UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

ELAINE ROSÂNGELA LEUTWILER DI GIACOMO SILVA

OSCILAÇÃO DE MADDEN-JULIAN: DADOS OBSERVADOS
E SIMULADOS PELO MODELO REGCM4

(Versão corrigida)

São Paulo, 2018

Elaine Rosângela Leutwiler Di Giacomo Silva

**Oscilação de Madden-Julian: Dados observados e simulados pelo
modelo RegCM4**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia Física da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria Elisa Siqueira Silva.

De acordo

Prof^ª. Dr^ª. Maria Elisa Siqueira Silva

São Paulo, 2018

Versão Corrigida

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

S586 Silva, Elaine Rosângela Leutwiler Di Giacomo
Oscilação de Madden-Julian: Dados observados e simulados pelo modelo RegCM4 / Elaine Rosângela Leutwiler Di Giacomo Silva ; orientadora Maria Elisa Siqueira Silva. - São Paulo, 2018.
117 f.

Tese (Doutorado)- Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.
Departamento de Geografia. Área de concentração: Geografia Física.

1. Oscilação de Madden-Julian. 2. Modelos Climáticos . 3. RegCM4. 4. Climatologia dos Trópicos. 5. Modelos de simulação climática. I. Silva, Maria Elisa Siqueira, orient. II. Título.

SILVA, E. R. L. DI G. **Oscilação de Madden-Julian: Dados observados e simulados pelo modelo RegCM4.** Tese apresentada à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Doutora em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Profa. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dedico este trabalho à minha filha Larissa: Cheia de alegria!

Agradeço a Deus...
A ELE toda a honra e glória! A minha
família, amigos de uma vida inteira. Amo a
todos imensamente!

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Representação esquemática das variações no tempo e espaço (plano zonal) do distúrbio relacionado com a oscilação de 40-50 dias. As datas são indicadas simbolicamente pelas letras à esquerda de cada esquema e correspondem às datas associadas à oscilação nas estações de pressão em Canton. A letra A refere-se ao momento em que a baixa pressão está em Canton e a letra E, a alta pressão nesta localidade. As outras letras representam tempos intermediários. A perturbação média no campo de pressão é traçada na parte inferior de cada gráfico com anomalias negativas sombreadas. As células de circulação são baseadas na média dos distúrbios do vento zonal. Regiões com aumento da convecção em larga escala são indicadas esquematicamente pelas nuvens *Cumulus* e *Cumulonimbus*. A altura relativa da tropopausa é indicada no topo de cada gráfico (obtido de Madden e Julian 1972)..... 24
- Figura 2:** Regiões e impactos da OMJ durante o inverno boreal e sua influência, no que diz respeito às condições de tempo no período de duas semanas..... 26
- Figura 3:** Regiões e impactos da OMJ durante o verão boreal e sua influência, no que diz respeito às condições de tempo no período de duas semanas..... 27
- Figura 4** Mapas de contorno do número total de ocorrências de complexos de nuvens que se movem (a) estritamente para leste; (b) complexos para leste com ramos que se dividem tanto para o norte quanto para o sul, ao longo do Oceano Índico Leste; (c) complexos conectados com sistemas de nuvens que se movem para norte, em direção ao sul da Ásia. (Adaptado de Wang e Rui, 1990, p. 51). 30
- Figura 5:** Anomalias de precipitação pênadal sobre o Brasil tropical centradas nos dias -30, -25, -20, -15, -10, -5, 0, +5, +10 e +15. Os contornos sólidos (pontilhados) referem-se a anomalias positivas (negativas). As áreas sombreadas indicam anomalias estatisticamente significativas, ao nível de 95% de confiança. (Adaptado de Souza e Ambrizzi, 2006). .. 34
- Figura 6** Coordenadas geográficas das áreas selecionadas para comparação dos dados mensais de anomalia e anomalia filtrada com passa-banda 30-60 dias, para os dados de ROL e Precipitação do ERA-Interim e RegCM4. 42
- Figura 7:** Filtro passa-banda e respectiva resposta do filtro ideal, sendo que $f_{ca} < f_{cb} < 0,5$. Disponível em <https://www.ncl.ucar.edu/Document/Functions/Built-in/filwgt_lanczos.shtml>. Acessado em 20/10/2017. 46
- Figura 8** Diferença média entre a precipitação simulada (RegCM4) e a observada (GPCP), de 2005 a 2009, para as estações (a) MAI-OUT e (b) NOV-ABR. 54

Figura 9: Diferença média entre a precipitação simulada (RegCM4) e a observada (Era-Interim), de 2005 a 2009, para as estações (a) MAI-OUT e (b) NOV-ABR.....	55
Figura 10: Correlação linear entre a precipitação simulada (RegCM4) e observada (GPCP), para dados nas escalas (a) mensal e (b) diária, entre 2005 e 2009 (mm/dia).	57
Figura 11: Anomalia de precipitação simulada (RegCM4), para dados na escala mensal entre 2005 e 2009.	58
Figura 12: Anomalia de precipitação observada (GPCP), para dados na escala mensal entre 2005 e 2009.	59
Figura 13: Diferença média entre a precipitação simulada (RegCM4) e a observada (GPCP), de 2005 a 2009.....	60
Figura 14: Média mensal, para a área AFR, dos dados de ROL e ROL filtrada para 30-60 dias, simulada (RegCM4) e observada (Era-Interim), de 2005 a 2009.....	61
Figura 15: Média mensal, para a área AFR, dos dados de precipitação e precipitação filtrada para 30-60 dias, simulada (RegCM4) e observada (Era-Interim), de 2005 a 2009.....	62
Figura 16: Média mensal, para a área IND, dos dados de ROL e ROL filtrada para 30-60 dias, simulada (RegCM4) e observada (Era-Interim), de 2005 a 2009.....	63
Figura 17: Média mensal, para a área IND, dos dados de precipitação e precipitação filtrada para 30-60 dias, simulada (RegCM4) e observada (Era-Interim), de 2005 a 2009.....	64
Figura 18: Média mensal, para a área NAS, dos dados de ROL e ROL filtrada para 30-60 dias, simulada (RegCM4) e observada (Era-Interim), de 2005 a 2009.....	65
Figura 19: Média mensal, para a área NAS, dos dados de precipitação e precipitação filtrada para 30-60 dias, simulada (RegCM4) e observada (Era-Interim), de 2005 a 2009.....	66
Figura 20: Média mensal, para a área NEB, dos dados de ROL e ROL filtrada para 30-60 dias, simulada (RegCM4) e observada (Era-Interim), de 2005 a 2009.....	67
Figura 21: Média mensal, para a área NEB, dos dados de precipitação e precipitação filtrada para 30-60 dias, simulada (RegCM4) e observada (Era-Interim), de 2005 a 2009.....	68
Figura 22: Média mensal, para a área SEB, dos dados de ROL e ROL filtrada para 30-60 dias, simulada (RegCM4) e observada (Era-Interim), de 2005 a 2009.....	69
Figura 23: Média mensal, para a área SEB, dos dados de precipitação e precipitação filtrada para 30-60 dias, simulada (RegCM4) e observada (Era-Interim), de 2005 a 2009.....	70
Figura 24: Média da ROL ($W m^{-2}$) do ERA Interim para os meses de janeiro a dezembro de 2005 a 2009.	75
Figura 25: Média da ROL ($W m^{-2}$) simulada pelo modelo RegCM4 para os meses de janeiro a dezembro, de 2005 a 2009.....	75

Figura 26: Precipitação média mensal (mm dia^{-1}) do ERA Interim para os meses de janeiro a dezembro dos anos de 2005 a 2009.	77
Figura 27: Precipitação média mensal (mm dia^{-1}) simulada pelo modelo RegCM4, de 2005 a 2009.	78
Figura 28: Diferença entre as médias sazonais dos dados de ROL, sendo anomalia (a) e anomalia filtrada com passa-banda 30-60 dias (b) para os meses de janeiro a dezembro dos anos de 2005 a 2009.	80
Figura 29: Diferença média da anomalia filtrada de ROL, com passa-banda 30-60 dias, para os meses de JJA, para o período de 2005 a 2009.	80
Figura 30: Diferença entre as médias sazonais dos dados de precipitação, sendo anomalia (a) e anomalia filtrada com passa-banda 30-60 dias (b) para os meses de janeiro a dezembro dos anos de 2005 a 2009.	81
Figura 31: Diferença entre as médias sazonais, dos dados de precipitação, da anomalia filtrada com passa-banda 30-60 dias, para os meses de JJA dos anos de 2005 a 2009.	81
Figura 32: Diferença entre as médias anuais dos dados de ROL, sendo anomalia (a) e anomalia filtrada com passa-banda 30-60 dias (b) para os meses de janeiro a dezembro dos anos de 2005 a 2009.	82
Figura 33: Diferença entre as médias anuais dos dados de precipitação, sendo anomalia (a) e anomalia filtrada com passa-banda 30-60 dias (b) para os meses de janeiro a dezembro dos anos de 2005 a 2009.	82
Figura 34: Evolução temporal do índice da OMJ (<i>Real-Time Mutivariate MJO Index</i>), entre janeiro de 2005 e dezembro de 2009 para os produtos da ERA Interim (a) e do RegCM4 (b). A linha preta indica o índice diário e a linha azul, a média móvel do índice, com janela de 91 dias.	84
Figura 35: Estrutura espacial da primeira componente de EOF aplicada aos dados diários de OLR, componente zonal do vento em 200 e 850 hPa, para o período de 01 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2009, para os dados da ERA Interim e do RegCM4.	85
Figura 36: Estrutura espacial da segunda componente de EOF aplicada aos dados diários de OLR, componente zonal do vento em 200 e 850 hPa, para o período de 01 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2009, para os dados da ERA Interim e do RegCM4.	87
Figura 37: Diagramas de fase para o período de 01/05/2005 a 31/10/2005 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da	

OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados..... 88

Figura 38: Diagramas de fase para o período de 01/11/2005 a 30/04/2006 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados..... 89

Figura 39: Diagramas de fase para o período de 01/05/2006 a 31/10/2006 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados..... 90

Figura 40: Diagramas de fase para o período de 01/11/2006 a 30/04/2007 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados..... 91

Figura 41: Diagramas de fase para o período de 01/05/2007 a 31/10/2007 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados..... 92

Figura 42: Diagramas de fase para o período de 01/05/2007 a 31/10/2007 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados..... 93

- Figura 43:** Diagramas de fase para o período de 01/05/2008 a 31/10/2008 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados. 94
- Figura 44:** Diagramas de fase para o período de 01/11/2008 a 30/04/2009 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados. 95
- Figura 45:** Diagramas de fase para o período de 01/05/2009 a 30/09/2009 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados. 96
- Figura 46:** Composições de ciclo de vida da OMJ entre os meses de maio a outubro dos anos de 2005 a 2006, utilizando-se o filtro passa-banda de 30-60 dias entre a anomalia de ROL diária (cores) e anomalias de vento (u) e (v) em 850 mb (vetores) do ERA Interim (figuras à direita) e do RegCM4 (figuras à esquerda). O vetor de referência (ms^{-1}) é mostrado na parte inferior à direita. O número de dias usados para gerar a composição em cada fase é mostrado no lado direito de cada painel bem como a fase, por exemplo, P1:15 refere-se à Fase 1 composta por 15 dias. 99
- Figura 47:** Composições de ciclo de vida da OMJ entre os meses de novembro a abril dos anos de 2005 a 2006, utilizando-se o filtro passa-banda de 30-60 dias entre a anomalia de ROL diária (cores) e anomalias de vento (u) e (v) em 850 mb (vetores) do ERA Interim (figuras à direita) e do RegCM4 (figuras à esquerda). O vetor de referência (ms^{-1}) é mostrado na parte inferior à direita. O número de dias usados para gerar a composição em cada fase é mostrado no lado direito de cada painel bem como a fase, por exemplo, P1:15 refere-se à Fase 1 composta por 15 dias. 100

- Figura 48:** Composições de ciclo de vida da OMJ entre os meses de maio a outubro dos anos de 2007 a 2008, utilizando-se o filtro passa-banda de 30-60 dias entre a anomalia de ROL diária (cores) e anomalias de vento (u) e (v) em 850 mb (vetores) do ERA Interim (figuras à direita) e do RegCM4 (figuras à esquerda). O vetor de referência (ms^{-1}) é mostrado na parte inferior à direita. O número de dias usados para gerar a composição em cada fase é mostrado no lado direito de cada painel bem como a fase, por exemplo, P1:15 refere-se à Fase 1 composta por 15 dias..... 101
- Figura 49:** Composições de ciclo de vida da OMJ entre os meses de novembro a abril dos anos de 2007 a 2008, utilizando-se o filtro passa-banda de 30-60 dias entre a anomalia de ROL diária (cores) e anomalias de vento (u) e (v) em 850 mb (vetores) do ERA Interim (figuras à direita) e do RegCM4 (figuras à esquerda). O vetor de referência (ms^{-1}) é mostrado na parte inferior à direita. O número de dias usados para gerar a composição em cada fase é mostrado no lado direito de cada painel bem como a fase, por exemplo, P1:15 refere-se à Fase 1 composta por 15 dias..... 102
- Figura 50:** Composições de ciclo de vida da OMJ entre os meses de maio a outubro dos anos de 2008 a 2009, utilizando-se o filtro passa-banda de 30-60 dias entre a anomalia de ROL diária (cores) e anomalias de vento (u) e (v) em 850 mb (vetores) do ERA Interim (figuras à direita) e do RegCM4 (figuras à esquerda). O vetor de referência (ms^{-1}) é mostrado na parte inferior à direita. O número de dias usados para gerar a composição em cada fase é mostrado no lado direito de cada painel bem como a fase, por exemplo, P1:15 refere-se à Fase 1 composta por 15 dias..... 103
- Figura 51:** Composições de ciclo de vida da OMJ entre os meses de novembro a abril dos anos de 2008 a 2009, utilizando-se o filtro passa-banda de 30-60 dias entre a anomalia de ROL diária (cores) e anomalias de vento (u) e (v) em 850 mb (vetores) do ERA Interim (figuras à direita) e do RegCM4 (figuras à esquerda). O vetor de referência (ms^{-1}) é mostrado na parte inferior à direita. O número de dias usados para gerar a composição em cada fase é mostrado no lado direito de cada painel bem como a fase, por exemplo, P1:15 refere-se à Fase 1 composta por 15 dias..... 104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Evolução espaço-temporal dos distúrbios associados à OMJ	23
Tabela 2: Coordenadas geográficas das áreas pré-selecionadas para comparação entre os valores simulados (RegCM4) e observados (Era Interim e GPCP) das variáveis filtradas e não filtradas de ROL e precipitação.	42
Tabela 3: Critérios para a determinação do número de pesos do filtro de Lanczos	46
Tabela 4: Subperíodos utilizados para a confecção dos diagramas de fase para o período de 2005 a 2009.	49
Tabela 5: Valores dos episódios ENOS de acordo com o <i>Oceanic Niño Index</i> (ONI).	50
Tabela 6: Classificação dos episódios da OMJ baseada nos diagramas de fase. A cor azul (verde) indica fase menos (mais) ativa. As indicações +NEG e + POS referem-se à predominância de anomalias negativas e positivas no Oceano Pacífico respectivamente, durante o subperíodo analisado.	51
Tabela 7: Quadro resumo com as correlações e o R^2 entre a ROL do ERA-Interim e RegCM4, (anomalia e anomalia filtrada).	71
Tabela 8: Quadro resumo com as correlações entre a precipitação do ERA-Interim e do RegCM4, (anomalia e anomalia filtrada).	71

LISTA DE ABREVIATURAS

AFR	África
CDO	<i>Climate Data Operators</i>
CP	Componentes Principais
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENOS	<i>El Niño Oscilação Sul</i>
EOF	<i>Empirical Ortogonal Function</i>
GPCP	<i>Global Precipitation Climatology Project</i>
GrADS	<i>Grid Analysis and Display System</i>
IND	Indonésia
ICTP	<i>International Centre for Theoretical Physics</i>
NAS	Norte da América do Sul
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCL	<i>NCAR Command Language</i>
NEB	Nordeste da América do Sul
NMC	<i>National Meteorological Center</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administrarion</i>
OMJ	Oscilação de Madden-Julian
PC1	Primeira componente Principal
PC2	Segunda Componente Principal
PNM	Pressão ao Nível Médio do Mar
RegCM4	<i>Regional Climate Model</i> versão 4
ROL	Radiação de Onda Longa
SEB	Sudeste brasileiro
TICA	<i>Tropical Intraseasonal Convection Anomalies</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCPS	Zona de Convergência do Pacífico Sul

RESUMO

SILVA, E.R.L.D.G. **Oscilação de Madden e Julian: Dados observados e simulados pelo modelo RegCM4.** Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo 2017.

