



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

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/02.28.18.10-TDI

**ESTUDO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS APLICADAS  
NA PARAMETRIZAÇÃO DE FRAÇÃO DE NUVENS  
PARA REPRESENTAR A INTERAÇÃO ENTRE  
NUVEM-RADIAÇÃO**

Layrson de Jesus Menezes Gonçalves

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Paulo Yoshio Kubota, e Simone Marilene Sievert da Costa, aprovada em 04 de março de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46EDAF8>>

INPE  
São José dos Campos  
2022

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



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

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/02.28.18.10-TDI

**ESTUDO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS APLICADAS  
NA PARAMETRIZAÇÃO DE FRAÇÃO DE NUVENS  
PARA REPRESENTAR A INTERAÇÃO ENTRE  
NUVEM-RADIAÇÃO**

Layrson de Jesus Menezes Gonçalves

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Paulo Yoshio Kubota, e Simone Marilene Sievert da Costa, aprovada em 04 de março de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46EDAF8>>

INPE  
São José dos Campos  
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Gonçalves, Layrson de Jesus Menezes.

G586e      Estudo das condições ambientais aplicadas na parametrização de fração de nuvens para representar a interação entre nuvem-radiação / Layrson de Jesus Menezes Gonçalves. – São José dos Campos : INPE, 2022.

xxiii + 137 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/02.28.18.10-TDI)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.

Orientadores : Drs. Paulo Yoshio Kubota, e Simone Marilene Sievert da Costa.

1. Dados observacionais. 2. Modelagem climática. 3. Fração de nuvem. 4. Interação nuvem-radiação. 5. BAM. I.Título.

CDU 551.509.313

---



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

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



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES

## INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

DEFESA FINAL DE DOUTORADO DE LAYRSON DE JESUS MENEZES GONÇALVES  
BANCA Nº 042/2022 , REG. 133752/2017.

No dia 04 de março de 2022, as 14h00, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi **APROVADO(A)** pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutor em Meteorologia. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca e revisão final pelo(s) orientador(es).

**Título:** “ESTUDO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS APLICADAS NA PARAMETRIZAÇÃO DE FRAÇÃO DE NUVENS PARA REPRESENTAR A INTERAÇÃO ENTRE NUVEM-RADIAÇÃO”.

**Membros da Banca:**

Dr. Marcus Jorge Bottino - Presidente – INPE / DIMNT

Dr. Paulo Yoshio Kubota- Orientador - INPE/CPTEC

Dra. Simone Marilene Sievert da Costa - Orientadora - INPE/CPTEC

Dra. Maria Luciene Dias de Melo - Membro externo - UFAL/ICAT

Dr. Nilton Manuel Évora do Rosário - Membro externo – UNIFESP/ICAQF



Documento assinado eletronicamente por **Simone Marilene Sievert da Costa Coelho, Pesquisadora**, em 07/03/2022, às 16:19 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Yoshio Kubota, Pesquisador**, em 07/03/2022, às 16:52 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Luciene dias de melo (E), Usuário Externo**, em 08/03/2022, às 13:23 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Nilton Manuel Évora do Rosário (E), Usuário Externo**, em 16/03/2022, às 13:10 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **marcus jorge bottino (E)**, **Usuário Externo**, em 30/03/2022, às 13:35 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **9508567** e o código CRC **73B7B014**.

---

Referência: Processo nº 01340.001430/2022-74

SEI nº 9508567

Dedico esta conquista, a minha vó *Conceição Cid Menezes (in memoriam)* e aos meus pais *Waldemont Nunes Gonçalves (in memoriam)* e *Maria Lúcia Menezes Gonçalves*, pela educação que me deram e por me ensinar a sempre lutar pelos meus objetivos.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Dra. Simone Coelho e Dr. Paulo Kubota por todo o apoio, tempo dedicado e conhecimento compartilhado para a realização desse trabalho.

