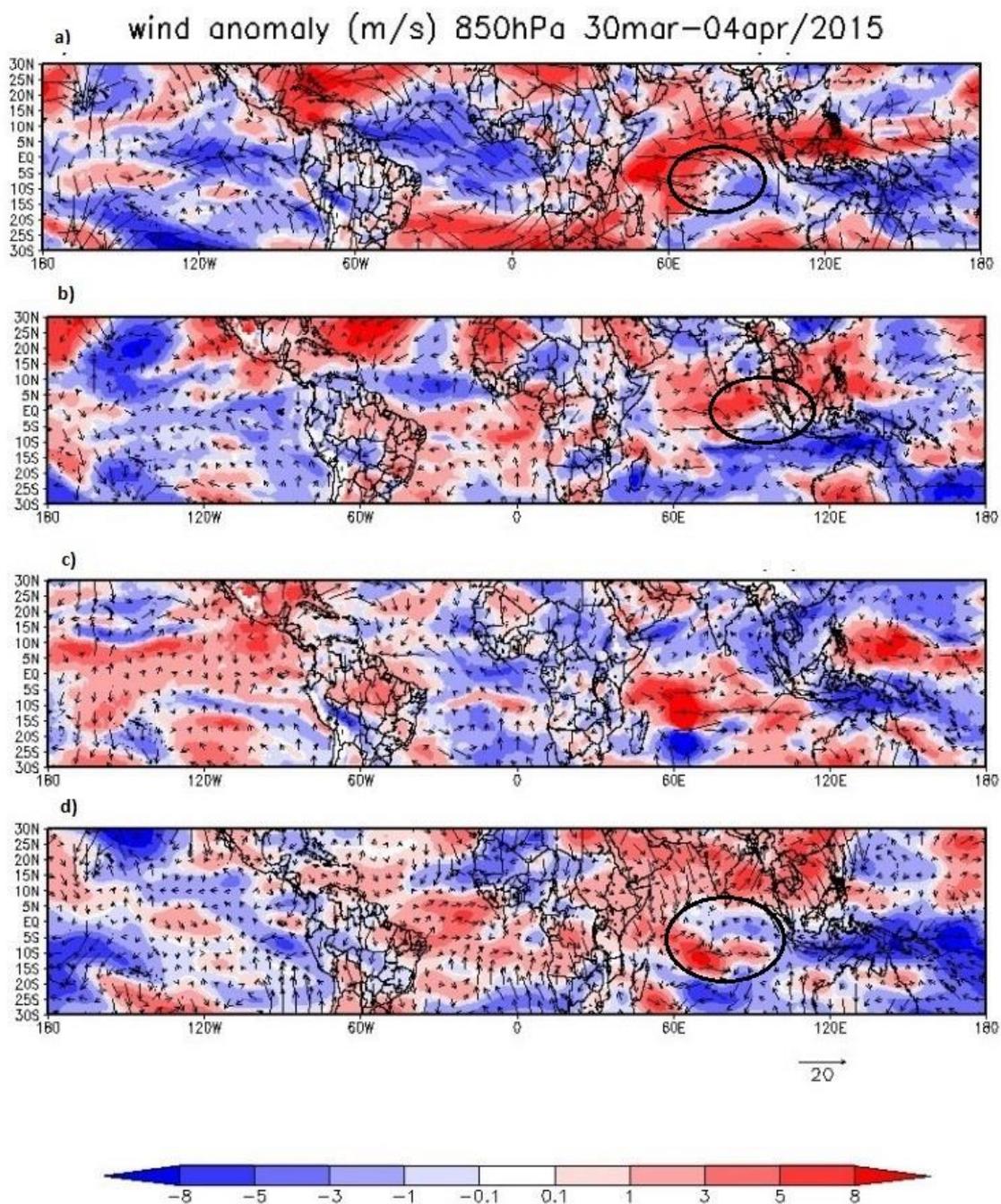
Figura 38- Anomalia do vento zonal a 850hPa para o Período 5; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.



4.9.6 Análise espacial da anomalia de ventos para o período de 30 de março a 4 de abril de 2015

No último período, a maior atividade da OMJ volta para o Oceano Índico tropical, com anomalias de ventos de oeste e leste nesta região (Figura 39d). Além disso, a convergência dos ventos sobre o oceano também pode ser observada nas duas primeiras simulações Figura 39a e b. Já na terceira simulação Figura 39c, predomina-se as anomalias de ventos de oeste na região.

Figura 39- Anomalia do vento zonal a 850hPa para o Período 6; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.