O presente trabalho propõe avaliar a habilidade do Modelo Regional Climático, versão 4, (RegCM4) em simular a variabilidade temporal e espacial do sinal associado à propagação da Oscilação de Madden-Julian (OMJ) nos trópicos. A avaliação foi feita através da comparação dos dados observados obtidos do conjunto da Reanálise do ERA-Interim e dos dados simulados pelo RegCM4, para o período de 2005 a 2009. Foram utilizados dados globais diários de precipitação, Radiação de Onda Longa Emergente e componentes zonal do vento em 850 e 200 hPa, provenientes da Reanálise do ERA-Interim, tanto na simulação, quanto nos dados observados. Como condição inicial do modelo, optou-se pela utilização da banda tropical, cujo principal aspecto é o de simular características tanto da circulação quanto dos padrões de precipitação tropicais. Para a validação do modelo, foi utilizada a precipitação diária do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP). Todos os dados foram filtrados na escala de 30-60 dias a fim de se observar o sinal referente à OMJ. A análise dos padrões globais de precipitação e Radiação de Onda Longa (ROL), após filtragem, permitiu a seleção de cinco áreas, com sinais associados à OMJ, sendo elas: África (AFR), Indonésia (IND), Norte da América do Sul (NAS), Nordeste brasileiro (NEB) e Sudeste brasileiro (SEB). A área NEB, apresentou valores de correlação linear de 0,63 e 0,32 para a anomalia e anomalia de ROL filtrada, respectivamente. Já a área SEB, apresentou valores de correlação linear de 0,30 e 0,54, para a anomalia e anomalia de ROL filtrada. O BIAS calculado entre o modelo e a precipitação do GPCP, para as estações secas (MAI-OUT) e chuvosas (NOV-ABR) mostrou que para a América do Sul, Sul do continente Africano e Índico, o modelo superestima os valores de precipitação do GPCP nas duas estações do ano. Quanto à análise multivariada entre a ROL, vento zonal em 850 e 200 hPa a comparação com o obtido para os dados do Era-Interim, a *Empirical Orthogonal Function* (EOF1) aplicada aos dados do RegCM4 apresenta convecção e inibição da convecção em áreas distintas da faixa longitudinal entre 15° N e 15° S. Enquanto os valores mínimos de EOF1 para ROL (intensificação da convecção) do Era-Interim são observados próximo a 90° L, os valores mínimos de ROL para os dados do RegCM4 são observados próximos à 120° O, com defasagem longitudinal de 30°. L, enquanto os valores máximos da EOF1 para ROL (inibição de convecção) do Era-Interim são observados próximo a 150° L, os valores máximos para os dados

simulados pelo RegCM4 são observados próximos à 60° L, com uma defasagem longitudinal de 90° .

Palavras-chave: Oscilação de Madden-Julian, RegCM4, T-Band, Variabilidade Intrassazonal, Oscilação 30-60 dias

ABSTRACT

SILVA, E.R.L.D.G. Madden-Julian Oscillation: Observed and simulated data using the RegCM4 model. Thesis (Doctoral). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, 2017.

The present work proposes to evaluate the ability of the Regional Climatic Model (RegCM4) to simulate the temporal and spatial variability of the signal associated with the propagation of the Madden-Julian Oscillation in the tropics. The evaluation was done by comparing the observed data obtained from the Reanalysis of the ERA-Interim and the data simulated by RegCM4, for the period from 2005 to 2009. Daily global data were used for precipitation, Emergent Long Wave Radiation and zonal wind components at 850 and 200 hPa from the ERA-Interim Reanalysis, both in the simulation and in the observed data. As initial conditions of the model, we chose to use the tropical band, whose main characteristic is to simulate the circulation and the tropical precipitation patterns. The validation of the model was performed with the daily precipitation of the Global Precipitation Climatology Project (GPCP). All data were filtered in the 30-60 day scale in order to observe the signal concerning the MJO. The analysis of the global precipitation and Outgoing Longwave Radiation (OLR) patterns, after filtration, allowed the selection of five areas, with signs associated to the MJO, being: Africa (AFR), Indonesia (IND), North of South America (NAS), Northeast Brazil (NEB) e Southeast Brazil (SEB). The NEB area presented linear correlation values of 0,63 and 0,32 for the anomaly and filtered anomaly of OLR, respectively. The SEB area presented linear correlation values of 0.30 and 0.54 for the anomaly and anomaly of filtered OLR. The BIAS calculated between the model and GPCP precipitation for the dry (MAY-OCT) and rainy seasons (NOV-APR) showed that for South America, South Africa and Indian continent, the model overestimates precipitation values of GPCP in the two seasons. The multivariate analysis between OLR, zonal wind at 850 and 200 hp compared to that obtained for Era-Interim data, the EOF1 applied to RegCM4 data presents convection and convection inhibition in different areas between 15° N and 15° S. While the minimum Empirical Orthogonal Function (EOF1) values for OLR (convection enhancement) of the Era-Interim are observed close to 90° E, the minimum OLR values for the RegCM4 data are observed close to 120° O, with a longitudinal lag of 30°. And while maximum EOF1 values for OLR (convection inhibition) of the ERA-

Interim are observed close to 150° E, the maximum values for the simulated data by RegCM4 are observed close to 60° E, with a longitudinal lag of 90°.

Key words: Madden-Julian Oscillation, RegCM4, T-Band, Intraseasonal Variability, 30-60 Day-Oscillation

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1 A Oscilação de Madden-Julian.....	21
2.2 Modelo Climático Regional – RegCM4.....	35
3. MÉTODO	37
3.1 Dados de entrada do modelo RegCM4.....	38
3.2 Processamento de dados	39
4. RESULTADOS	52
4.1 Comparação entre os conjuntos de dados simulados (RegCM4) e observados (GPCP e Era-Interim)	53
4.2 Campos médios dos dados do ERA Interim e RegCM4	72
4.3 Diferença entre os dados do RegCM4 e os da ERA-Interim.....	79
4.4 Evolução temporal e espacial da OMJ	83
5. CONCLUSÃO.....	106
6. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	108

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Desde o início do século XX, a comunidade científica tem registrado a observação de oscilações atmosféricas e oceânicas relacionadas ao comportamento climático em áreas remotas com influências nas escalas intrassazonal (MADDEN e JULIAN, 1971; 1972 e WEICKMANN et al., 1985), interanual (WALKER, 1924, BJERKNES, 1969; MCPHADEN, 2002 e TRENBERTH, 1997) e decadal (MANTUA et al. 1997; BIOND et al., 2001 e HURRELL, 1995).

A descoberta de uma oscilação tropical na escala intrassazonal, daqui por diante referida como Oscilação de Madden-Julian, foi o resultado da convergência de alguns fatores, tais como o interesse pela investigação do tempo e clima nos trópicos, iniciado na década de 1960, a maior disponibilidade de dados para a região tropical do globo, o aumento da eficiência computacional e a utilização da análise espectral (Madden e Julian, 2012).

Na escala intrassazonal, a Oscilação de Madden-Julian (OMJ) desempenha um papel fundamental na modulação da precipitação nos trópicos e subtropicais (KAYANO et al., 2009).

Ela interage e influencia um grande conjunto de fenômenos relativos ao tempo e ao clima, tais como, as monções, o *El Niño* Oscilação Sul, as tempestades tropicais e o tempo nas latitudes médias (VALISER, 2008).

A OMJ ocorre naturalmente no sistema climático, sendo caracterizada pela propagação para leste de anomalias convectivas com origem no oceano Índico deslocando-se em direção ao Pacífico Oeste. Além disso, as observações mostram que diversas localidades nos trópicos passam por um ciclo de aumento com posterior supressão da convecção na escala intrassazonal (MADDEN e JULIAN, 1972).

Foi detectada e documentada nos trabalhos de Madden e Julian (1971 e 1972) através da aplicação de análise espectral em dados diários de radiossondagem que começavam a ser disponibilizados pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), para as estações da ilha de Canton (172°W; 3°S). Através destes dados observou-se oscilações com períodos de 40 a 50 dias com fortes associações entre a pressão em superfície, vento zonal e temperatura em diversos níveis atmosféricos.

A distribuição e a intensidade da precipitação, na escala temporal em que atua a OMJ, afeta principalmente as regiões que possuem estações chuvosas curtas, tais como o nordeste do Brasil, o sudeste da África e o nordeste da Austrália (KAYANO e KOUSKY, 1999).

Embora inúmeros estudos (CARVALHO et al., 2003; SOUZA e AMBRIZZI, 2006) indiquem que várias regiões do globo têm sua atividade convectiva alterada em função da passagem da OMJ, até o presente momento, os modelos atmosféricos usados para a simulação e previsão climática não foram capazes de reproduzir satisfatoriamente a propagação dos eventos da OMJ.

O objetivo desta pesquisa é avaliar a habilidade do Modelo Regional Climático RegCM4 (Giorgi et al. 2012) em simular a variabilidade temporal e espacial do sinal associado à propagação da Oscilação de Madden-Julian nos trópicos, em especial na América do Sul. A avaliação será feita através da comparação de dados observados e dados simulados pelo modelo regional para o período de 2005 a 2009.

CAPITULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1A Oscilação de Madden-Julian

Madden e Julian (1971 e 1972), através da aplicação de análises espectrais às variáveis pressão ao nível médio do mar (PNM) e componente zonal do vento em 850 hPa e 150 hPa, em dados de estações localizadas da ilha de Canton, no Pacífico tropical oeste, detectaram a existência de oscilações com períodos de 40 a 50 dias, cuja estrutura demonstrou a existência de fortes picos no espectro de variância do vento zonal em baixos níveis, valores fracos ou não existentes entre 700 e 400 hPa, voltando a ser fortes em altos níveis atmosféricos.

Além da análise espectral aplicada aos dados da estação de Canton, os autores procederam com a observação dos registros de vento de outras estações tropicais, com o intuito não somente de estabelecer a extensão geográfica do fenômeno, mas também de eliminarem possíveis erros estatísticos causados durante o processamento dos dados observados em Canton.

As estações selecionadas foram Kwajalein (168°L; 9°N), com sete anos de registros diários disponíveis, Singapura (104°L; 1°N), com sete anos e meio de dados diários e Balboa, localizada na zona do Canal do Panamá (79°O; 9°N), com cerca de três anos de registros.

O exame dos espectros de potência destas estações revelou que apenas a estação de Kwajalein, indicou claramente, oscilação semelhante à encontrada na ilha de Canton. Em dois períodos de três anos (novembro de 1958 a maio 1962 e março de 1954 a setembro de 1957) a estação Kwajalein apresentou os maiores valores negativos para a componente zonal do vento em 850 e 200mb, para a faixa espectral entre 41 e 53 dias (MADDEN e JULIAN, 1971).

No trabalho de 1971, os autores propuseram que a oscilação encontrada nas localidades anteriormente mencionadas, consistia em uma grande célula de circulação zonal (MADDEN e JULIAN, 1971), com milhares de quilômetros, confinada nas proximidades da linha do Equador. Particularmente no capítulo referente à discussão da oscilação, os autores levantaram hipóteses no que se refere à existência ou não da oscilação intrassazonal, já que os resultados apontavam para uma descoberta totalmente nova na literatura.

As técnicas espectrais utilizadas por Madden e Julian (1971) indicaram que a componente meridional do vento não estava envolvida na oscilação detectada e que os resultados obtidos através da análise espectral poderiam estar ligados não a algo novo, mas sim, às propriedades da onda atmosférica de Kelvin (HOLTON e LINDZEN, 1968).

Contudo, foi observado que a oscilação estudada não se propagava na direção vertical, e que a teoria linear utilizada como base para a descrição da onda de Kelvin atmosférica prevê sua propagação na direção vertical, levando os autores a concluir que a oscilação encontrada não poderia ser a onda de Kelvin atmosférica (MADDEN e JULIAN, 1971).

Em 1972, Madden e Julian publicam um novo artigo cujo objetivo central era a descrição das células de circulação global nos trópicos, na escala temporal de 40-50 dias. Deste estudo resultou um esquema ilustrativo da variação temporal e espacial (variação longitudinal e vertical) dos distúrbios associados à OMJ, tal como proposto pelos autores na Figura 1. Os esquemas representados nos quadros A, H, G, e F constituem a fase úmida da OMJ, enquanto que os esquemas referentes aos quadros B, C, D e E representam sua fase seca, em relação ao observado em Canton. O tempo médio decorrido entre cada um dos esquemas é de aproximadamente cinco dias.

A oscilação segue o comportamento descrito a seguir, tal como proposto por MADDEN e JULIAN (1972) e esquematizados na Tabela 1 e na Figura 1.

Tabela 1: Evolução espaço-temporal dos distúrbios associados à OMJ

Painel	Principais características
F	São observadas anomalias negativas de pressão ao nível do mar sobre o leste da África e Oceano Índico com início de convecção em larga escala sobre o oceano Índico;
G	A anomalia negativa de pressão propaga-se para leste da linha de mudança da data assim como o extremo oriental da célula de circulação zonal;
H	As células de circulação zonal indicam que o centro da convecção em grande escala moveu-se para leste e está sobre a indonésia;
A	O centro de baixa pressão localiza-se sobre Canton e a célula de circulação zonal tem um número de onda característico 1; a convecção moveu-se por toda a Indonésia;
B	A pressão ao nível do mar começa a aumentar sobre o oceano Índico e a convecção diminui sobre o leste da linha de mudança de data;
C	Fraca convecção sobre o Pacífico Leste;
D	Alta pressão ao nível do mar e movimentos subsidentes sobre o oceano Índico
E	Subsidência sobre o Leste da Indonésia e convergência sobre o Atlântico Oeste;

Figura 1: Representação esquemática das variações no tempo e espaço (plano zonal) do distúrbio relacionado com a oscilação de 40-50 dias. As datas são indicadas simbolicamente pelas letras à esquerda de cada esquema e correspondem às datas associadas à oscilação nas estações de pressão em Canton. A letra A refere-se ao momento em que a baixa pressão está em Canton e a letra E, a alta pressão nesta localidade. As outras letras representam tempos intermediários. A perturbação média no campo de pressão é traçada na parte inferior de cada gráfico com anomalias negativas sombreadas. As células de circulação são baseadas na média dos distúrbios do vento zonal. Regiões com aumento da convecção em larga escala são indicadas esquematicamente pelas nuvens *Cumulus* e *Cumulonimbus*. A altura relativa da tropopausa é indicada no topo de cada gráfico (obtido de Madden e Julian 1972).