À Dra. Dayana Souza pela grande ajuda na organização do documento de tese.

Ao Dr. Bruno Guimarães, Dr. Cristiano Eichholz, Dr. Domingo Cassain e Me. Joao Chinchay pela ajuda nas linguagens de programação Python e GrADS.

Aos docentes do Programa de Pós-graduação em Meteorologia do INPE pelo conhecimento compartilhado.

Aos membros da banca pela disponibilidade de tempo e interesse em participar da minha defesa de tese.

À minha mãe Maria Lúcia, irmã Larissa Gonçalves, namorada Fabíola Valente, demais familiares e amigos que me apoiaram nessa jornada e acreditaram na minha vitória.

Aos órgãos de fomento: CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo auxílio financeiro durante o doutorado.



## RESUMO

Este estudo teve como objetivo compreender as relações entre as variáveis de larga escala (temperatura, omega e umidade relativa) e fluxo de radiação de onda curta e onda longa com a fração de nuvem combinando dados de modelagem de alta resolução e dados observacionais, visando o desenvolvimento de uma nova parametrização de fração de nuvens para obter uma melhor representação da nebulosidade em um modelo atmosférico global. Para isso, foi feito um estudo observacional e de modelagem de alta resolução, utilizando um *Cloud Resolving Model* (CRM) chamado de *System for Atmospheric Modeling* (SAM), com a finalidade de encontrar relações entre variáveis atmosféricas que pudessem ser usadas na nova parametrização de fração de nuvem. Foi desenvolvida uma parametrização de fração de nuvem baseada na distribuição de Weibull aplicada nas variáveis prognósticas de concentração de água líquida e gelo, que primeiramente, foi testada em um modelo de interação nuvem-radiação e por fim implementada e avaliada no *Brazilian Atmospheric Model* (BAM), em simulação climática global para o período de 1975 a 2010. Os resultados indicaram que as anomalias, em relação à média do dia anterior, de temperatura, umidade relativa e ômega, além do conteúdo de água, são variáveis que podem ser utilizadas na estimativa da fração de nuvem. A nova parametrização de fração de nuvem desenvolvida neste trabalho mostrou um bom desempenho na interação com os fluxos de radiação de onda curta e onda longa e as taxas de aquecimento para distintas regiões do planeta sob diferentes condições atmosféricas. A simulação climática com BAM utilizando a nova parametrização de fração de nuvem desenvolvida neste trabalho, mostrou uma melhor representação da distribuição espacial da nebulosidade e o seu impacto nos fluxos radiativos de onda longa e onda curta na superfície e topo da atmosfera, além mostrar consistência nos campos de precipitação e de temperatura do ar a 2 metros.

Palavras chave: Dados observacionais, Modelagem climática, Fração de nuvem, Interação nuvem-radiação, BAM.





# **STUDY OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS APPLIED IN THE PARAMETRIZATION OF CLOUD FRACTION TO REPRESENT THE CLOUD-RADIATION INTERACTION**

## **ABSTRACT**

This study aimed to understand the relationships between large-scale variables (temperature, omega and relative humidity) and short-wave and long-wave radiation flux with the cloud fraction by combining high-resolution modeling data and observational data, aiming at the development of a new cloud fraction parameterization to obtain a better representation of cloudiness in a global atmospheric model. For this, an observational and high-resolution modeling study was carried out, using a Cloud Resolving Model (CRM) called System for Atmospheric Modeling (SAM), in order to find relationships between atmospheric variables that could be used in the new parameterization of cloud fraction. A cloud fraction parameterization was developed based on the Weibull distribution applied to the prognostic variables of liquid water and ice concentration, which was first tested in a cloud-radiation interaction model and finally implemented and evaluated in the Brazilian Atmospheric Model (BAM), in a global climate simulation for the period from 1975 to 2010. The results indicated that the anomalies, in relation to the average of the previous day, of temperature, relative humidity and omega, in addition to the water content, are variables that can be used in the estimation of the cloud fraction. The new cloud fraction parameterization developed in this work showed a good performance in the interaction with shortwave and longwave radiation fluxes and heating rates for different regions of the planet under different atmospheric conditions. The climate simulation with BAM using the new cloud fraction parameterization developed in this work, showed a better representation of the spatial distribution of cloudiness and its impact on long-wave and short-wave radiative fluxes at the surface and top of the atmosphere, in addition to showing consistency in the fields of precipitation and air temperature at 2 meters.