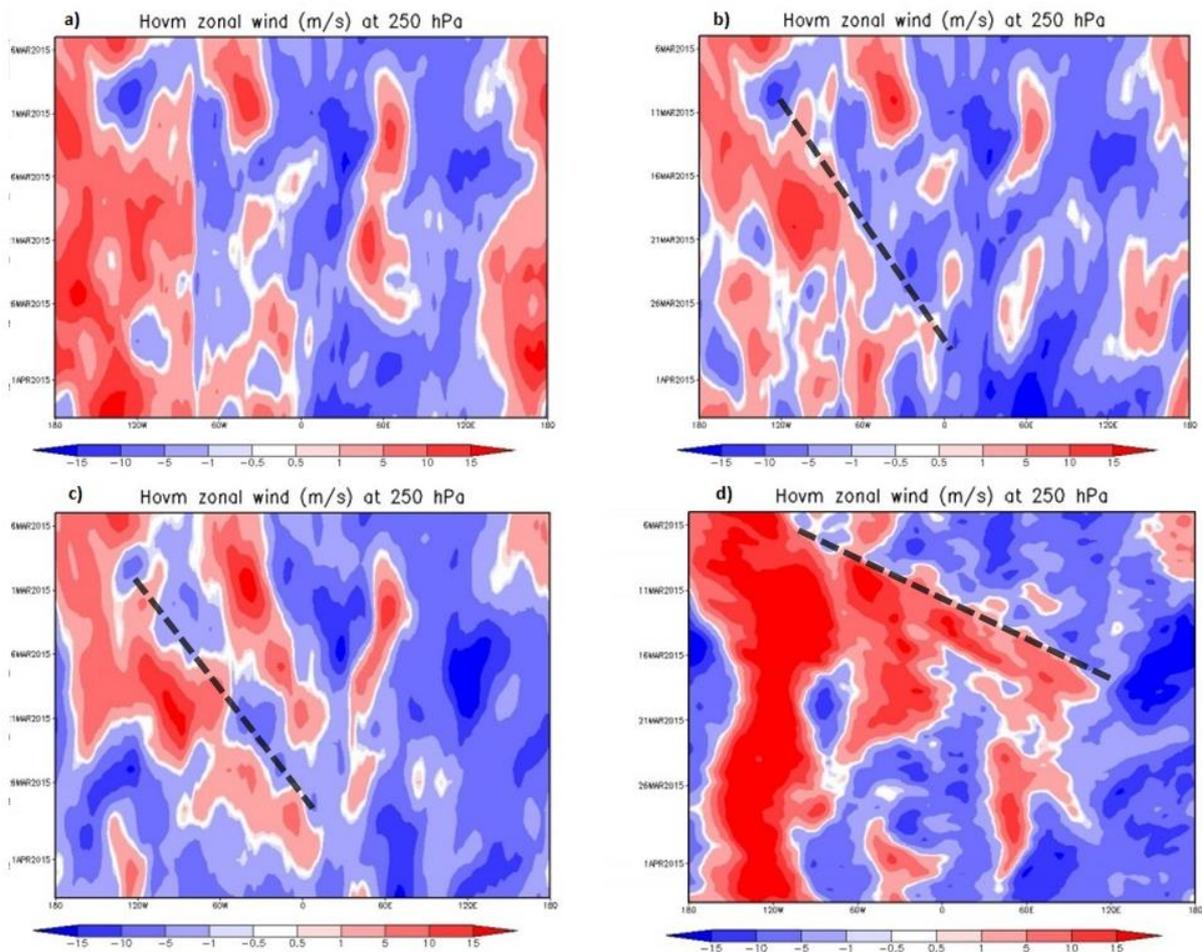


4.9.7 Análise diagrama *Hovmöller* para as três simulações

A análise do diagrama Hovmoller para o nível de 250 hPa mostra que há uma convergência de ventos em altos níveis da atmosfera se propagando para

leste conforme os dias passam nas três simulações. Porém, os resultados mostram que o tempo de chegada da oscilação nos altos níveis gerados pelo modelo é cerca de 20 dias após o período de maior atividade da OMJ no determinado local. Na Figura 40 as linhas tracejadas representam o centro do núcleo convectivo e sua propagação para leste ao longo do tempo. Conforme mostra a figura a simulação com a TSM climatológica é a única que a convergência aparece um pouco mais dispersa, já para as simulações utilizando a TSM atualizada o modelo representa melhor essa convergência e sua propagação para leste. No entanto, os resultados mostram que a taxa de propagação neste nível atmosférico ainda não é bem representada pelo modelo. Portanto, outros aspectos da modelagem deste evento deverão ser mais bem investigados no futuro.