Quanto ao ciclo de vida da OMJ, Hendon e Salby (1994), ao estudarem compósitos e anomalias de convecção verificaram que estas encontram-se confinadas no hemisfério leste movendo-se com velocidade de aproximadamente 5m/s^{-1} , além da ocorrência de um ciclo de amplificação e decaimento de anomalias convectivas. Os autores também observaram que se por um lado, as anomalias convectivas estão confinadas no hemisfério leste, por outro a anomalia de circulação continua a propagar-se em direção ao hemisfério oeste, com velocidade cerca de 10m/s^{-1} maior, portanto do que quando ocorre o acoplamento com a convecção.

Waliser et. al. (2009) descreve que durante os eventos de OMJ é possível observar anomalias positivas de convecção desenvolvendo-se ao longo do Oceano Índico ocidental enquanto que a convecção tende a ser suprimida a leste, sobre o Pacífico ocidental. A anomalia convectiva no oceano Índico intensifica-se ao longo de 40-50 dias e propaga-se lentamente ($3\text{--}5\text{ m s}^{-1}$) para o Oceano Pacífico central.

As anomalias de convecção associadas à OMJ são mais intensas sobre o Oceano Índico centro/leste e oeste do Oceano Pacífico, e muitas vezes diminuem ao longo do continente marítimo. Sobre as águas tropicais mais quentes no hemisfério leste, a OMJ apresenta anomalias de convecção de grande escala que interagem fortemente com a circulação troposférica e os fluxos de energia em superfície, massa, calor e momento (WALISER et al., 2009).

Os principais impactos globais relacionados à OMJ durante o inverno e o verão do hemisfério norte¹, podem ser visualizados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

Inverno boreal

Figura 2: Regiões e impactos da OMJ durante o inverno boreal e sua influência, no que diz respeito às condições de tempo no período de duas semanas.

Principais características:

1. Alternância de períodos úmidos e secos nos trópicos
2. Eventos de chuva forte
3. Modulação dos sistemas monçônicos
4. Influência sobre o desenvolvimento de ciclones tropicais
5. Modulação do ENOS e das ondas oceânicas de Kelvin

¹ Imagens obtidas de <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/MJO_summary.pdf> acessado em 16/10/2017.

Verão boreal

Figura 3: Regiões e impactos da OMJ durante o verão boreal e sua influência, no que diz respeito às condições de tempo no período de duas semanas.

Principais características:

1. Alternância de períodos úmidos e secos nos trópicos
2. Modulação dos sistemas monçônicos
3. Influência sobre o desenvolvimento dos ciclones tropicais

Se, no trabalho de Madden e Julian de 1971, os autores detectaram que a oscilação teria um período de ocorrência na faixa de 40-50 dias, no trabalho de 1972, com o aprofundamento do estudo, os resultados sugeriram que o fenômeno era afetado por uma faixa de frequência mais ampla do espectro do que se pensava inicialmente. A faixa de frequência de interesse limitada a 40-50 dias, poderia ser extremamente restritiva e representativa apenas de limites aproximados do período responsável pelo fenômeno físico, além disso todos os resultados eram muito próximos à largura da banda de análise.

Posteriormente, alguns autores descreveram a propagação das anomalias convectivas tropicais para leste, tendo um período preferencial na escala de 30 a 60 dias, como no estudo de Knutson e Weickmann, 1987, e em estudos dos mesmos autores sobre a oscilação observada nos campos de Radiação de Onda Longa (ROL), durante os meses de maio a outubro, em mais de 30 eventos analisados.

A década de 1970 foi um período marcado por descobertas referentes às oscilações tropicais. Parker (1973) encontrou uma oscilação marcante na componente zonal do vento e na temperatura do ar em 100 hPa nos meses de janeiro a maio de 1966, na faixa equatorial de todo o globo. Observou que a amplitude da oscilação diminuía conforme se afastava do equador. Parker (1973) classificou esta oscilação como uma onda de Kelvin.

Zangvil (1975) utilizou a análise espectral para mostrar que havia evidências de áreas de nuvens que se propagavam para leste na região equatorial. O autor utilizou dados de satélite para os períodos de maio a outubro de 1967 e de novembro de 1967 a abril de 1968 para uma área compreendida entre 35°S e 35°N. Os resultados mostraram que as ondas que se moviam para leste estavam primeiramente confinadas no Oceano Índico equatorial. Zangvil (1975) identificou escalas dominantes com periodicidade de 5 e 9 dias. O autor identificou outro distúrbio típico encontrado nesta região com periodicidade de aproximadamente 40 dias e velocidade de fase igual a 5 graus de longitude por dia, correspondendo ao um número de onda 2, aproximadamente.

Dakshinamúrti e Keshavamurty (1976) aplicaram análise espectral aos dados das componentes zonal e meridional do vento em 850 hPa, sobre a Índia, e encontraram potências máximas para períodos de 30 dias. Os autores sugeriram que essas variações estiveram associadas às oscilações da monção na direção meridional.

Nakazawa (1988) estudou a estrutura de nuvens que se moviam para leste, nos trópicos, através de dados de ROL. Verificou que sistemas de nuvens que se movimentavam para leste eram compostos de superaglomerados de nuvens que também se moviam para leste. Observou ainda que cada superaglomerado era composto por aglomerados menores de nuvens que se movimentam para oeste. Nakazawa verificou que o tempo médio de vida dos aglomerados menores era de 1 a 2 dias e que novos aglomerados de nuvens tendiam a se formar a leste de um aglomerado completamente desenvolvido. Este comportamento ficou confinado em uma área a partir do equador.

A propagação da OMJ também foi demonstrada em estudos como os de Weickmann et al. (1985). Neste caso, os autores verificaram a propagação de anomalias de ROL de oeste para leste, entre 60° L e 160° L, com velocidade de 5 m s⁻¹.

Wang e Rui (1990) através de dados de ROL, observaram o comportamento dos complexos de nuvens tropicais. Eles definiram que as anomalias da *Tropical Intraseasonal Convection Anomalies* (TICA), ou convecção intrassazonal tropical, têm um ciclo de vida mínimo de 20 dias (4 pântadas). Durante 10 anos de dados analisados (1975-1985), os autores encontraram 122 eventos de TICA e observaram que a maior parte dos casos, 77, moveu-se para leste, 27 moveram-se para norte e 18, para oeste. A partir desta constatação, Wang e Rui (1990) dividiram os 77 casos de TICA em três grupos:

1) 32 casos em que a propagação ficou presa à faixa equatorial, com seus centros confinados entre as latitudes de 15 graus ao norte e ao sul do equador, denominados modos *eastward propagating* (EE); (Figura 4a)

2) 25 casos em que ocorreram movimentos para leste, ao longo do equador, próximo a 100° L, com ramificações para nordeste (13 casos) ou sudeste (10 casos), denominados modos NE e SE respectivamente, sendo que o modo SE ocorre exclusivamente entre os meses de novembro a abril, indicando relação com a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e com a monção australiana, e os modos NE ocorrem principalmente, mas não exclusivamente, no verão boreal, associados à ZCIT e à monção Leste Asiática. (Figura 4b)

3) 20 casos em que foi detectada a combinação entre movimentos para leste e para o norte, em direção à Índia e/ou Pacífico oeste, denominado modo *El Niño* (EN). (Figura 4c)

Figura 4 Mapas de contorno do número total de ocorrências de complexos de nuvens que se movem (a) estritamente para leste; (b) complexos para leste com ramos que se dividem tanto para o norte quanto para o sul, ao longo do Oceano Índico Leste; (c) complexos conectados com sistemas de nuvens que se movem para norte, em direção ao sul da Ásia. (Adaptado de Wang e Rui, 1990, p. 51).

Wang e Rui (1990) observaram que há regiões preferenciais para a formação e dissipação das TICAS. Dentro do período por eles analisado, 1975 a 1985, o oceano Índico centro-oeste foi a região com o maior número de formações, seguida pela costa oeste da África equatorial. As duas principais regiões de dissipação são o oceano Pacífico noroeste subtropical (140°L , 25°N) e a leste da linha de mudança de data no Hemisfério Sul (170°O , 5°S), sendo que estas duas regiões estão associadas com a ZCIT no Pacífico, durante o verão boreal e com a zona de convergência do Pacífico sul (ZCPS), no inverno boreal, respectivamente.

Estes resultados estão em concordância com análises feitas em trabalhos anteriores (RUI e WANG, 1990a) no qual verificaram que as TICAS rapidamente se intensificavam sobre as águas quentes do oceano Índico, enfraquecendo ligeiramente no continente marítimo, reintensificando novamente ao passar sobre o Pacífico Oeste e decaindo rapidamente após cruzar a linha de mudança de data, onde as temperaturas de superfície do oceano estão abaixo de 27.5°C. (WANG e RUI, 1990).

Madden e Julian (1994) presumiram que os 77 eventos de TICA, com propagação para leste, poderiam ser os sistemas convectivos estudados por Nakazawa (1988), que também estão relacionados com a OMJ.

Hendon e Liebmann (1990) aplicaram filtro de Lanczos (Duchon, 1979) passa-banda 30-60 dias, em dados de vento em 850 mb e chuva no período de 1957 a 1987, a fim de identificarem eventos da oscilação intrassazonal sobre o norte da Austrália. Somente eventos com picos em ambas as variáveis foram selecionados. Posteriormente, uma nova seleção foi realizada, onde somente os eventos que ocorreram durante ou após o início das monções foram utilizados. Os autores definiram como início, a primeira ocorrência dos ventos de oeste úmidos em Darwin. Neste estudo, verificou-se que 27 dos 30 inícios de monções de verão analisados, estiveram associados à ocorrência da oscilação de 40-50 dias.

Quanto à variação sazonal da OMJ, através de medições do vento zonal em 150 hPa nas estações tropicais, foi descoberto (MADDEN e JULIAN, 1994) que ela é mais intensa durante o período de dezembro a fevereiro e mais branda entre julho e agosto. Também é menos intensa na região do Pacífico oeste e mais intensa no Índico, em Canton e Balboa (Panamá).

Kilads e Weickmann (1992) examinaram as anomalias de circulação atmosférica associadas a anomalias na convecção tropical em três escalas de tempo intrassazonal (30-70, 14-30 e 6-14 dias), utilizando-se do conjunto de dados do *National Meteorological Center* (NMC) para as variáveis vento, altura geopotencial e temperatura, para os níveis de 200 a 1000 hPa, e, do conjunto de dados de ROL do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), referentes a nove invernos para perturbações na escala intrassazonal entre 1979/1980 e 1987/1988.

A análise espectral acima relatada foi aplicada para a determinação das faixas de frequência adequadas para a verificação da relação entre convecção e circulação, além de ter sido aplicado o cálculo de correlação defasada. O cálculo de correlação linear defasada entre ROL e a circulação sugeriu que a radiação de onda longa causa perturbações na circulação e não o contrário. Uma das explicações para tal aspecto é o fato de que o aquecimento tropical gera perturbações na parte rotacional do escoamento subtropical que interage com o escoamento extratropical.

Os autores também verificaram que na zona seca do Pacífico equatorial, que inclui o Pacífico centro-leste (HASTENRATH, 1999), não existem indícios detalhados da propagação da oscilação de 30-60 dias (Kiladis e Weickmann, 1992).

Lau e Chan (1985 e 1986) destacam que nos trópicos o sistema oceano-atmosfera exibe dois modos principais de oscilação, sendo elas a oscilação 40-50 dias (MADDEN e JULIAN, 1971, 1972) e o ENOS (ROPELEWSKI e HALPERT, 1987, TRENBERTH, 1997, entre outros). Os autores, através de estudos sobre a interação atmosfera – oceano, propuseram uma possível ligação entre a ocorrência de perturbações OMJ e o início de eventos EN, indicando que o início destes poderiam ser desencadeados pela ocorrência de perturbações na escala de 40-50 dias.

Diagramas de Hovmöller, para dados de ROL em pêntadas, foram elaborados para a área compreendida entre 5°S e 5°N e ao longo do equador, de 40°L a 80°O, cobrindo a Índia equatorial e o oceano Pacífico, entre 1974 e 1984, com a exclusão do ano de 1978 devido à grande falta de dados (aproximadamente 10 meses). Através dos diagramas foi possível observar os sinais característicos da OMJ, a propagação para leste originadas no oceano Índico oeste em direção ao Pacífico central. Estas perturbações foram caracterizadas como bastante acentuadas e regulares durante os anos de 1975, 1976 e 1981 (anos sem eventos de EN), com exceção dos anos de 1982 e 1983, em que a convecção associada à OMJ esteve ausente ou apareceu esporadicamente a leste da linha de mudança de data (LAU e CHAN, 1986a, p. 533).

Krishnamurti et al. (1988) encontraram variações na temperatura de superfície do oceano na escala de tempo de 30-60 dias da ordem de 0,5°-1,0°C, com fortes variações ocorrendo sobre o Pacífico oeste e a Baía de Bengala. McPhaden (1982) notou que os ventos zonais em baixos níveis, na ilha de Gan, estavam em fase com a direção das correntes oceânicas a uma profundidade de 100 metros, em períodos próximos a 30-60 dias.

Estudos regionais, com foco sobre a América do Sul, mostram, através da análise do primeiro modo dos dados pentadais de vento zonal e meridional ambos em 250 mb e ROL, para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 1991, um aumento da atividade intrassazonal durante o verão do hemisfério sul. Para amplitudes positivas (negativas) neste modo, anomalias no escoamento em altos níveis nos ventos de oeste (leste) domina todas as regiões dos trópicos e anomalias positivas (negativas) de ROL são observadas sobre o nordeste da América do Sul e sobre o Pacífico leste equatorial (KOUSKY e KAYANO, 1994).

Souza e Ambrizzi (2006) demonstraram que a OMJ é o principal mecanismo atmosférico modulador de variações da precipitação sobre o Brasil tropical na escala de tempo intrassazonal. A sequência de composições médias pentadais de ROL, velocidade potencial em 200 hPa e anomalias do fluxo de umidade analisada por estes autores indica claramente uma assinatura bem conhecida associada à OMJ e uma relação estreita entre a propagação para leste de anomalias convectivas e de anomalias de precipitação na Amazônia e nordeste do Brasil. A expansão da precipitação através do Brasil tropical, nos tempos -5 a +5 dias, evidencia a propagação da OMJ sobre a América do Sul (Figura 5). Os autores verificaram que, em média, a precipitação referente à fase úmida da OMJ (-5 a +5 dias) menos a da fase seca (-20 a -15 dias), sendo que o dia 0 representa o pico da fase úmida, equivale a aproximadamente 2-3,5 mm dia⁻¹ (60-115 mm mês⁻¹) no leste da Amazônia (Figura 5), sugerindo, então, que a passagem da OMJ sobre a América do Sul contribui efetivamente por uma fração considerável da precipitação anual, em particular sobre o nordeste do Brasil e sudeste da Amazônia.

Figura 5: Anomalias de precipitação pênadal sobre o Brasil tropical centradas nos dias -30, -25, -20, -15, -10, -5, 0, +5, +10 e +15. Os contornos sólidos (pontilhados) referem-se a anomalias positivas (negativas). As áreas sombreadas indicam anomalias estatisticamente significativas, ao nível de 95% de confiança. (Adaptado de Souza e Ambrizzi, 2006).

2.2 Modelo Climático Regional – RegCM4

Modelos numéricos regionais foram utilizados em uma série de estudos climáticos (GIORGI e BI, 2000; DA ROCHA et. al., 2009; GIORGI et. al., 2012) a fim de testar sua performance e sua habilidade em simular, por exemplo, padrões climáticos em diferentes escalas temporais (mensal e sazonal) ou mesmo em simular variabilidades na escala interanual tais como, os episódios de ENOS (FERNANDES et. al. 2006; ÁVILA et. al. 2013).