Keywords: Observational data, Climate modeling, Cloud fraction, Cloud-radiation interaction, BAM.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 - Localização das áreas de estudo. TWP (Darwin, Manus e Nauru), GoAmazon 2014/15 (T3) e do ETPO. ....	21
Figura 3.2 - Área de coleta de dados do Experimento GoAmazon 2014/15. ....	23
Figura 4.1 - Série temporal da fração de nuvem integrada, taxa de precipitação e fluxo de radiação de onda curta para a IOP1. ....	39
Figura 4.2 - Série temporal da fração de nuvem integrada, taxa de precipitação e fluxo de radiação de onda curta para a IOP2. ....	40
Figura 4.3 - Histograma de distribuição da fração de nuvem integrada para os dados observados e simulados com o modelo SAM para os períodos das IOP1 e IOP2. ....	42
Figura 4.4 - Ciclo diário da nebulosidade, fluxos de radiação e anomalias das variáveis de larga escala para o dia 21 de fevereiro de 2014. ....	47
Figura 4.5 - Ciclo diário da nebulosidade, fluxos de radiação e anomalias das variáveis de larga escala para o dia 04 de outubro de 2014. ....	49
Figura 4.6 - Dispersão entre a fração de nuvens observada e radiação de onda longa, radiação de onda curta, taxa de precipitação, valores mínimos da variância de temperatura, mínimo de omega e máximo de umidade relativa para os casos selecionados durante o IOP1. ....	52
Figura 4.7 - Dispersão entre a fração de nuvens observada e radiação de onda longa, radiação de onda curta, taxa de precipitação, valores mínimos da variância de temperatura, mínimo de omega e máximo de umidade relativa para os casos selecionados durante o IOP2. ....	53
Figura 4.8 - Dispersão entre a fração de nuvens simulada com o modelo SAM e radiação de onda longa, radiação de onda curta, anomalias de temperatura e umidade relativa, valores mínimos de anomalia de temperatura, mínimo de ômega e máximo de umidade relativa para os casos selecionados durante o IOP1 e IOP2. ....	55
Figura 4.9 - Dispersão entre a fração de nuvem e conteúdo de água líquida simuladas. ....	56
Figura 5.1 - Gráfico de dispersão da fração de nuvem do ponto T3 do GoAmazon 2014/15. ....	62
Figura 5.3 - Gráfico de dispersão da fração de nuvem para o ponto ETPO. ....	65