Figura 40- Diagrama Hovmöller a 250hPa; a) com a TSM climatológica e parametrização Kain-Fritsch; b) com a TSM atualizada e parametrização Kain-Fritsch; c) TSM atualizada e parametrização Grell-Freitas; d) dados de reanálises do NCEP.



5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste presente estudo foi feita uma avaliação da previsibilidade do modelo OLAM com relação ao evento da OMJ ocorrido entre o início do mês de março de 2015 ao início do mês de abril do mesmo ano. A análise dos resultados mostra que, em geral, o modelo pode representar alguns dos principais eventos meteorológicos do período. Além disso, os resultados também mostram que a alteração do tipo de parametrização cumulus e a TSM possuem influencia de diferentes formas as variáveis vento e precipitação. As principais conclusões deste trabalho são:

- Para a precipitação média acumulada, durante o período todo analisado, a mudança da parametrização do tipo Kain-Fritsch para a parametrização Grell-Freitas mostra um aprimoramento dos resultados se comparados com os dados observados pelo satélite TRMM e GPM. Isso fica evidente através do cálculo dos coeficientes de correlação espacial para cada uma das três simulações com relação aos dados do satélite TRMM. Esse cenário também se faz presente se observarmos principalmente os mapas de anomalias de precipitação separadamente para cada período.
- As condições dinâmicas favoráveis para a formação de células convectivas estão presentes na simulação Grell-Freitas, mostrando que o cisalhamento em baixos níveis e a convergência de umidade contribuiu no bom desempenho da parametrização convectiva. Devido à sua melhor capacidade de representar processos convectivos em grades de múltipla resolução e também na capacidade de representação da interação de aerossóis com as nuvens esta parametrização convectiva mostrou melhor desempenho na previsão dos campos de precipitação do modelo.
- Com relação às regiões analisadas separadamente ao longo de todo o período, os resultados mostram de forma geral a região tropical foi a melhor representada, pois os valores de viés de precipitação não ultrapassaram 15 mm para esta região. Já a região NEB e Sul apresentam valores maiores de viés, sendo que o período de maior atividade da OMJ no NEB (Período 4) o modelo subestima os valores de precipitação.

- De forma geral, não eram esperados resultados satisfatórios para a região sul do Brasil a partir do terceiro período, uma vez que esta região é dominada por fenômenos transientes, como por exemplo, a propagação de Ondas de Rossby, que induzem a precipitação. Assim, a simulação dessas ondas em modelos globais é muito sensível ao tipo de parametrização convectiva empregada. Tipicamente nestes estudos a variabilidade tropical simulada aumenta com o aumento da precipitação resolvida à custa da precipitação parametrizada. (Bechtold et al., 2008)
- Nota-se também que para a região tropical a simulação da TSM atualizada e a parametrização Grell-Freitas sempre apresenta melhor desempenho, porém para região NEB e Sul não há esse padrão, podendo ocorrer menor viés em ambas as simulações com a TSM climatológica e semanal utilizando a parametrização do tipo Kain-Fritsch.
- Após alguns dias de previsão, o modelo não tem mais informações da condição atmosférica inicial, deste modo após esse período a TSM torna-se mais relevante para a simulação e isso justifica o fato do modelo ter conseguido prever a formação dos dois ciclones no Oceano Índico do final do período. Portanto, modelos acoplados de interação oceano-atmosfera deverão proporcionar melhor previsão nesta escala de previsão estendida.
- Com relação aos ventos, a análise feita dos mapas de anomalias de vento zonal no nível de 850hPa feitos pelo modelo evidencia a convergência dos ventos que ocorre durante a propagação da OMJ principalmente nas duas primeiras simulações utilizando a parametrização cumulus Kain-Fritsch.
- Já para os ventos em 250hPa o diagrama *Hovmöller* (Figura 40) mostra que o modelo consegue prever a propagação da convergência de ventos principalmente quando é considerada a correção TSM semanal, porém ocorre um atraso na propagação da OMJ se comparado com os dados de reanálise do NCEP.

Os resultados obtidos com esse trabalho com o modelo OLAM mostram que este pode ser usado para a previsão em geral dos principais eventos meteorológicos ocorridos durante a propagação da OMJ em escala global, sendo utilizado como ferramenta na previsão deste fenômeno e como instrumento de melhoria do

entendimento dos processos envolvidos na interação entre o oceano e a atmosfera. Além disso, para estudos futuros é sugerida a análise de outras variáveis como ROL, temperatura e velocidade potencial, bem como simulações com melhor resolução e que utilize modelos oceanos acoplados com o OLAM.