Até o presente momento, encontram-se disponíveis à comunidade científica, diversos modelos regionais para a previsão do tempo e estudos climáticos. Estes modelos foram utilizados para a análise de importantes aspectos do clima da Terra, como as variações na precipitação e temperatura regionais, entre outros (GIORGI et. al. 1993; CUADRA e DA ROCHA, 2006; RAUSCHER et. al. 2007).

Um destes modelos é o *Regional Climate Model* (RegCM), sendo o RegCM4, a sua mais nova versão. Desenvolvido pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), o primeiro modelo (RegCM1) foi construído a partir do final da década de 1980.

De acordo com Giorgi et. al (2012), o RegCM foi o primeiro modelo de área limitada, desenvolvido para simulação climática regional a longo prazo e tem sido usado para a intercomparação com resultados de outros modelos, a fim de testar sua performance e, em numerosos estudos sobre o clima regional, desde os que abordam a paleoclimatologia até aqueles que realizam projeções de cenários climáticos futuros (GIORGI et al., 2012).

Foi projetado para ser público, bem como sua programação em código aberto, podendo ser aplicado para qualquer região do planeta. É mantido através do *Regional Climate Research Network* (RegCNET), uma ampla rede de cientistas coordenados pelo *Earth System Physics*, seção pertencente ao *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP) de Abdus Salam (GIORGI et al., 2006).

As características dinâmicas utilizadas pelo modelo RegCM4 são as de um modelo compressível, hidrostático e escrito em coordenada vertical sigma.

Quanto aos aspectos físicos do modelo, estes incluem esquemas de interação solo-planta-atmosfera, transferência radiativa, convecção na escala de *Cumulus*, precipitação, processos em superfície terrestre, fluxos oceânicos, além do acoplamento com outros componentes do sistema climático, como lagos e oceanos (GIORGI et al., 2012).

A implementação, no RegCM4, da configuração da Banda Tropical denominada RegT-Band (COPPOLA, et al., 2012), trouxe avanços significativos às possibilidades de simulações realizadas pelo modelo. O RegT-band captura as características básicas da circulação e dos padrões de precipitação nos trópicos de maneira que amplia a gama de possibilidades de estudos para esta região do planeta, sendo um deles o estudo de variabilidades climáticas intrassazonais, tais como a OMJ.

Quando ativada a configuração RegT-Band (COPPOLA, et al., 2012; GIORGI et al., 2012), o modelo utiliza a projeção de Mercator centrada sobre o equador, com uma faixa de cobertura de toda a região tropical, de 45°S a 45°N.

O uso da projeção de Mercator permite que a grade do modelo cubra a banda tropical, com os pontos finais na direção longitudinal exatamente sobrepostos.

Essa configuração requer o uso de condições de contorno nas direções longitudinais e as condições de relaxamento padrão ocorrem nos limites norte e sul. Dessa forma, as informações dos modelos são efetivamente fornecidas apenas nesses dois limites.

CAPITULO 3

MÉTODO

3. MÉTODO

3.1 Dados de entrada do modelo RegCM4

Este estudo utilizou o modelo RegCM4, sendo descrito em Giorgi et al. (2012) e classificado como uma evolução da sua versão anterior, o RegCM3, relatado por Pal et al. (2007). O êxito das simulações provenientes de um modelo depende das condições iniciais e de contorno lateral, responsáveis por oferecer informações básicas ao início dos processamentos.

Neste trabalho, optou-se pela utilização das seguintes condições iniciais:

- I. Em relação à convecção *Cumulus*, foi utilizada a combinação dos esquemas Emanuel (EMANUEL, 1991), sobre o oceano e Grell (GRELL, 1993), sobre a terra, pois segundo Giorgi et al. (2012), a utilização destes dois esquemas combinados, demonstrou ser bastante adequada e encontra-se implementada no RegCM4.
- II. Configuração da banda tropical em que o modelo se utiliza da projeção de Mercator, centrada sobre o equador, cobrindo uma faixa latitudinal de 45°S a 45°N (GIORGI et al., 2012). Testes com esta configuração foram realizadas em Coppola et al. (2012).
- III. Dados diários interpolados de Radiação de Onda Longa (ROL) adquiridos do conjunto de dados do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) da Reanálise do ERA-Interim, para o período de 2005 a 2009 e resolução espacial de 0,5 grau nas direções zonal e meridional (DEE et al. 2011);
- IV. Dados diários da componente zonal do vento em 850 e 200 hPa e dados da componente meridional do vento em 850 hPa, obtidos da Reanálise do ERA-Interim, para o período de 2005 a 2009 e resolução espacial de 0,5 grau nas direções zonal e meridional (DEE et al. 2011);

-
- V. Dados de precipitação diária provenientes da Reanálise do ERA-Interim, para o período de 2005 a 2009 e resolução espacial de 0,5 grau;
 - VI. Dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) disponibilizados pelo ECMWF nomeado como SST Era-Interim, com resolução espacial de 1° (BERRISFORD et al. 2011);

Para a validação da precipitação do modelo, foi utilizada a precipitação diária proveniente do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP)², para o período de 2005 a 2009, ou seja, 5 anos de dados, com resolução horizontal de 1 grau (HUFFMAN, 2001).

A análise espectral será aplicada aos dados na escala diária. No caso dos dados diários, a série temporal, para o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2009, é composta por 1826 tempos.

3.2 Processamento de dados

Os cálculos estatísticos e a aplicação do filtro de Lanczos foram realizados na seguinte ordem, usando-se os *softwares Climate Data Operators (CDO)*, *NCAR Command Language (NCL)* e *Grid Analysis and Display System (GrADS)*.

Os resultados apresentados na seção 2.2.5 podem ser obtidos com a execução das rotinas, disponíveis em linguagem NCL, desenvolvidas pelo grupo de trabalho para a Oscilação de Madden-Julian (*Madden Julian Oscillation Working Group*, MJOWG), tal como apresentado em Waliser et al. (2009). Os resultados obtidos pela aplicação da técnica em dados observados serão comparados posteriormente àqueles obtidos com base nos dados simulados pelo modelo RegCM4.

² <http://precip.gsfc.nasa.gov/>

3.1.1 Retirada do Ciclo Sazonal de dados diários

O ciclo sazonal de cada uma das variáveis atmosféricas foi removido. Todas as variáveis aqui estudadas apresentam ciclo sazonal, ou seja, em determinadas épocas do ano têm seus valores aumentados ou diminuídos em função da passagem das estações do ano.

A remoção do ciclo sazonal de uma série temporal pode ser feita através da subtração da média climatológica referente a cada dia do ano do valor diário observado. Desta forma, obtém-se a anomalia diária da variável considerada, que pode ser escrita da seguinte forma (Wilks, 2006):

$$y'_{i,J} = y_{i,J} - \bar{y}_J$$

Equação 1

$$\bar{y}_J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n y_{i,J}$$

Equação 2

Sendo: $y'_{i,j}$ é a anomalia da variável y calculada para cada tempo (ano) i e para cada dia J ,

$y_{i,j}$, o valor diário observado de y e $\bar{y}_j$, a média climatológica do valor observado no dia j ; i indica o contador anual para a série de 2005 a 2009, J indica o dia considerado e N , o número total de anos.

3.1.2 Correlação Linear

Foi calculada a correlação nas escalas mensal e diária entre os dados observados (ERA-Interim e GPCP) e os simulados (RegCM4) entre os anos de 2005 e 2009.

A determinação da relação existente entre as variáveis aqui estudadas foi calculada pelo coeficiente de correlação linear. O cálculo da correlação linear mede o grau de associação entre duas variáveis quaisquer.

O coeficiente de correlação assume valores entre -1 e +1, sendo que o valor igual a 1 expressa correlação positiva perfeita entre as duas variáveis consideradas e valor igual a -1 expressa correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, ou seja, as anomalias têm o mesmo valor absoluto em todos os passos de tempo, entretanto, apresentam sinais contrários; valor próximo ou igual a zero indica que há pouca ou nenhuma dependência linear entre as variáveis analisadas.

O cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson (r) entre duas variáveis quaisquer, x e y , pode ser escrito como segue, tal como em Costa Neto (1997) e Wilks (2006):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}$$

Equação 3

em que x_i e y_i indicam as duas variáveis observadas em cada passo de tempo i ; $\bar{x}$ e $\bar{y}$, a média aritmética de cada série temporal; σ_x e σ_y são, respectivamente, o desvio padrão de x e y .

3.1.3 Regressão Linear

Após a aplicação das técnicas acima mencionadas, foram pré-selecionadas cinco áreas e aplicadas às suas séries temporais mensais o cálculo da regressão linear simples, sendo elas: África (AFR), localizada sobre o continente Africano, em sua porção equatorial; Indonésia (IND), localizada sobre a região da Indonésia; Norte da América do Sul (NAS), no Atlântico Tropical, entre o litoral norte/nordeste da América do Sul e a costa oeste do continente africano; NEB, sobre o Nordeste da América do Sul; e Sudeste brasileiro (SEB), no sudeste da América do Sul, sendo as localizações apresentadas na Tabela 2 e Figura 6.

Tabela: 2:Coordenadas geográficas das áreas pré-selecionadas para comparação entre os valores simulados (RegCM4) e observados (Era Interim e GPCP) das variáveis filtradas e não filtradas de ROL e precipitação.

Áreas	Localização	
	Latitude	Longitude
África (AFR)	5°S - 5°N	10°L - 40°L
Indonésia (IND)	10°S - 5°N	130°L - 155°L
Norte da América do Sul (Nas)	0° - 8° N	52°O - 30°O
Nordeste Brasileiro (NEB)	15°S - 3°S	52°O - 25°O
Sudeste Brasileiro (SEB)	27°S - 17°S	46°O - 25°O

Figura 6: Coordenadas geográficas das áreas selecionadas para comparação dos dados mensais de anomalia e anomalia filtrada com passa-banda 30-60 dias, para os dados de ROL e Precipitação do ERA-Interim e RegCM4.

A técnica de regressão linear simples descreve a relação linear entre duas variáveis. A regressão linear múltipla estabelece a relação linear entre uma determinada variável, denominada variável dependente, e duas ou mais variáveis, denominadas variáveis independentes.

De forma genérica, um modelo de regressão linear simples pode ser escrito da seguinte forma, de acordo com Wilks (2006):

$$\hat{y} = a + bx$$

Equação 4

em que $\hat{y}$ representa a variável dependente estimada, a , o coeficiente linear, b , o coeficiente angular e o x , a variável independente.

3.1.4 Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação, também conhecido como R^2 , é uma medida de ajuste do modelo em relação aos valores observados. O R^2 pode variar entre 0 e 1, e indica o quanto o modelo é capaz de explicar os valores observados. Quanto maior o valor de R^2 , mais eficaz é o modelo no sentido de explicar os dados observados. Tal cálculo pode ser expresso como o exposto em Wilks (2006):

$$R^2 = \frac{SQ_{\text{exp}}}{SQ_{\text{tot}}} = 1 - \frac{SQ_{\text{res}}}{SQ_{\text{tot}}}$$

Equação 5

em que SQ_{tot} representa a soma total dos quadrados das diferenças entre a média e cada valor observado; SQ_{exp} é a soma dos quadrados explicada pelo modelo, indicando a diferença entre a média das observações e o valor estimado em cada observação, sendo que, quanto menor a

diferença, maior eficácia tem o modelo; e SQ_{res} representa a soma dos quadrados dos resíduos, ou seja, calcula a parte não explicada pelo modelo.

3.1.5 Filtro de Lanczos

Uma das possíveis técnicas para a detecção da OMJ é a aplicação de filtros nas séries temporais dos conjuntos de dados, a fim de se obter as frequências de maior interesse. A técnica aqui empregada foi a do filtro de Lanczos (DUCHON, 1979) e tem como principal característica diminuir a amplitude da oscilação de Gibbs responsável por causar ruído numa série de dados.

A análise espectral utilizada consistiu em aplicar a filtragem de Lanczos (DUCHON, 1979), com o intuito de se reter a variabilidade intrassazonal para a banda de 30-60 dias. Este filtro tem a função de transformar a série temporal original, em outra utilizando-se para isto uma relação linear. Esta técnica é aplicada ao domínio do tempo, já que a função peso é aplicada diretamente na série temporal.

3.1.6 Análise Espectral

A filtragem de uma série temporal com N observações pode ser feita através da transformação da série temporal em $(N/2)$ funções trigonométricas compostas por frequências de oscilações que contribuem para a descrição da série temporal original. Este procedimento é o mesmo que escrever a função na forma de uma série de Fourier.

Após este procedimento, define-se o corte das faixas espectrais de interesse para o estudo. No caso da OMJ, opta-se normalmente por oscilações características entre 30 e 60 dias, ou entre 40 e 90 dias, o que varia de acordo com o autor. Nesta pesquisa, nos ateremos às frequências entre 30 e 60 dias.

3.1.7 Filtro Passa-Banda

O processo de filtragem consiste em transformar uma série de dados de tal forma que as amplitudes de certas componentes de Fourier, previamente seleccionadas, sejam alteradas. A função peso para o filtro passa-banda de Lanczos, W_k , é definida, segundo (Duchon, 1979), por:

$$W_k = \left(\frac{\sin(2\pi f_{c2}^k)}{(nk)} - \frac{\sin(2\pi f_{c1}^k)}{(nk)} \right) \frac{\sin(nk/n)}{(nk/n)}$$

Equação 6

Em que f_{c1} e f_{c2} representam as frequências de corte da banda desejada.

O número mínimo de pesos requerido para o filtro passa-banda de Lanczos é dado em Duchon (1979, p. 1020, eq. 14), sendo que:

$$n \geq 1,3/(f_{c2} - f_{c1})$$

Equação 7

Neste trabalho foi utilizada a resposta do filtro de *Lanczos* para as frequências de corte de 30-60 dias com 131 pesos, sendo o número de pesos escolhido, baseado nos critérios discriminados na Tabela 3:

Tabela 3: Critérios para a determinação do número de pesos do filtro de Lanczos

Parâmetro	Valor
dt	1 (escala diária)
t_1	60
t_2	30
f_{c1}	1/60 frequência de corte para t_1
f_{c2}	1/30 frequência de corte para t_2

De acordo com a equação, $n \geq 65$.

O número mínimo de pesos a ser utilizado para a faixa espectral de 30 a 60 dias, segundo Duchon (1979) é igual a 131 ($= 2n+1$).

A utilização de um número maior de pesos produz uma função resposta mais próxima da janela retangular ideal, porém acarreta em maior perda de dados nas extremidades da série. No caso das séries temporais utilizadas neste trabalho, que apresentam 1826 dias, o uso destes critérios provocou a perda de 66 dias no início da série (de 01 de janeiro a 10 de abril de 2005) e de 65 dias no final da série (de 23 de setembro a 31 de dezembro de 2009).

Graficamente, a resposta do filtro pode ser representada da seguinte maneira (Figura 7):

Figura 7: Filtro passa-banda e respectiva resposta do filtro ideal, sendo que $f_{ca} < f_{cb} < 0,5$. Disponível em https://www.ncl.ucar.edu/Document/Functions/Built-in/filwgt_lanczos.shtml. Acessado em 20/10/2017.

3.1.8 Diagramas de fase e Ciclos de vida da OMJ

A identificação dos eventos de OMJ e a posterior criação dos diagramas de fase e dos ciclos de vida foram feitas com base no índice diário proposto por Wheeler e Hendon (2004) e Jones e Carvalho (2012). Este índice consiste na soma das duas primeiras componentes principais (CP) calculadas conjuntamente para as variáveis ROL e componentes do vento em 200 e 850 hPa, para a faixa tropical definida pelas latitudes 15°S e 15°N.