Figura 5.4 - Série temporal dos fluxos de radiação e efeito radiativo de nuvens (CRE) para o período da IOP1 do GoAmazon 2014/15. Simulações utilizando os dados do SAM como forçantes de larga escala. ....	69
Figura 5.5 - Série temporal dos fluxos de radiação e efeito radiativo de nuvens (CRE) para o período da IOP2 do GoAmazon 2014/15. Simulações utilizando os dados do SAM como forçantes de larga escala. ....	70
Figura 5.6 - Série temporal dos fluxos de radiação e efeito radiativo de nuvens (CRE) para o período da IOP1 do GoAmazon 2014/15. Simulações utilizando os dados do ERA5 como forçantes de larga escala. ....	71
Figura 5.7 - Série temporal dos fluxos de radiação e efeito radiativo de nuvens (CRE) para o período da IOP2 do GoAmazon 2014/15. Simulações utilizando os dados do ERA5 como forçantes de larga escala. ....	72
Figura 5.8 - Simulações das taxas de aquecimento/resfriamento radiativo para região do GoAmazon 2014/15 utilizando dados do SAM como forçantes. ....	76
Figura 5.9 - Simulações das taxas de aquecimento/resfriamento radiativo para região do GoAmazon 2014/15 utilizando dados do ERA5 como forçantes. ....	78
Figura 5.10 - Simulações do efeito radiativo das nuvens nas taxas de aquecimento/resfriamento para região do GoAmazon 2014/15 utilizando dados do SAM como forçantes. ....	81
Figura 5.11 - Simulações do efeito radiativo das nuvens nas taxas de aquecimento/resfriamento para região do GoAmazon 2014/15 utilizando dados do ERA5 como forçantes. ....	83
Figura 6.1 - Climatologia Anual da cobertura total de fração de nuvens. ....	92
Figura 6.2 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação (r) entre as simulações com o modelo BAM e os dados de referência do CERES para a fração de nuvem integrada. .	95
Figura 6.3 - Climatologia dos fluxos de radiação de onda curta incidente à superfície para condições de céu claro e céu com nuvens. ....	98
Figura 6.4 - Climatologia dos fluxos de radiação de onda longa incidente à superfície para condições de céu claro e céu com nuvens. ....	100
Figura 6.5 - Climatologia das forçantes radiativas de onda curta e onda longa no topo da atmosfera. ....	103
Figura 6.6 - Climatologia de precipitação do GPCP e BAM .....	105

Figura 6.7 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação (r) da climatologia de precipitação para o verão austral.....	107
Figura 6.8 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação da climatologia de precipitação para o inverno austral. ....	109
Figura 6.9 - Climatologia da temperatura do ar a 2 metros ERA5 e BAM. ....	111
Figura 6.10 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação da climatologia de temperatura a 2 metros para o verão austral.....	113
Figura 6.11 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação da climatologia de temperatura a 2 metros para o inverno austral.....	115
Figura A.1 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação para OCIC entre as simulações com o BAM e os dados de referência.....	134
Figura A.2 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação para OCIS entre as simulações com o BAM e os dados de referência.....	135
Figura A.3 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação para OLIC entre as simulações com o BAM e os dados de referência.....	136
Figura A.4 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação para OLIS entre as simulações com o BAM e os dados de referência.....	137



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Resumo dos dados do GoAmazon 2014/15 que foram utilizados nesse trabalho. ....	24
Tabela 3.2 - Resolução da grade horizontal das simulações com o SAM.....	29
Tabela 3.3 - Resumos dos parâmetros. ....	32
Tabela 3.4 - Valores de referência para formação de nuvens.....	32
Tabela 3.5 - Configuração do BAM-3D para as simulações climáticas.....	35
Tabela 4.1 - Resumo da análise estatística entre as simulações com o modelo SAM e os dados observacionais do GoAmazon 2014/15. ....	43
Tabela 5.1 - Resumo dos coeficientes de correlação de fração de nuvem entre as simulações e os dados de referência. ....	66
Tabela 5.2 - Resumo dos valores de correção dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa observado e simulado com o CFRM. ....	74
Tabela 5.3 - Resumo dos valores de correlação entre as taxas de aquecimento/resfriamento simuladas com o CFRM e os dados de referência. ....	85





## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ARM	– Atmospheric Radiation Measurement Program
BAM	– Brazilian Atmospheric Model
BAM_ctl	– BAM com a parametrização de fração de controle
BAM_exp	– BAM com a nova parametrização de fração de nuvem
CCM	– Complexo Convectivo de Mesoescala
CERES	– Clouds and the Earth’s Radiant Energy System
CFRM	– Cloud Fraction-radiation interaction model
CFRM_ctl	– CFRM com a parametrização de fração de nuvem controle
CFRM_exp	– CFRM com a nova parametrização de fração de nuvem
CPTEC	– Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRE	– Cloud Radiative Effect
CRM	– Cloud Resolving Model
ECMWF	– European Center for Medium-Range Weather Forecasts
ENSO	– El Niño-Southern Oscillation
ETPO	– Eastern Tropical Pacific Ocean
GoAmazon	– Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon
GPCP	– Global Precipitation Climatology Project
HRLW	– Taxa de Aquecimento devido a radiação de Onda Longa
HRSW	– Taxa de Aquecimento devido a radiação de Onda Curta
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IOP1	– Período de Operação Intensiva (período úmido)
IOP2	– Período de Operação Intensiva (período seco)
LES	– Large Eddy Simulation
LW	– Fluxo de Radiação de Onda Longa
MCG	– Modelo Climático Global
OCIC	– Radiação de Onda Curta Incidente à Superfície (Céu Claro)
OCIS	– Radiação de Onda Curta Incidente à Superfície
OLIC	– Radiação de Onda Longa Incidente à Superfície (Céu Claro)
OLIS	– Radiação de Onda Longa Incidente à Superfície

SAM	– System for Atmospheric Modeling
SCM	– Single Column Model
SLM	– Simplified Land Model
SW	– Fluxo de Radiação de Onda Curta
TSM	– Temperatura da Superfície do Mar
TWP	– Tropical Western Pacific
VARANAL	– Variational Analysis
ZCIT	– Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos .....	5
1.2 Estrutura da Tese .....	6
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	8
2.1 Os diferentes tipos de nuvens .....	8
2.1.1 Processos macrofísicos .....	9
2.1.2 Processos microfísicos .....	9
2.2 A interação da radiação com as nuvens .....	10
2.3 As propriedades ópticas das nuvens .....	11
2.4 Efeito radiativo de nuvens .....	12
2.5 As diferentes metodologias aplicadas para compreender a interação nuvem-radiação e reduzir as incertezas do efeito radiativo de nuvens .....	14
2.5.1 Experimentos de campo GoAmazon 2014/15 e TWP .....	14
2.5.2 Estudos observacionais do efeito radiativo de nuvens na região tropical .....	15
2.5.3 Modelo de Resolução de Nuvens .....	17
2.5.4 Influência da nebulosidade na modelagem de tempo e clima .....	17
2.5.5 Processo de <i>feedback</i> nuvens na atmosfera .....	18
3 DADOS E METODOLOGIA .....	21
3.1 Dados e áreas de estudo .....	21
3.1.1 <i>The Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon (GoAmazon 2014/15)</i> .....	21
3.1.2 <i>Tropical Western Pacific (TWP)</i> .....	25
3.1.3 <i>Eastern Tropical Pacific Ocean (ETPO)</i> .....	26
3.1.4 ERA 5 .....	26
3.1.5 GPCP .....	27
3.1.6 CERES .....	27
3.2 Modelos numéricos .....	27
3.2.1 <i>System for Atmospheric Modeling (SAM)</i> .....	27
3.2.2 <i>Cloud Fraction-Radiation Interaction Model (CFRM)</i> .....	29