REFERÊNCIAS

ADCROFT, A.; C. HILL; J. MARSHALL. Representation of topography by shaved cells in a height coordinate ocean model. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 2293-2315, 1997.

ALVAREZ, M. S., -. C. S. Vera, -. G. N. Kiladis, -. B. Liebmann, C. S. Vera, G. N. Kiladis, and B. Liebmann, 2016: Influence of the Madden Julian Oscillation on precipitation and surface air temperature in South America.

AVISSAR, R.; R. PIELKE, A parameterization of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical-models and its impact on regional meteorology. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 2113-2136 1989.

BARBOSA, Augusto César Barros. *Oscilações Intrasazonais no Indo-Pacífico e na Zona de Convergência do Atlântico Sul: Estudo observacional e numérico*. 2012. 272 f. Tese (Doutorado em Ciências: área de Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

BECHTOLD, P., M. Köhler, T. Jung, F. J. Doblas-Reyes, M. Leutbecher, M. J. Rodwell, F. Vitart, and G. Balsamo, 2008: Advances in simulating.

CHEN, C.; W. COTTON. The physics of the marine stratocumulus-capped mixed layer. *J. Atmos. Sci.*, 44, 2951-2977, 1987.

CHING, L., C. Sui, M. Yang, and P. Lin, 2015: A modeling study on the effects of MJO and equatorial Rossby waves on tropical cyclone genesis over the western North Pacific in June 2004.

COTTON W.R.; PIELKE R.A. SR; WALKO R.L.; LISTON G.E.; TREMBACK, C.J.; JIANG H.; MCANELLY R.L.; HARRINGTON J.Y.; NICHOLLS M.E.; CARRIO G.G.; MCFADDEN L.P. RAMS: Current Status and future directions. *Meteorol. Atmos. Phys.* 82: 5–29, 2003.

DAEHYUN, K., XAVIER, P., MALONEY, E. et al. Process-Oriented MJO Simulation Diagnostic: Moisture Sensitivity of Simulated Convection. *Journ*

al of Climate. Nova Iorque, v. 27, p. 5379-5395, jul., 2014.

D'ALELIO, H. A. *Análise do desempenho do modelo OLAM na previsão numérica para o sul do Brasil*. 2015. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

EMANUEL, K. a. A Scheme for Representing Cumulus Convection in Large-Scale Models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 48, n. 21, p. 2313–2329, 1991.

GRELL, G. a. Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. *Monthly Weather Review*, v. 121, n. 3, p. 764–787, 1993. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493%281993%29121%3C0764%3APEOAUB%3E2.0.CO%3B2>> Acessado em 25 de maio de 2018.

GRELL, G.; FREITAS S. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics (ACP)*, v. 14, p. 5233-5250, 2014.

GRIMM, A. M. Impactos da Oscilação Madden-Julian na América do Sul e suas Teleconexões para a África. Grupo de Meteorologia - Universidade Federal do Paraná Departamento de Física–Curitiba–Paraná.

HALL, J. D.; MATTHEWS, A. J.; KAROLY, D. J. The modulation of tropical cyclone activity in the Australian region by the Madden-Julian Oscillation. *Monthly Weather Review*, v. 129, p. 2970-2982, 2001.

KAIN, J.; FRISCH, J. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *Meteorological Monographs*, v. 24, p. 165–170, 1993. Disponível em: < https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-1-935704-13-3_16.pdf> Acessado em 25 de maio de 2018.

KAIN, J. S. The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 43, p. 170–181, 2004. Disponível em: < <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520->

0450%282004%29043%3C0170%3ATKCPAU%3E2.0.CO%3B2> Acessado em 4 de junho de 2018.

KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J.; YANG, S.-K.; HNILO, J. J.; FIORINO, M.; POTTER, G. L. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, n. 11, p. 1631–1643, 1 nov. 2002. Disponível em: < <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-83-11-1631>> Acessado em 4 de junho de 2018.

KEMBALL-COOK, S. R.; WEARE, B. C. The onset of convection in the Madden-Julian oscillation. *Journal of Climate*, v. 14, p. 780-793, 2001.

KUO, H. L. Further Studies of the Parameterization of the Influence of Cumulus Convection on Large-Scale Flow. *J. Atmos. Sci.*, v. 31, n. 5, p. 1232–1240, 1974. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0469%281974%29031%3C1232%3AFSOTPO%3E2.0.CO%3B2>> Acessado em 25 de maio de 2018.

LIEBMANN, B.; HENDON, H. H.; GLICK, J. D. The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian oceans and the Madden-Julian Oscillation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 72, p. 401-411, 1994.

MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 28, p. 702-708, 1971.

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

MARSHALL, J.; ADCROFT, A.; HILL, C.; PERELMAN, L.; HEISEY, C. A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *Journal of Geophysical Research*, v. 102, n. C3, p. 5753, 1997.

Matthews, A. J., 2012: A multiscale framework for the origin and variability of the South Pacific Convergence Zone. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 138, 1165–1178, doi:10:1002/qj.1870

MELLOR, G. L.; T. YAMADA. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1791-1806, 1974.

MESINGER, F.; Z. JANJIC; S. NICKOVIC; D. GAVRILOV; D.G. DEAVEN. The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 1493-1520, 1988.

MEYERS, M. P.; R. L. WALKO; J. Y. HARRINGTON; W. R. COTTON. New RAMS cloud microphysics parameterization .2. The two-moment scheme. *Atmos. Res.*, 45, 3-39, 1997.

NASA. *Global Precipitation Measurement Mission*. Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/overview/index.html> Acessado em 30 de agosto de 2018.

PASSOW, M. J. TRMM — Tropical Rainfall Measuring Mission: Bringing remote sensing of precipitation into your classroom. *Terraedidática*, v. 6, n 1, p. 3 - 8, 2010. Disponível em: <https://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v6_1/pdf-v6_1/TD_vi_a1-s-link-prss-quality.pdf> Acessado em 4 de junho de 2018.

PIELKE, R. A. e CO-AUTORES. A comprehensive meteorological modeling system – RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49: 69–91, 1992.

RAMOS DA SILVA, R., P. SILVA-DIAS, D. S. MOREIRA, AND E. B. SOUZA, 2009: Modelo OLAM (Ocean-Land-Atmosphere-Model): Descrição, Aplicações, e Perspectivas. *Rev. Bras. Meteorol.*, 24, 144–157.

REYNOLDS, R. W.; RAYNER, N. A.; SMITH, T. M.; STOKES, D. C.; WANG, W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, v. 15, n. 13, p. 1609–1625, 2002

SADOURNY, R.; ARAKAWA, A.; MINTZ, Y. Integration of the nondivergent barotropic vorticity equation with an icosahedral-hexagonal grid for the sphere. *Monthly Weather Review*, v. 96, n. 6, p. 351–356, 1968. Disponível em: <<ftp://ftp.library.noaa.gov/docs.lib/htdocs/rescue/mwr/096/mwr-096-06-0351.pdf>> Acessado em 23 de maio de 2018.

SAMPAIO, G.; SILVA DIAS, P. L. Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima. *Revista USP*, São Paulo, n. 103, p. 41-54, 2014.

SIMPSON, J.; KUMMEROW, C.; TAO, W.-K.; ADLER, R. F. On the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 60, n. 1-3, p. 19–36, 1996.

TREMBACK, C. J. Numerical simulation of a mesoscale convective complex: model development and numerical results. PhD. Dissertation, Atmos. Sci. Paper 465, Colorado State University, Dept. of Atmospheric Sciences, Fort Collins, CO, 1990

VALADÃO, C. E. A., P. S. Lucio, R. R. Chaves, L. M. V Carvalho, and C. E. A. Valadão, 2015: MJO Modulation of Station Rainfall in the Semiarid Seridó, Northeast Brazil Madden-Julian Oscillation, Intraseasonal, Raingauge.

WALKO, R. L.; W. R. COTTON; M. P. MEYERS; J. Y. HARRINGTON. New RAMS cloud microphysics parameterization .1. The single-moment scheme. *Atmos. Res.*, 38, 29-62, 1995. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809597000185>> Acessado em 25 de maio de 2018.

WALKO, R. L.; AVISSAR, R. Predicting hurricane landfall location and timing with the Ocean-Land-Atmosphere Model (OLAM). *Geophysical Research Abstracts*, v. 8 (04344), 2006.

WALKO, R. L.; COAUTHORS, 2000: Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. *J. Appl. Meteor.*, 39, 931-944.

WENNEKER, I.; A. SEGAL; P. WESSELING. A Mach-uniform unstructured staggered grid method. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 40, 1209-1235, DOI: 10.1002/flid.417, 2002.

WHEELER, M. HENDON, H. An all-season real-time multivariate MJO index: development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 1917-1932, 2004.

WOOLNOUGH, S. J.; SLINGO, J. M.; HOSKINS, B. J. The relationship between convection and sea surface temperature on intraseasonal timescales. *Journal of Climate*, v. 13, p. 2086-2104, 2000.