Anteriormente à aplicação do cálculo das componentes principais, os dados são filtrados com *Lanczos* para a retenção de oscilações entre 30-60 dias. O ciclo sazonal é removido antes da aplicação da análise espectral.

Os eventos de OMJ podem então ser identificados através do diagrama de fase para as duas primeiras componentes principais, PC1 e PC2, normalizadas pelo desvio padrão. (WHEELER e HENDON, 2004; JONES e CARVALHO, 2012).

O diagrama de fase descreve o padrão de propagação para leste das anomalias convectivas. A OMJ pode então ser representada por um vetor Z em um diagrama de fase de duas dimensões, definido pelas duas primeiras componentes principais, segundo Mattheus (2000):

$$Z(t) = \{PC1(t), PC2(t)\}$$

Equação 8

Alternativamente, pode-se representar a amplitude A e a fase α , segundo Mattheus (2000), através das equações seguintes:

$$A(t) = \{PC1^2(t) + PC2^2(t)\}^{1/2}$$

Equação 9

$$\alpha(t) = \tan^{-1}\{PC2(t)/PC1(t)\}$$

Equação 10

Sendo A o tamanho do vetor Z e α o ângulo entre o eixo de PC1 e o vetor Z .

A propagação, para leste, das anomalias convectivas descritas pelas duas primeiras componentes principais está associada ao aumento de α no tempo, e é apresentada como uma rotação de $Z(t)$ no sentido anti-horário (MATTHEUS, 2000).

Grandes amplitudes das trajetórias formadas nos diagramas de fase significam intensidade forte da OMJ, enquanto que períodos com fracas atividades apresentam trajetórias próximas à origem do sistema cartesiano. (WHEELER e HENDON, 2004).

Os resultados das duas primeiras componentes principais de EOF são usados para a construção de composições do ciclo de vida da OMJ para os meses de maio a outubro (inverno austral) e de abril a novembro (verão austral).

Tal como definem WHEELER e HENDON (2004), consideramos o sinal forte da OMJ durante períodos em que o índice ($PC1^2 + PC2^2$) excede o valor 1. Os períodos de alta amplitude são retidos para a composição dos painéis que indicam o ciclo de vida de um evento de OMJ.

O número de dias que satisfazem o critério de amplitude mínima em cada fase é exibido à direita inferior de cada painel.

Os diagramas de fase apresentados nas Figuras 37 a 45 apresentam o ciclo de vida da OMJ no oeste do Pacífico para os períodos descritos na Tabela 4. Os subperíodos foram escolhidos levando-se em conta os seguintes critérios: As séries temporais, após a filtragem com o passa-banda perdem os primeiros 66 dias do ano de 2005 e os últimos 65 dias do ano de 2009.

Os períodos de maio a outubro e de novembro a abril, representam, de forma geral, os períodos secos (ou com diminuição da quantidade de chuva) e chuvosos, da região tropical do planeta, permitindo desta forma a análise destes dois padrões sazonais.

Tabela 4: Subperíodos utilizados para a confecção dos diagramas de fase para o período de 2005 a 2009.

	Subperíodos
1°	01/05/2005 – 31/10/2005
2°	01/11/2005 a 30/04/2006
3°	01/05/2006 – 31/10/2006
4°	01/11/2006 a 30/04/2007
5°	01/05/2007 – 31/10/2007
6°	01/11/2007 a 30/04/2008
7°	01/05/2008 – 31/10/2008
8°	01/11/2008 a 30/04/2009
9°	01/05/2009 – 31/10/2009

Adicionalmente foi realizada a comparação entre os resultados dos diagramas de fase e os valores do *Oceanic Niño Index* (ONI) descritos na Tabela 8.

O índice é calculado, inicialmente, considerando a média entre 3 meses consecutivos de anomalias da TSM na região do *Niño* 3.4 (5°N - 5°S; 120°O - 170°O) nos últimos 30 anos (os cálculos são atualizados a cada 5 anos). Quando o limiar de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ é alcançado, os valores descritos na tabela são destacados pelas cores vermelhas e azuis e indicam períodos com anomalias positivas e negativas respectivamente.

Por fim, se a média das anomalias calculadas for superior a $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, bem como persistentes por um período igual ou maior do que 5 meses, considera-se então, a ocorrência do fenômeno ENOS.

Importante ressaltar o estudo conduzido por Lau e Chan (1986), cujo foco principal foi analisar conjuntamente a OMJ e o ENOS, utilizando para tal, a ROL como indicadora de convecção nos trópicos. Os resultados demonstraram que durante o evento de EN nos anos de 1982 e 1983, a OMJ esteve ausente ou apareceu esporadicamente à leste da linha de mudança de data.

Tabela 5: Valores dos episódios ENOS de acordo com o *Oceanic Niño Index* (ONI). Os valores em vermelho (azul), indicam a fase quente (fria).

Anos	Trimestres											
	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2005	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8
2006	-0,8	-0,7	-0,5	-0,3	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,9
2007	0,7	0,3	0,0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,8	-1,1	-1,4	-1,5	-1,6
2008	-1,6	-1,4	-1,2	-0,9	-0,8	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,6	-0,7
2009	-0,8	-0,7	-0,5	-0,2	0,1	0,4	0,5	0,5	0,7	1,0	1,3	1,6

Fonte: <http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php>
Acesso em 06/08/2018)

De modo a complementar e relacionar tanto as informações fornecidas através do ONI, quanto dos diagramas de fase, a Tabela 6 sintetiza e classifica os episódios de OMJ de acordo com a amplitude das trajetórias demonstradas nos diagramas.

Para os casos em que a amplitude da trajetória foi pequena, ou seja, os círculos pretos, indicadores do instante inicial e final da série temporal considerada, estiverem próximos à origem do diagrama, a OMJ é classificada como menos ativa. Por outro lado, se a amplitude da trajetória for grande, ou seja, os círculos pretos indicadores do instante inicial ou final da série temporal considerada, estiverem distantes da origem do diagrama, a OMJ é classificada como ativa.

Ademais, a Tabela 6 traz informações referentes à predominância de anomalias negativas (NEG) e positivas (POS) no Oceano Pacífico durante o subperíodo analisado, sendo que esta classificação levou em consideração os valores do ONI.

Tabela 6: Classificação dos episódios da OMJ baseada nos diagramas de fase. A cor azul (verde) indica fase menos (mais) ativa. As indicações +NEG e + POS referem-se à predominância de anomalias negativas e positivas no Oceano Pacífico respectivamente, durante o subperíodo analisado.

Subperíodos								
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
2005	2005/2006	2006	2006/2007	2007	2007/2008	2008	2008/2009	2009
01/05 a 31/10	01/11 a 30/04	01/05 a 31/10	01/11 a 30/04	01/05 a 31/10	01/11 a 30/04	01/05 a 31/10	01/11 a 30/04	01/05 a 31/10
+NEG	NEG	POS	+POS	NEG	NEG	NEG	NEG	POS

Os resultados apresentados na seção 2.2.5 podem ser obtidos com a execução das rotinas, disponíveis em linguagem NCL, desenvolvidas pelo grupo de trabalho para a Oscilação de Madden-Julian (*Madden Julian Oscillation Working Group*, MJOWG), tal como apresentado em Waliser et al. (2009). Os resultados obtidos pela aplicação da técnica em dados observados serão comparados posteriormente àqueles obtidos com base nos dados simulados pelo modelo RegCM4.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4. RESULTADOS

Nesta seção são comparados os valores mensais e diários simulados (RegCM4) e observados (Era Interim e GPCP) entre 2005 e 2009. As análises foram feitas de forma geral para a região tropical do globo, de 35° S a 30° N (Figuras 8 a 13), e para cinco áreas pré-estabelecidas, tal como indicado na Figura 6.

4.1 Comparação entre os conjuntos de dados simulados (RegCM4) e observados (GPCP e Era-Interim)

Os mapas das diferenças médias entre a precipitação simulada (RegCM4) e a observada (GPCP), de 2005 a 2009, para a estação de (a) MAI-OUT e (b) NOV-ABR (Figuras 8 a-b) mostram que para a América do Sul, Sul do continente Africano e Índico, o modelo superestima os valores de precipitação do GPCP nas duas estações do ano.

No Oceano Pacífico, o modelo superestimou a precipitação do GPCP na estação MAI-OUT e subestimou em NOV-ABR, no setor norte e Sul desta localidade.

A costa oeste do oceano Atlântico tem seus valores subestimados entre MAI-OUT e superestimados em NOV-ABR.

Em relação aos dados do Era Interim, as simulações na faixa tropical expressam, em geral, subestimativa da precipitação pelo RegCM4, que varia entre 2 e 40 mm dia⁻¹. (entre 60 - 1200 mm mês⁻¹). Por outro lado, em relação aos dados do GPCP, existem áreas onde o modelo subestima a precipitação e outras onde o modelo superestima a precipitação.

Aparentemente há uma subestimativa em áreas mais áridas (Austrália e Pacífico leste, Atlântico Leste, Norte e Sul) e superestimativa nas áreas mais chuvosas tais como no região do Pacífico oeste, Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Os mapas de correlação linear entre os dados mensais e diários simulados (RegCM4) e observados (GPCP) indicam certa similaridade espacial entre si (Figura 10 a-b). Por exemplo, nos dois casos, o setor norte da América do Sul e região da ZCAS, principalmente sobre o Atlântico Sul subtropical, a região da Indonésia, sul e norte do continente africano e Atlântico Sul tropical apresentam valores negativos de correlação.

Por outro lado, o setor centro-oeste do Pacífico equatorial e Índico apresentam valores positivos de correlação linear entre os dados simulados e os dados do GPCP. A diferença na escala da correlação entre dados mensais e diários indica a maior diferença de variabilidade para os dados diários.

Correlação mensal RegCM4 e GPCP

(a)

Correlação com dados diários RegCM4 x GPCP

(b)

Figura 10: Correlação linear entre a precipitação simulada (RegCM4) e observada (GPCP), para dados nas escalas (a) mensal e (b) diária, entre 2005 e 2009 (mm/dia).

Na faixa de 15° S a 15° N, as anomalias de precipitação simuladas pelo RegCM4 (Figura 11) são, em geral, mais intensas do que as anomalias observadas pelo GPCP (Figura 12).

As maiores diferenças entre as anomalias de precipitação simuladas e observadas (Figura 13) localizam-se entre 60° E e 180° E, na faixa equatorial de 15° S a 15° N, englobando parte do Oceano Índico e a Indonésia. Entre 80° O e 20° O, as diferenças entre as anomalias simuladas e observadas também são relativamente altas, indicando que é maior a diferença a entre variabilidade da precipitação simulada e observada.

Em geral, a associação apresentada nas Figuras 14 a 23, para as variáveis ROL e precipitação, em seus valores simulados (RegCM4) e observados (ERA-Interim), para as cinco áreas selecionadas, indica valores bem mais baixos de correlação linear entre os dados de precipitação do que os encontrados para os dados de ROL, o que é esperado, uma vez que a precipitação é uma variável mais descontínua (no tempo e no espaço) do que a ROL.

Os valores de correlação linear entre os valores simulados e observados da precipitação não filtrada variam entre $|0,1|$ e $|0,2|$, enquanto os valores de correlação para as variáveis filtradas variam entre $|0,1|$ e $|0,3|$.

Na área AFR, região central do continente africano (Figura 14), os dados mensais simulados e observados de ROL entre 2005 e 2009, apresentam correlação linear positiva de 0,40 e 0,20 para os valores filtrados para a faixa espectral de 30-60 dias e não filtrados, respectivamente.

A precipitação para a mesma área AFR apresenta valores de correlação mais baixos do que os de ROL, - 0,03 e 0,14, para valores filtrados e não filtrados, respectivamente (Figura 15, Tabela 7).

Na área IND, região da Indonésia (Figura 16), os dados mensais simulados e observados de ROL apresentaram correlação linear positiva de 0,40 e 0,20 para os valores filtrados e não filtrados, respectivamente (Tabela 7).

Em relação à precipitação, a área IND (Figura 17) apresenta valores de correlação linear baixos, $r = -0,14$, para os dados filtrados, sendo possível destacar e comparar, a variabilidade apresentada na série temporal do modelo, sendo esta, superior aos valores de precipitação do ERA-Interim, tanto nos dados de anomalia (Figura 17 b), quanto nos dados de anomalia filtrada (Figura 15 d).

Na área NAS (Figura 18), o coeficiente de correlação linear entre os valores de anomalia de ROL para os dois conjuntos de dados é igual a 0,35 (Tabela 7), por outro lado, a correlação entre os dados filtrados de ROL é praticamente nula (0,03) (Tabela 7).

Dentre todas as localidades analisadas, a área NAS é a que apresenta o maior valor de correlação linear para a anomalia filtrada de precipitação ($r = 0,32$) entre dados simulados e observados (Tabela 7).

A área NEB (Figuras 20 e 21), correspondente ao nordeste da América do Sul, é a que apresenta os maiores valores de correlação entre os dados simulados e observados de ROL. Os dados de anomalia e anomalia filtrada apresentaram valores positivos de correlação iguais a 0,63 e 0,32, respectivamente (Tabela 7).

Quanto à precipitação, esta área apresenta valores de correlação iguais a 0,20, para o valor mensal e - 0,33 para o valor filtrado para a faixa de 30-60 dias (Tabela 7).

Na área SEB (Figura 22), sudeste da América do Sul, os maiores valores de correlação linear foram encontrados para os dados de anomalia filtrada de ROL, = 0,54, enquanto que, para os dados originais, os valores são de 0,3 (Tabela 7).

Em relação à precipitação (Figura 23), os valores de correlação linear mais altos, são encontrados nos dados de anomalia filtrada, =0,30 (Tabela 7), sendo que para os dados de anomalia, a correlação linear mostrou-se praticamente nula =-0.003 (Tabela 7).

Figura 23: Média mensal, para a área SEB, dos dados de precipitação e precipitação filtrada para 30-60 dias, simulada (RegCM4) e observada (Era-Interim), de 2005 a 2009.

Tabela 7: Quadro resumo com as correlações e o R^2 entre a ROL do ERA-Interim e RegCM4, (anomalia e anomalia filtrada).

Áreas	Valores do coeficiente de Correlação (r)		R^2	
	Anomalia	Anomalia Filtrada	Anomalia	Anomalia Filtrada
AFR	0,20	0,40	0,0384	0,1485
IND	0,32	-0,10	0,1013	0,0066
NAS	0,35	0,04	0,1238	0,0016
NEB	0,63	0,32	0,3916	0,0998
SEB	0,30	0,54	0,0913	0,2874

Tabela 8: Quadro resumo com as correlações entre a precipitação do ERA-Interim e do RegCM4, (anomalia e anomalia filtrada).

Áreas	Valores do coeficiente de Correlação (r)		R^2	
	Anomalia	Anomalia Filtrada	Anomalia	Anomalia Filtrada
AFR	0,14	-0,03	0,0205	0,001
IND	0,10	-0,14	0,0075	0,0186
NAS	0,11	0,32	0,0127	0,103
NEB	0,20	-0,33	0,0394	0,1069
SEB	-0,003	0,30	0	0,0718

4.2 Campos médios dos dados do ERA Interim e RegCM4

Nesta seção é apresentada a média das variáveis consideradas obtidas da reanálise do Era-Interim, do GPCP e simuladas pelo RegCM4, para o período de 2005 a 2009. As variáveis analisadas são ROL e precipitação.