3.2.2.1	Esquema de fração de nuvem (Controle) .....	29
3.2.2.2	Novo esquema de fração de nuvem (Experimento) .....	31
3.2.2.3	Clirad.....	33
3.2.3	Modelo Atmosférico Global Brasileiro (BAM).....	34
3.3	Análises estatísticas dos resultados .....	36
4	ESTUDO DAS INTERAÇÕES ENTRE A NEBULOSIDADE-RADIAÇÃO E AS VARIÁVEIS DINÂMICAS E TERMODINÂMICAS DA ATMOSFERA, BASEADO NOS DADOS OBSERVACIONAIS DO GOAMAZON 2014/15 E EM MODELAGEM NUMÉRICA UTILIZANDO UM CLOUD RESOLVING MODEL .....	37
4.1	Sensibilidade da resolução horizontal e validação do modelo SAM .....	37
4.2	Ciclo diurno das variáveis de larga escala e fluxos de radiação .....	43
4.3	Relação entre as variáveis meteorológicas de larga escala e a fração de nuvens....	49
4.3.1	As relações entre a radiação, dinâmica e termodinâmica com a fração de nuvens a partir dos dados observados do GoAmazon 2014/15 .....	50
4.3.2	As relações entre radiação, dinâmica e termodinâmica com a fração de nuvens a partir das simulações com o SAM.....	54
4.4	Conclusão .....	56
5	UMA NOVA PARAMETRIZAÇÃO DE FRAÇÃO DE NUVEM PARA OBTER UMA ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL DA NEBULOSIDADE CONSISTENTE COM OS DADOS OBSERVADOS.....	60
5.1	Fração de nuvem .....	61
5.2	Fluxos de radiação de onda longa e onda curta.....	67
5.3	Taxas de aquecimento devido a radiação de onda longa e onda curta.....	74
5.4	Conclusão .....	85
6	AVALIAÇÃO DA NOVA PARAMETRIZAÇÃO DE FRAÇÃO DE NUVEM NA REPRESENTAÇÃO DA NEBULOSIDADE GLOBAL E O IMPACTO NOS FLUXOS DE RADIAÇÃO E VARIÁVEIS DE LARGA ESCALA UTILIZANDO O MODELO ATMOSFÉRICO GLOBAL BRASILEIRO .....	89
6.1	Avaliação da melhoria na representação da cobertura total da nebulosidade em simulação longa .....	90
6.2	Avaliação do impacto da representação da nebulosidade nas componentes de radiação na superfície terrestre e no topo da atmosfera.....	96

6.3	Avaliação do impacto e melhoria na simulação da precipitação e temperatura do ar à 2 metros .....	103
6.3.1	Precipitação.....	104
6.3.2	Temperatura à 2 metros .....	110
6.4	Conclusão.....	116
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS... ..	118
7.1	Considerações finais.....	118
7.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	121
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	122
	APENDICE A - FIGURAS COMPLEMENTARES .....	134

## 1 INTRODUÇÃO

A interação dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa com as nuvens desempenha um importante papel na atmosfera terrestre, pois afeta diretamente o ciclo diurno das variáveis meteorológicas e os processos convectivos (YANG; SLINGO, 2001). Os processos físicos associados à formação de nuvens, produzem perturbações na atmosfera que interagem com várias ondas que se propagam da região tropical do Pacífico influenciando os ciclos de convecção ativa e passiva de regiões remotas. As principais ondas que atuam na região tropical são as ondas de Rossby, Kelvin e de gravidade inercial que abrangem períodos de alguns dias a várias semanas (MATSUNO, 1966; MATHER, 2005). Por esta razão, as escalas de tempo e clima são fortemente moduladas pela presença de nuvens que influenciam o balanço de energia do sistema terrestre (L'ECUYER et al., 2019).

As nuvens impactam fortemente o albedo planetário, refletindo o fluxo radiativo solar de volta ao espaço, controlando o aquecimento excessivo do planeta (WIELICKI et al., 1995). Além disso, as nuvens se comportam como uma barreira à radiação de onda longa emitida pelos oceanos e continentes, absorvendo essa radiação e emitindo uma parte de volta à superfície, esse processo cria um efeito similar a uma estufa na atmosfera, e mantém a temperatura média do planeta Terra (CHEN; ROSSOW; ZHANG, 2000; PATNAUDE; DIAO, 2020). Os efeitos das nuvens no sistema climático de aquecimento/resfriamento dependerão de vários fatores: altura da base e do topo da nuvem, fração da nuvem, propriedades ópticas, fase líquida ou de gelo da partícula da nuvem (LIOU, 2002; WANG et al., 2019). Esses fatores relacionados à nuvem definirão as propriedades de absorção, transmitância e espalhamento da radiação de ondas longas e ondas curtas (HOSSEIN MARDI et al., 2019; MAGHRABI et al., 2019).