4.2.1 Radiação de Onda Longa (ROL)

As Figuras 24 e 25 mostram a média mensal da ROL, de janeiro a dezembro de 2005 a 2009, obtida a partir da reanálise do ERA Interim e das simulações realizadas com o modelo RegCM4, respectivamente, para a faixa tropical de 30° N a 30° S.

Em geral, a ROL simulada pelo RegCM4 é relativamente menor do que a obtida a partir do Era Interim. Embora a ROL simulada pelo modelo seja em média menor do que a da reanálise, o padrão espacial mostra semelhanças, com valores mais altos nas regiões das altas subtropicais e menores nas regiões equatoriais e tropicais, onde há mais convecção.

As altas subtropicais do Pacífico e Atlântico do hemisfério sul podem ser facilmente identificadas pelos valores altos de ROL, entre 270 e 300 W m⁻² nos dados do Era Interim (Figura 24). As regiões da África Equatorial, Indonésia, sudeste da Ásia, norte da Austrália e centro-norte da América do Sul são também facilmente identificadas como regiões com valores mais baixos de ROL, entre 200 e 240 W m⁻².

A variação sazonal (Figura 24) mostra bem o deslocamento meridional das áreas com maior convecção para o hemisfério de verão, assim como o deslocamento das áreas com pouca nebulosidade. Sobre a América do Sul, os valores de ROL nos meses de inverno do hemisfério sul (abril a setembro) mostram a grande atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul sobre o continente. É possível verificar também o deslocamento de áreas convectivas para o extremo noroeste da América do Sul durante os meses de inverno, enquanto que, durante os meses de verão, as áreas convectivas estendem-se mais para o centro-sul do continente.

A comparação entre os dados observados de ROL (Era Interim) e os simulados mostra que os valores simulados são, em geral, subestimados em relação aos observados. Por exemplo, enquanto os valores simulados de ROL em regiões do norte da América do Sul variam entre 200 e 250 W m^{-2} (Figura 25), os dados do Era Interim mostram valores médios entre 210 e 280 W m^{-2} (Figura 24).

O centro norte da América do Sul apresenta valores mínimos de ROL, entre 200 e 240 W m^{-2} , para os dados da ERA Interim (Figura 25), e entre 200 e 210 W m^{-2} , para as simulações do RegCM4 (Figura 25), abrangendo áreas cada vez mais extensas de novembro a março, devido ao aumento da convecção.

As simulações realizadas pelo modelo (Figura 25) demonstraram que valores mínimos de ROL ($< 200 \text{ W m}^{-2}$), para o centro norte da América do Sul citada, persistem ao longo de praticamente todos os meses do ano, com exceção dos meses de maio a agosto cujos valores mínimos ficam entre 220 e 250 W m^{-2} .

Verifica-se a presença do padrão característico da ZCAS sobre a região noroeste-sudeste da América do Sul durante os meses de novembro a janeiro, tanto nos resultados da ERA Interim (Figura 24) quanto nos do RegCM4 (Figura 25), sendo que para este último, o padrão de ZCAS estende-se até o mês de março enquanto para os dados do Era Interim fevereiro.

Entre maio e setembro, os valores mínimos de ROL nos dados da ERA Interim estão restritos ao norte e ao sul da América do Sul, sendo que o centro e o nordeste da América do Sul ficam dominados por valores mais altos de ROL, com máximos entre 260 e 290 W m^{-2} os meses de agosto e setembro, coincidindo com os valores mínimos de precipitação (Figura 26).

No oceano Pacífico tropical oeste, Indonésia, sudeste asiático, porção central do continente Africano e centro sul do oceano Índico, valores mínimos de ROL estão presentes principalmente entre os meses de junho a setembro apresentando valores mínimos próximos de 200 W m^{-2} , tanto nos dados do ERA Interim (Figura 24) quanto nos dados do RegCM4 (Figura 25), particularmente entre a costa leste da Índia e a costa oeste do sudeste asiático, indicando convecção profunda nestas localidades, tal como indicam as Figuras 26 e 27, embora os dados simulados superestimem a precipitação em relação aos dados do ERA Interim.

Valores altos de ROL do Era Interim são observados entre as latitudes 5°N e 30°N do continente africano e Oriente Médio com máximos de 300 W m^{-2} , norte da Austrália e oceano Pacífico tropical central e leste, abrangendo áreas maiores durante os meses de junho a setembro, com precipitação média menor do que $0,5 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 26). Os dados de ROL simulados pelo modelo para o norte da África apresentam valores menores, entre 260 e 290 W m^{-2} , entre maio e agosto, verão para o hemisfério norte (Figura 25).

É importante notar que os oceanos Índico, Pacífico e Atlântico apresentam grandes extensões com os maiores valores de ROL (300 W m^{-2}) coincidentes com os mínimos de precipitação verificados nestas localidades ($< 0,5 \text{ mm/dia}$), tanto nos dados simulados pelo modelo quanto nos dados do ERA Interim (Figuras 24 a 26).

O RegCM4 foi capaz de simular os padrões de ROL sobre os oceanos (Figura 25), porém, é possível notar que sobre o Oceano Atlântico, tanto ao norte quanto ao sul, os valores de ROL são menores nas simulações feitas pelo modelo do que nos produtos da ERA Interim (Figura 24) em praticamente todos os meses, exceto para os meses de outubro e dezembro em que a ROL apresentou os maiores valores para os produtos da ERA Interim.

ROL média mensal: Era Interim

Figura 24: Média da ROL (W m^{-2}) do ERA Interim para os meses de janeiro a dezembro de 2005 a 2009.

ROL média mensal: RegCM4

Figura 25: Média da ROL (W m^{-2}) simulada pelo modelo RegCM4 para os meses de janeiro a dezembro, de 2005 a 2009.

4.2.2 Precipitação

Quanto a precipitação do ERA Interim (Figura 26), os maiores volumes estão presentes na faixa latitudinal entre 10°N e 20°S, entre os meses de dezembro a março, com valores que variam entre 3 e 8 mm/dia. Esta faixa de precipitação migra para norte a partir do mês de abril, sendo que os maiores volumes de precipitação ocorreram sobre o sudeste asiático (Malásia) com valores acima de 10 mm/dia.

Já a precipitação simulada pelo RegCM4 (Figura 27), a precipitação sobre o Atlântico Norte e Pacífico Leste foi subestimada, se comparada aos resultados obtidos através do ERA Interim, e concentra-se em uma pequena faixa latitudinal entre 0° e 10°N. O mesmo ocorre se observarmos a precipitação na costa oeste da América do Sul com valores menores do que 4mm/dia, enquanto que para os do ERA Interim, os valores estão entre 4 e 6 mm/dia.

Sobre a cordilheira dos Andes, particularmente no lado leste, os dados simulados pelo modelo demonstram valores acima de 9 mm/dia, superestimando a precipitação observada na ERA Interim que apresentou valores menores do que 0,5 mm/dia.

Uma grande área de precipitação na costa leste do continente africano e sul da Índia pode ser observada na climatologia da precipitação referente ao mês de janeiro, com valores acima de 10 mm/dia somente na simulação do modelo RegCM4 (Figura 27). No mesmo período, a precipitação da ERA Interim está localizada sobre o continente africano e com precipitação média bem inferior, entre 3 e 6 mm/dia (Figura 26).

Figura 26: Precipitação média mensal (mm dia^{-1}) do ERA Interim para os meses de janeiro a dezembro dos anos de 2005 a 2009.

Precipitação média mensal: RegCM4

Figura 27: Precipitação média mensal (mm dia^{-1}) simulada pelo modelo RegCM4, de 2005 a 2009.

4.3 Diferença entre os dados do RegCM4 e os da ERA-Interim

Nesta seção são apresentadas as diferenças entre os valores simulados pelo RegCM4 e observados, do ERA INTERIM, das variáveis ROL e precipitação, nas escalas anual e sazonal. As diferenças foram calculadas tanto para o campo das anomalias como para os dados filtrados na escala de 30 – 60 dias, para os meses de janeiro a dezembro, de 2005 a 2009.

Em geral, tanto para as anomalias (Figuras 28-33 a) quanto para as anomalias filtradas com passa-banda 30-60 dias (Figuras 28-33 b), as maiores diferenças ocorrem no oceano Pacífico centro-sul, onde é possível verificar, nos dados sazonais e anuais, uma sucessão de ondas alternando-se entre valores positivos e negativos ao longo desta localidade, particularmente para os trimestres dezembro, janeiro e fevereiro (DJF), e os anos 2005, 2006 e 2007 (Figura 28).

A região central da América do Sul e o oceano Índico, próximo à costa sul da Índia, apresentaram as maiores diferenças entre os trimestres DJF, e setembro, outubro e novembro (SON), onde é possível observar anomalias negativas e positivas, respectivamente.

Tanto a ROL quanto a precipitação, através da análise da anomalia filtrada para o trimestre junho, julho de agosto (JJA), em média, as diferenças entre os conjuntos de dados apresentaram valores 10 vezes menores, se comparados aos demais trimestres analisados.

(a)

(b)

Figura 28: Diferença entre as médias sazonais dos dados de ROL, sendo anomalia (a) e anomalia filtrada com passa-banda 30-60 dias (b) para os meses de janeiro a dezembro dos anos de 2005 a 2009.

Figura 29: Diferença média da anomalia filtrada de ROL, com passa-banda 30-60 dias, para os meses de JJA, para o período de 2005 a 2009.

Figura 30: Diferença entre as médias sazonais dos dados de precipitação, sendo anomalia (a) e anomalia filtrada com passa-banda 30-60 dias (b) para os meses de janeiro a dezembro dos anos de 2005 a 2009.

Figura 31: Diferença entre as médias sazonais, dos dados de precipitação, da anomalia filtrada com passa-banda 30-60 dias, para os meses de JJA dos anos de 2005 a 2009.

Figura 32: Diferença entre as médias anuais dos dados de ROL, sendo anomalia (a) e anomalia filtrada com passa-banda 30-60 dias (b) para os meses de janeiro a dezembro dos anos de 2005 a 2009.

Figura 33: Diferença entre as médias anuais dos dados de precipitação, sendo anomalia (a) e anomalia filtrada com passa-banda 30-60 dias (b) para os meses de janeiro a dezembro dos anos de 2005 a 2009.

4.4 Evolução temporal e espacial da OMJ

Nesta seção são analisados os resultados referentes aos anos de 2005 a 2009 da evolução temporal e espacial da OMJ. A análise multivariada permite definir o índice de OMJ, a partir do qual se define a intensidade da oscilação (amplitude do diagrama) e sua fase.

4.4.1 Índice da OMJ

O índice de OMJ, calculado com base nas PC1 e PC2 de EOF aplicada aos dados de ROL e vento, permite a identificação dos períodos em que os eventos estiveram intensos e representa a média espacial para a faixa latitudinal entre 15° S e 15° N (Figuras 34 a-b).

Ao observarmos o índice obtido através dos produtos da ERA Interim, verificamos que em todos os anos, os eventos de OMJ apresentam períodos de intensidade (valor do índice > 1). Para os dados do RegCM4, é notável a intensidade do sinal durante o ano de 2009 (Figura 34 b), entretanto, nos anos anteriores o sinal é bem menor.

(a)

Figura 34: Evolução temporal do índice da OMJ (*Real-Time Multivariate MJO Index*), entre janeiro de 2005 e dezembro de 2009 para os produtos da ERA Interim (a) e do RegCM4 (b). A linha preta indica o índice diário e a linha azul, a média móvel do índice, com janela de 91 dias.

4.4.2 Análise Multivariada

A análise das componentes principais EOF1 e EOF2 separadamente, para cada variável atmosférica, permite verificar diferenças mais precisas entre as duas fontes de dados, Era-Interim e RegCM4.

As duas primeiras componentes principais, em conjunto, explicam 61,1 % da variância dos campos atmosféricos originais no caso dos dados do Era-Interim, (Figura 35 e 36).

Os valores da EOF1 (Figuras 35 a-b) descrevem um comportamento familiar aos dados originais que caracterizam a OMJ, apresentando anomalias negativas de ROL nas regiões do continente marítimo, entre 60°L e 140°L, o que está associado ao aumento da convecção nesta região e anomalias positivas ou próximas de zero nas demais longitudes. A EOF1 associada à componente zonal do vento em 850 hPa (curva vermelha) indica anomalia de oeste a oeste em 90° L e, anomalias de leste a leste desta longitude, o que contribui para a convergência do ar na região próxima de 90° L.

Figura 35: Estrutura espacial da primeira componente de EOF aplicada aos dados diários de OLR, componente zonal do vento em 200 e 850 hPa, para o período de 01 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2009, para os dados da ERA Interim e do RegCM4.

Em altos níveis, as anomalias do vento associadas à EOF1 apresentam sinais opostos em relação aos sinais da EOF1 da componente zonal do vento em baixos níveis.

Os valores máximos e mínimos dos *loadings* da EOF2, para as três variáveis consideradas, encontram-se deslocados para leste em relação ao padrão da EOF1, assim como indicado na Figura 35, indicando que as duas componentes principais explicam o deslocamento para leste do movimento atmosférico nesta faixa latitudinal.

O mínimo dos valores da EOF2 associado a ROL aparece em aproximadamente 130° L, indicando maior convecção nesta área e o deslocamento para leste da convecção em relação à EOF1. A EOF2 associada à componente zonal do vento em baixos níveis apresenta valor máximo próximo a 120° L, indicando anomalias de oeste e de leste, respectivamente, a oeste e a leste de 180 graus, o que promove máxima convergência do ar em baixos níveis, próximo a esta longitude.

Em altos níveis, a EOF2 da componente zonal do vento apresenta valor negativo máximo próximo a 120° L, e valores positivos a leste de 180 graus, indicando o máximo de divergência do ar próximo à longitude de 180 graus, coincidindo com a longitude de máxima convergência em baixos níveis. Em relação à EOF1, a EOF2 apresenta um deslocamento da convergência de baixos níveis de aproximadamente 80 graus para leste.

Os valores máximos positivos da EOF2 associada à variável ROL (60°-70° L) localizam-se a leste da região de máxima divergência em baixos níveis (30° E) e os valores mínimos da EOF2 de ROL localizam-se a oeste (130° E) da máxima convergência em baixos níveis (180°). Ou seja, os dados de ROL e vento em baixos e altos níveis parecem estar fisicamente conectados.

Quanto aos resultados gerados pelo modelo RegCM4, as duas primeiras componentes principais em conjunto explicam 40,3% da variância dos campos atmosféricos originais, tal como indicado nas Figuras 35 e 36, e são bastante diferentes dos obtidos com dados do ERA Interim.

Ao observarmos o comportamento dos valores da EOF1 (Figura 35), verificamos supressão da convecção entre 0° e 120° E, com anomalias positivas de ROL (curva preta) sobre o continente africano e oceano Índico. Em baixos níveis, entre 60 e 90 E, a EOF1 da componente zonal do vento (curva vermelha) indica maior divergência do ar e, próximo a 120° O, maior convergência do ar. Ao mesmo tempo, a EOF1 da componente zonal do vento em níveis altos (curva verde) indica máximos de convergência e divergência próximos das localidades em que se vê divergência e convergência em baixos níveis, o que suporta as condições necessárias para a convecção e sua inibição ao longo da faixa zonal analisada.

Assim, o máximo de valores positivos de OLR encontram-se próximos dos valores de divergência máxima em níveis baixos e os valores negativos máximos de OLR encontram-se próximos dos valores de convergência máxima em baixos níveis.

Em comparação com o obtido para os dados do Era-Interim, a EOF1 (Figura 35 b) aplicada aos dados do RegCM4 apresenta convecção e inibição da convecção em áreas distintas da faixa longitudinal entre 15° N e 15° S. Enquanto os valores mínimos de EOF1 para OLR (intensificação da convecção) do Era-Interim são observados próximo a 90° E, os valores mínimos de OLR para os dados do RegCM4 são observados próximo a 120° O, com defasagem longitudinal de 30°. E, enquanto os valores máximos da EOF1 para OLR (inibição de convecção) do Era-Interim são observados próximo a 150° E, os valores máximos para os dados simulados pelo RegCM4 são observados próximo a 60° E, com uma defasagem longitudinal de 90°.

Embora os valores simulados pelo RegCM4 para a faixa latitudinal equatorial apresentem muita discrepância na localização das áreas com convergência e divergência máximas nesta faixa equatorial, apresentam posições dos valores máximos de convergência e divergência em altos e baixos níveis, adequados, concordando ainda fisicamente com a posição das anomalias de OLR obtidas pela EOF1.

O padrão obtido para a EOF2, para os dados do RegCM4, indica um deslocamento para leste em relação do padrão obtido para a EOF1, tal como observado pela comparação entre as Figuras 35 e 36. Em comparação com o padrão de EOF2 obtido para os dados do Era-Interim, a EOF2 obtida para os dados do RegCM4 indica maior inibição da convecção próximo a 120° O, enquanto o obtido com os dados do Era-Interim indica maior inibição da convecção próximo a 90° E, portanto, entre os dois conjuntos de dados há uma defasagem de 30° para leste da localização de maior inibição da convecção.

Assim como observado para os valores da EOF1, os resultados da EOF2 são fisicamente coerentes indicando que as longitudes mais propícias à convecção (com valores mínimos da EOF2 de OLR) estão associadas a divergência e convergência do ar em baixos e altos níveis e que as longitudes menos propícias à convecção (com valores máximos da EOF2 de OLR) estão associadas a convergência e divergência do ar em baixos e altos níveis.

Figura 36: Estrutura espacial da segunda componente de EOF aplicada aos dados diários de OLR, componente zonal do vento em 200 e 850 hPa, para o período de 01 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2009, para os dados da ERA Interim e do RegCM4.

4.4.3 Diagramas de Fase

Entre 01 de maio e 31 de outubro de 2005 (Figura 37 a-b), a OMJ esteve fraca em praticamente todo o período, tanto para os dados da ERA Interim (Figura 37a) quanto para os dados do RegCM4 (Figura 37b), o que é indicado pelos baixos valores do índice de OMJ, próximos à origem do diagrama, com exceção dos 15 primeiros dias do mês de maio para os produtos da ERA Interim, em que é possível observar maior amplitude ($PC1^2 + PC2^2$) da trajetória.

Figura 37: Diagramas de fase para o período de 01/05/2005 a 31/10/2005 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados.

A análise do 2º período (Figuras 38 a-b), compreendido entre 01 de novembro de 2005 e 30 de abril de 2006, indica que a OMJ apresentou, em média, maior atividade entre os meses de dezembro de 2005 e fevereiro de 2006 tanto para os dados do ERA Interim (Figura 38a) quanto para os dados do RegCM4 (Figura 38b) quando comparada à atividade referente ao período anterior e posterior, 1º e 3º subperíodos (Figuras 37 e 39).

Figura 38: Diagramas de fase para o período de 01/11/2005 a 30/04/2006 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados.

O 3° subperíodo, compreendido entre 01 de maio de 2006 e 31 de outubro de 2006 (Figuras 39 a-b) a OMJ apresentou valores mais baixos da amplitude do vetor Z, se comparado ao subperíodo anterior, particularmente a análise referente aos dados da ERA Interim.

Figura 39: Diagramas de fase para o período de 01/05/2006 a 31/10/2006 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados.

O final do ano de 2006, bem como o início do ano de 2007 (Figuras 40 a-b), são marcados pela presença de anomalias quentes da TSM do Oceano Pacífico (Tabela 5). Verifica-se através dos dados da ERA Interim, pouca atividade da MJO durante o 4° subperíodo. Os valores mais baixos da amplitude do vetor Z apresentados na Figura 40a, podem ter relação com a predominância de anomalias quentes no Oceano Pacífico, tal como descrito na Tabela 6.

Dentre os subperíodos considerados, o que se estende de novembro de 2006 a abril de 2007 (Figura 40 a-b) apresenta as maiores diferenças entre os ciclos de vida calculados para os dados do Era Interim e RegCM4, sendo que o ciclo de vida para os dados do Era Interim apresenta valores menores em relação aos obtidos para os dados do RegCM4.

Figura 40: Diagramas de fase para o período de 01/11/2006 a 30/04/2007 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados.

Padrões semelhantes de atividade da OMJ são encontrados no diagrama de fase do 5° subperíodo (Figuras 41 a-b) em relação aos apresentados no subperíodo anterior. Entretanto, diferentemente do 4° subperíodo, em que há o predomínio de anomalias quentes de TSM, verifica-se a predominância de anomalias negativas (superiores a 0,5°C), do ONI relativas ao 5° subperíodo, com início no trimestre junho, julho e agosto (JJA) do ano de 2007 e término no trimestre maio, junho e julho (MJJ) do ano de 2008 (Tabela 5).

Figura 41: Diagramas de fase para o período de 01/05/2007 a 31/10/2007 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados.

O mês de agosto de 2007 marca o início de um episódio de LN (Tabela 5), que se estende até junho de 2008. Durante este período, as anomalias negativas de TSM são acompanhadas por maior atividade da OMJ, principalmente entre os meses de novembro de 2007 e abril de 2008 (Figura 42 a-b), sendo as maiores magnitudes encontradas na fase 8, durante o mês de fevereiro de 2008.

Figura 42: Diagramas de fase para o período de 01/05/2007 a 31/10/2007 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados.

Entre 01 de maio e 31 de outubro de 2008 (Figura 43 a,b), a OMJ esteve fraca em praticamente todo o período, tanto para os dados da ERA Interim (Figura 43a) quanto para os dados do RegCM4 (Figura 43b), o que é indicado pelos baixos valores do índice de OMJ, próximos à origem do diagrama.

Figura 43: Diagramas de fase para o período de 01/05/2008 a 31/10/2008 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados.

No 8º subperíodo (Figuras 44 a-b), verifica-se a ocorrência de um episódio LN (Tabela 5) a partir do trimestre outubro, novembro e dezembro (OND), permanecendo assim até o trimestre fevereiro, março, abril (FMA) do ano de 2009.

De acordo com os dados da Era Interim, a OMJ esteve mais ativa durante os meses de março e abril do ano de 2009, enquanto que para o diagrama do RegCM4, as maiores magnitudes são encontradas nos meses de janeiro e fevereiro de 2009.

Figura 44: Diagramas de fase para o período de 01/11/2008 a 30/04/2009 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados.

Quanto ao 9º subperíodo, a partir do trimestre junho, julho e agosto (JJA) de 2009 verificamos a presença de EN (Tabela 5) e, novamente, a supressão da OMJ em ambas as análises (Figuras 45 a-b), exceção do mês de maio, para os dados da ERA Interim.

Figura 45: Diagramas de fase para o período de 01/05/2009 a 30/09/2009 para os dados da ERA Interim (figura à direita) e do RegCM4 (figura à esquerda). Os meses são indicados pelas cores. Os números escritos nas trajetórias representam o dia do mês. As fases da OMJ, 1 a 8, estão indicadas sucessivamente no diagrama seguindo a rotação anti-horária. O instante inicial e final da série temporal considerada são indicados por círculos pretos fechados.

4.4.4 Distribuição espacial do ciclo de vida da OMJ

O ciclo de vida da OMJ pode ser observado através da análise de EOF aplicada às variáveis ROL e componente zonal do vento em 200 e 850 hPa. As Figuras 46 a 51 constituem composições do padrão espacial diário obtido pela análise de EOF.

A fase da OMJ é estabelecida pelo índice da OMJ, tal como apresentado nos métodos. Apesar da análise multivariada de EOF ter sido realizada conjuntamente para todos os meses do período selecionado (de janeiro de 2005 a dezembro de 2009), os resultados são apresentados de forma separada para os períodos 2005-2006, 2007-2008 e 2008-2009.

Na análise dos ciclos de vida da OMJ, a partir dos produtos da Era Interim, para os meses de maio a outubro e de novembro a abril dos anos de 2005 a 2009, em geral, é possível observar na Fase 1, anomalias positivas de ROL no oceano Índico, em suas porções sul e oeste, no subcontinente indiano, costa nordeste do continente africano, sudeste asiático e Oceano Pacífico oeste equatorial. Já na África central, norte da América do Sul, América central e próximo à costa oeste do México são encontradas anomalias negativas.

Na Fase 2, observa-se a intensificação das anomalias negativas de ROL, em relação à fase anterior, sobre o oceano Índico e uma extensa área até a Austrália. Na América do Sul, verifica-se a diminuição da área sobre a influência de valores de ROL negativa. Observamos anomalias de oeste dos alísios na faixa equatorial do Pacífico Leste, próximo à América Central, juntamente a anomalias negativas (azul) de ROL para a faixa de frequência de P1 e P2.

Na Fase 3, observa-se a intensificação das anomalias negativas de ROL sobre o oceano Índico, e a desintensificação sobre a costa oeste do México, América Central e norte da América do Sul. Anomalias de oeste e de ROL negativas são observadas a partir desta fase sobre o oceano Índico.

Durante a Fase 4, anomalias positivas de ROL e de leste nos Ventos Alísios, ao norte da América do Sul, Atlântico Norte, costa oeste mexicana e oeste do Pacífico, no período compreendido entre os anos de 2005-2006. Entre os anos de 2007-2008 e 2008-2009 é possível observar um dipolo de anomalias positivas (negativas) de ROL sobre o Atlântico Norte (Sul). Sobre a América do Sul, a faixa P3 e P4 apresentam o escoamento do ar em 850 hPa característico de verão.

Na Fase 5, ocorre a expansão das anomalias negativas de ROL e dos ventos de oeste em direção à Indonésia e o sudeste asiático, o aparecimento de anomalias positivas de ROL e dos ventos de leste sobre o Continente Africano, costa oeste do México e América Central, além do norte e nordeste do Brasil.

Na fase 6, verifica-se sobre o Oceano Índico, em sua porção centro-norte, passa a apresentar anomalias positivas de ROL que se expandem para norte, permanecendo com o mesmo padrão até a Fase 8.

Nas Fases 7 e 8, há a intensificação das anomalias positivas de ROL sobre o Oceano Índico e no subcontinente indiano e a expansão das mesmas sobre a Austrália. Anomalias negativas de ROL são encontradas sobre o sudeste da América do Sul, permanecendo desta forma até a fase 8.

Para o modelo RegCM4, as anomalias negativas de ROL, de modo geral, iniciam entre a costa leste do continente africano e o setor oeste do subcontinente indiano, caracterizando as Fases 1 e 2. Estas anomalias negativas tendem a se desintensificar e, a partir da Fase 3, as localidades acima mencionadas passam a apresentar anomalias positivas de ROL, permanecendo desta maneira até a Fase 6.

Entre a Fase 1 e 5 é possível observar o deslocamento de anomalias negativas de ROL e dos Alísios de oeste do Oceano Índico em direção à Indonésia.

Nas fases 6 a 8, anomalias negativas de ROL e dos ventos de oeste sobre o centro norte da América do Sul concomitantemente às anomalias negativas observadas sobre o Oceano Índico

Figura 46: Composições de ciclo de vida da OMJ entre os meses de maio a outubro dos anos de 2005 a 2006, utilizando-se o filtro passa-banda de 30-60 dias entre a anomalia de ROL diária (cores) e anomalias de vento (u) e (v) em 850 mb (vetores) do ERA Interim (figuras à direita) e do RegCM4 (figuras à esquerda). O vetor de referência (ms^{-1}) é mostrado na parte inferior à direita. O número de dias usados para gerar a composição em cada fase é mostrado no lado direito de cada painel bem como a fase, por exemplo, P1:15 refere-se à Fase 1 composta por 15 dias.

Figura 47: Composições de ciclo de vida da OMJ entre os meses de novembro a abril dos anos de 2005 a 2006, utilizando-se o filtro passa-banda de 30-60 dias entre a anomalia de ROL diária (cores) e anomalias de vento (u) e (v) em 850 mb (vetores) do ERA Interim (figuras à direita) e do RegCM4 (figuras à esquerda). O vetor de referência (ms^{-1}) é mostrado na parte inferior à direita. O número de dias usados para gerar a composição em cada fase é mostrado no lado direito de cada painel bem como a fase, por exemplo, P1:15 refere-se à Fase 1 composta por 15 dias.

Figura 48: Composições de ciclo de vida da OMJ entre os meses de maio a outubro dos anos de 2007 a 2008, utilizando-se o filtro passa-banda de 30-60 dias entre a anomalia de ROL diária (cores) e anomalias de vento (u) e (v) em 850 mb (vetores) do ERA Interim (figuras à direita) e do RegCM4 (figuras à esquerda). O vetor de referência (ms^{-1}) é mostrado na parte inferior à direita. O número de dias usados para gerar a composição em cada fase é mostrado no lado direito de cada painel bem como a fase, por exemplo, P1:15 refere-se à Fase 1 composta por 15 dias.

Figura 49: Composições de ciclo de vida da OMJ entre os meses de novembro a abril dos anos de 2007 a 2008, utilizando-se o filtro passa-banda de 30-60 dias entre a anomalia de ROL diária (cores) e anomalias de vento (u) e (v) em 850 mb (vetores) do ERA Interim (figuras à direita) e do RegCM4 (figuras à esquerda). O vetor de referência (ms^{-1}) é mostrado na parte inferior à direita. O número de dias usados para gerar a composição em cada fase é mostrado no lado direito de cada painel bem como a fase, por exemplo, P1:15 refere-se à Fase 1 composta por 15 dias.

Figura 50: Composições de ciclo de vida da OMJ entre os meses de maio a outubro dos anos de 2008 a 2009, utilizando-se o filtro passa-banda de 30-60 dias entre a anomalia de ROL diária (cores) e anomalias de vento (u) e (v) em 850 mb (vetores) do ERA Interim (figuras à direita) e do RegCM4 (figuras à esquerda). O vetor de referência (ms^{-1}) é mostrado na parte inferior à direita. O número de dias usados para gerar a composição em cada fase é mostrado no lado direito de cada painel bem como a fase, por exemplo, P1:15 refere-se à Fase 1 composta por 15 dias.

Figura 51: Composições de ciclo de vida da OMJ entre os meses de novembro a abril dos anos de 2008 a 2009, utilizando-se o filtro passa-banda de 30-60 dias entre a anomalia de ROL diária (cores) e anomalias de vento (u) e (v) em 850 mb (vetores) do ERA Interim (figuras à direita) e do RegCM4 (figuras à esquerda). O vetor de referência (ms^{-1}) é mostrado na parte inferior à direita. O número de dias usados para gerar a composição em cada fase é mostrado no lado direito de cada painel bem como a fase, por exemplo, P1:15 refere-se à Fase 1 composta por 15 dias.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a habilidade do Modelo Regional Climático (RegCM4) em simular a variabilidade temporal e espacial do sinal associado à propagação da Oscilação de Madden-Julian nos trópicos. A avaliação resultou na comparação entre os dados observados obtidos do conjunto da Reanálise do ERA-Interim e dos dados simulados pelo RegCM4, para o período de 2005 a 2009.

A simulação do modelo utilizou como condição inicial a opção da banda tropical (Coppola et al. 2012), cuja principal inovação é a de simular as características tanto da circulação quanto dos padrões de precipitação tropicais. Como a configuração da banda tropical é feita para um grande domínio entre 45°N a 45°S Coppola et al. 2012, argumenta que as condições dos limites laterais do modelo têm uma menor influência sobre as simulações, quando comparados aos processos tradicionais de simulação oferecidos pelo RegCM4.

A análise dos resultados de forma geral, demonstrou localidades que guardam tanto semelhanças entre aquilo que foi observado e o que foi simulado, quanto diferenças significativas. Um exemplo de diferença significativa pôde ser observado entre a simulação do modelo RegCM4, ter apresentado valores mínimos de ROL para a região sul da América do Sul (entre < 200 e 220 Wm^{-2}), para os meses de maio a outubro, e a ROL do ERA Interim, ter demonstrado em nenhum dos meses acima elencados, padrões semelhantes tal como pôde ser observado nas Figuras 24 e 25.

A análise dos padrões de ROL sobre o oceano Pacífico tropical oeste, Indonésia, sudeste asiático, porção central do continente Africano e centro sul do oceano Índico, demonstrou a ocorrência de valores mínimos de ROL presentes principalmente entre os meses de junho a setembro apresentando valores mínimos próximos de 200 Wm^{-2} , tanto nos dados do ERA Interim (Figura 24) quanto nos dados do RegCM4 (Figura 25), entre a costa leste da Índia e a costa oeste do sudeste asiático, indicando convecção profunda nestas localidades, tal como

indicam as Figuras 26 e 27. Os dados simulados superestimaram a precipitação em relação aos dados do ERA Interim.

Os resultados de forma geral, demonstraram que o BIAS calculado entre o modelo e a precipitação do GPCP, para as estações secas (MAI-OUT) e chuvosas (NOV-ABR) mostrou que para a América do Sul, Sul do continente Africano e Índico, o modelo superestima os valores de precipitação do GPCP nas duas estações do ano. A superestimativa da precipitação também pode ser observada no trabalho de PEREIRA, 2012.

Quanto à análise multivariada, embora os valores simulados pelo RegCM4 para a faixa latitudinal equatorial demonstrem grande discrepância na localização das áreas com convergência e divergência máximas, apresentaram posições dos valores máximos de convergência e divergência em altos e baixos níveis, adequados, concordando ainda que fisicamente, com a posição das anomalias de ROL obtidas pela EOF1 (Figura 35). O mesmo pode ser verificado na análise dos resultados da EOF2 (Figura 36).

Para futuros estudos sugere-se como possível caminho para melhoria da estimativa tanto da precipitação quanto da ROL do modelo, a alteração dos coeficientes utilizados nas parametrizações cúmulos presentes atualmente, no RegCM4.

6. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ADAMS, D. K.; COMRIE, A.C., The North American Monsoon, **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 78, n. 10, p. 2197-2213, October, 1997.

ÁVILA, P.L.R.; SOUZA, E.B.; PINHEIRO, A.N. Simulação da precipitação sazonal com o Regcm4 sobre o estado do Pará para anos de El niño e La Niña. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 5, p. 1316-1335, 2013.

BIOND, F.; GERSHUNOV, A.; CAYAN, D.R. North Pacific Decadal Climate Variability since 1661. **Letters**, v.14, Issue 1, p. 5-10, January, 2001.

BJERKNES, J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to Equatorial anomalies of ocean temperature. **Tellus**, v.18, Issue. 4, p. 820-829, 1966.

BJERKNES, J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. **Monthly Weather Review**, v.97, Issue 3, p. 163-172, March, 1969.

CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, Issue 1, January, 2004.

COPPOLA, E.; GIORGI, L.; MARIOTTI, L.; BI, X. RegT-Band: a tropical band version of RegCM4. **Climate Research**, v. 52, p. 115-133, March, 2012.

COSTA NETO, P.L. de O. (1939), **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 264p.

CUADRA, S.V.; DA ROCHA R.P. Simulação numérica do clima de verão sobre o sudeste do Brasil e sua variabilidade. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 2, p. 271–282, Agosto, 2006.

DA ROCHA, R.P.; MORALES, C. A.; CUADRA, S. V.; AMBRIZZI, T. Precipitation diurnal cycle and summer climatology assessment over South America: An evaluation of Regional Climate Model version 3 simulations. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, D10108, May, 2009.

DAKSHINARMUT, J.; KESHAVAMURTY, R.N. On oscillations of period around one month in the Indian summer monsoon. **Indian Journal of Meteorology & Geophysics**, v. 27, p. 201-203, 1976.

DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S. B.; HERSBACH, H.; HÓLM, E. V.; ISAKSEN, L.; KÅLLBERG, P.; KÖHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCRETTE, J.-J.; PARK, B.-K.; PEUBEY, C.; DE ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J.N.; VITART, F. The ERA-Interim Reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 137: 553–597, April, 2011. doi: 10.1002/qj.828

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

ECMWF - ERA-INTERIM <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.828/abstract>

EMANUEL, K.A. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 48, n. 21 pp. 2313-2335, November, 1991.

EDBON, R.A. Notes on wind flow at 50mb in tropical and sub-tropical regions in january 1957 and january 1958. **Quarterly journal of the Royal Meteorological Society**, v. 86, iss. 370, p. 540-542, October, 1960.

FERNANDEZ, J.P.R.; FRANCHITO S. H.; RAO V. B. Simulation of summer circulation over South American by two regional climate models. part II: A comparison between 1997/1998 El Niño and 1998/1999 La Niña events, **Theoretical and Applied Climatology**, v. 86, iss. 1, p. 261–270, May, 2006.

GIORGI, F.; MARINUCCI, M.R.; BATES, G.T. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes. **Monthly Weather Review**, v. 121, Issue. 10, p. 2749–2813, October 1993.

GIORGI, F.; BI, X. A study of internal variability of a regional climate model, **Journal of Geophysical Research**, v. 105, iss. D24, p. 29503-29521, December, 2000.

GIORGI, F.; COPPOLA, E.; SOLMON, F.; MARIOTTI, L.; SYLLA, M. B.; BI, X.; ELGUINDI, N.; DIRO, G. T.; NAIR, V.; GIULIANI, G.; TURUNCOGLU, U. U.; COZZINI, S.; GÜTTLER, I.; O'BRIEN, T. A.; TAWFIK, A. B.; SHALABY, A.; ZAKAY, A. S.; STEINER, A. L.; STORDAL, F.; SLOAN, L. C.; BRANKOVIC, C. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains, **Climate Research**, v. 52, p. 7-29, March, 2012.

GIORGI F. Regional climate modeling: Status and perspectives. **Journal de Physique IV**, n. 139, p. 101-118, December, 2006.

GRELL, G.A., Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parametrization. **Monthly Weather Review**, v. 121, p. 764-787, March, 1993.

HASTENRATH, S. Dynamics of the Pacific Equatorial dry zone. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 71, ISS. 3, p. 243-254, December, 1999.

HENDON, H.H.; LIEBMANN, B. The intraseasonal (30-50 day) oscillation of the Australian summer Monsoon. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 47, n. 24, p. 2225-2237, December, 1990.

HELDON, H.H.; SALBY, M.L. The life cycle of the Madden-Julian Oscillation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 51, n. 15, p. 2909-2923, August, 1994.

HOLTON, J.R.; LINDZEN, R. A note on "Kelvin" waves in the atmosphere. **Monthly Weather Review**, v. 98, iss. 6, June, 1968.

HOLTON, J.R., **An introduction to dynamic meteorology**, 44.ed. San Diego, California: Elsevier Academic Press, 2004. 535p.

HUFFMAN, G.J.; ADLER, R.F.; MORRISSEY, M.; BOLVIN, D.T.; CURTIS, S., JOYCE, R.; MCGAVOCK, B.; SUSSKIND, J. Global Precipitation at one-degree daily resolution from multi-satellite observations. **J. Hydrometeor.**, 2, 36-50, 2001.

HURRELL, J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. **Sciences**, New Series, v.269, n.5224, p.676-679, August, 1995.

JONES, C. A homogeneous stochastic model of the Madden-Julian Oscillation. **Journal of Climate**, v. 22, iss. 12, p. 3270-3288, June, 2009.

JONES, C.; CARVALHO, L.M.V. Spatial-intensity variations in extreme precipitation in the contiguous United States and the Madden-Julian Oscillation. **Journal of Climate**, v. 25, iss. 14, p. 4898-4913, July, 2012.

KAYANO, M.T.; KOUSKY, V.E. Intraseasonal (30–60 day) variability in the global tropics: principal modes and their evolution. **Tellus A**, v. 51, iss. 3, p. 373-386, May, 1999.

KAYANO, M.T.; JONES, C.; DIAS, P.L.S. Variabilidade Decenal Intrassazonal. In: CAVALVANTI, I.F.A. et al. (org), **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, cap.21, p.337-351.

KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project, **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.77, n.3, March, 1996.

KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J.; YANG, S.-K; HNILO, M.; FIORINO, M.; POTTER, G.L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R2). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, iss. 11, p. 1631-1643, November, 2002.

KAYANO, M.T.; JONES, C.; DIAS, P.L.S. Variabilidade Decenal Intrassazonal. In: CAVALVANTI, I.F.A. et al. (org), **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, cap.21, p.337-351.

KILADIS, G.N.; WEICKMANN, K.M. Circulation anomalies associated with tropical convection during northern winter. **Monthly Weather Review**, v. 120, ISS. 9, p. 1900-1923, September, 1992.

KNUTSON, T.R.; WEICKMANN, K.M. 30-60 day atmospheric oscillations: Composite life cycles of convection and circulation anomalies. **Monthly Weather Review**, v. 115, iss. 7, p. 1407-1436, July, 1987.

KOUSKY, V.; KAYANO, M.T. Principal modes of outgoing longwave radiation and 250-mb circulation for the South American Sector. **Journal of Climate**, v. 7, p. 1131-1143, July 1994.

RISHNAMURTI, T.N.; OOSTERHOF, D.K.; MEHTA, A.V. Air-Sea interaction on the time scale of 30-60 days. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 45, n. 8, p. 1304-1322, April, 1988.

LAU, K.-M; CHAN, P.H. Aspects of the 40-50 Day Oscillation during the Northern Winter as inferred from Outgoing Longwave Radiation. **Monthly Weather Review**, v. 113, ISS. 11, p. 1889-1909, November, 1985.

LAU, K.-M; CHAN, P.H. The 40-50 day Oscillation and the El Niño/Southern Oscillation: A new perspective. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 67, n. 5, May, 1986.

LIEBMANN, B.; HARTMANN, D.L. An observational study of tropical-midlatitude interaction on intraseasonal time scales during winter. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 41, iss. 23, p. 3333-3350, December, 1994.

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

LORENZ, E.N. **The nature and theory of the general circulation of the atmosphere**, World Meteorological Organization, 1967. 161p.

MCPHADEN, M.J. El Niño and La Niña: causes and global consequences. Volume I, The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change. In: MACCRACKEN, M.C., PERRY, J.S., Eds. **Encyclopedia of Global Environmental Change**, p. 353-370, 2002.

MUSK, L.F. (1988), **Weather Systems**. New York: Cambridge University Press, 1996, 158p.

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, iss. 5, p. 702-708, July, 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, iss. 6, p. 1109-1123, September, 1972.

MADDEN, R.A.; JULIAN, P.R. Observations of the 40-50-day Tropical Oscillation – A review. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 814-837, May, 1994.

MANTUA, N.J., et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, iss. 6, p. 1069-1079, June, 1997.

MATTHEWS, A.J. Propagation mechanisms for the Madden-Julian Oscillation. **Quarterly journal of the Royal Meteorological Society**, v. 126, n. 569, October, 2000 Part A.

NAKAZAWA, T. Tropical super clusters within intraseasonal variations over the western Pacific. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 66, p. 823-839.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of Sea Surface Temperature, Wind Stress and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, iss. 10, p. 2464-2479, October, 1996.

PAL, J. S.; GIORGI, F.; BI, X.; ELGUINDI, N.; SOLMON, F.; GAO, X.; RAUCHER, S. A.; FRANCISCO, R. A.; ZAKY, A.; WINTER, J.; AHFAQ, M.; SYED, F. S.; BELL, J. L.; DIFFENBAUGH, N. S.; ARMACHARYA, J. K.; KONARÉ, A.; MARTINEZ, D.; ROCHA, R. P. da; SLOAN, L. C.; STEINER, A. L. Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET. **Bulletim of the American Meteorological Society (BAMS)**, v. 88, pp. 1397-1409, September, 2007.

PARKER, D.E. Equatorial Kelvin waves at 100 millibars. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 99, iss. 419, p. 116-129, January, 1973.

PEREIRA, G. **Impactos das atualizações do uso e cobertura da terra e das características físico-químicas da vegetação na América do Sul em modelos climáticos**. 2012. 111 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

RAIA, A.; CAVALCANTI, I.F.A. The life cycle of the South American Monsoon system, **Journal of Climate**, vol. 21, pp. 6227-6246, December, 2008.

RAMAGE, C.S. **Monsoon Meteorology**. Academic Press, New York, 1971, 296p.

RAUSCHER, S.A.; SETH, A.; LIEBMANN, B.; QIAN, J.-H.; CAMARGO, S.J. Regional climate model–simulated timing and character of seasonal rains in South America. **Monthly Weather Review**, v. 135, iss. 7, 2642–2657, July, 2007

ROPELEWSKI, C.F; HALPERT, M.S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v.115, p.1606-1626, August, 1987.

ROSSBY, C.G. The scientific basis of the modern meteorology. In: **Yearbook of Agriculture, Climate and Man**. U.S. Gov. p.599-655, 1941.

RUI, H.; WANG, B. Development characteristics and dynamic structure of tropical intraseasonal convection anomalies. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 47, n. 3, p. 357-379, February, 1990.

SOUZA, E. B.; AMBRIZZI, T. Modulation of the intraseasonal rainfall over tropical Brasil by the Madden-Julian Oscillation. **International Journal of Climatology**, v. 26, iss. 13 p. 1759-1776, November, 2006.

TRENBERTH, K.E. The definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.78, n.12, p.2771-2777, December, 1997.

WALISER, D. et. al. MJO simulation diagnostics. **Journal of Climate**, v. 22, iss. 11, June, 2009.

WALKER, G.T. (1924) Correlation in seasonal variations of weather, IX. A further study of world weather. **Memoirs of the India Meteorological Department**, v. XXIV, p.275-333, Calcutta, 1926. Disponível em: <<http://www.rmets.org/publications/classic-papers>>. Acessado em 01/11/2016.

WANG, B.; RUI H. Synoptic climatology of transiente tropical intraseasonal convection anomalies: 1975-1985. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 44, iss. 1-4, p. 43-61, March, 1990.

WEICKMANN, K.M.; LUSSKY, G.R.; KUTZBACH, J.E. Intraseasonal (30-60 day) fluctuations of outgoing longwave radiation and 250 mb streamfunction during northern winter. **Monthly Weather Review**, v. 113, iss. 6, June, 1985.

WHEELER, M.C.; HENDON, H.H. An all-season real-time Multivariate MJO Index: Development of na Index for monitoring and prediction. **Monthly Weather Review**, v. 132, p. 1917-1932, iss. 8, August, 2004.

WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2.ed. San Diego, California: Academic Press, 2006. 627p.

WYRTKI, K., El Niño – the dynamic response of the equatorial Pacific ocean to atmospheric forcing. **Journal of Physical Oceanography**, v.5, iss.4, p.572-584, October, 1975.

ZANGVIL, A. Temporal and spatial behavior of large-scale disturbances in tropical cloudiness deduced from satellite brightness data. **Monthly Weather Review**, v. 103, iss. 10, p. 904-920, October, 1975.