A variabilidade dos tipos e composição das nuvens depende da região onde as nuvens são formadas (GIANGRANDE et al., 2017). No caso da região amazônica, os tipos e a composição das nuvens desempenham um papel muito importante na modulação do clima global e regional, especialmente sobre a América do Sul. A Amazônia é uma região com grande atividade convectiva, comportando-se como uma grande fonte de calor e umidade (YANAI; TOMITA, 1998; SATYAMURTY; DA COSTA; MANZI, 2013; NUNES et al., 2016), esses fatores e a instabilidade forçam a formação de diferentes tipos de nuvens.

Um dos grandes desafios da comunidade científica é modelar corretamente a formação, propriedades e feedback de diferentes tipos de nuvens (ZHANG, 2005; SU et al., 2010; BODAS-SALCEDO et al., 2014; CALISTO et al., 2014). Trabalhos anteriores indicam que a deficiência de simulação de nuvens pode gerar feedback fraco ou forte em Modelos Climáticos Globais (GCMs). Portanto, essas deficiências continuam sendo uma fonte de incerteza na previsão do tempo, clima e mudanças climáticas (STEPHEN A. KLEIN; ANTHONY DEL GENIO, 2006; DEL GENIO, 2012). Assim, entender os processos que envolvem a formação de nuvens e as interações das nuvens com os fluxos de radiação (denominado processo nuvem-radiação feedback) é um dos principais desafios para a modelagem numérica da atmosfera, devido às características e diversidade dos tipos de nuvens na atmosfera da Terra (CHEN; ROSSOW; ZHANG, 2000; GIANGRANDE et al., 2017).

O conhecimento obtido através de dados observados sobre os diferentes processos físicos atmosféricos relacionados à geração, desenvolvimento e dissipação de nuvens e a interação da radiação com a cobertura de nuvens são necessários para determinar outros fenômenos que não são diretamente perceptíveis. Assim, novas teorias podem ser formuladas ajudando a melhorar as parametrizações físicas existentes em modelos de circulação atmosférica, que no contexto deste trabalho está relacionado à fração de nuvens. Nesse sentido, várias campanhas de experimentos de coleta de dados realizadas em diferentes regiões são úteis para o desenvolvimento e validação de parametrizações físicas. Neste trabalho, se destacam duas campanhas de campo realizadas na região tropical, o GoAmazon (GIANGRANDE et al., 2017) e *Tropical Western Pacific* (TWP) (LONG; MATHER; ACKERMAN, 2016).

Os resultados obtidos nestas campanhas de experimentos de coleta de dados estão sendo usados para calibrar diferentes tipos de parametrizações radiativas, convectivas e turbulentas (FENG et al., 2015; CIESIELSKI et al., 2017; MOULIN; MOUM; SHROYER, 2018; PUJIANA; MOUM; SMYTH, 2018). Os dados observados também são usados para entender fenômenos meteorológicos em diferentes escalas de tempo e clima (MATHER, 2005; HAGOS et al., 2016; ROWE et al., 2019). Campanhas de campo, como exemplo, GoAmazon e TWP ajudaram a melhorar a compreensão dos processos de

interação nuvem-radiação e os processos físicos responsáveis pelo desenvolvimento de sistemas meteorológicos convectivos.

A modelagem numérica é outra metodologia utilizada para tentar entender melhor o feedback da interação da radiação, nuvem e turbulência. Os modelos numéricos possuem uma hierarquia baseada no grau de precisão de suas parametrizações e simplificações nas equações dinâmicas (JEEVANJEE et al., 2017; FRASSONI et al., 2018), como o Modelo Geral de Circulação Atmosférica (AGCM-3D), Modelos de Coluna Única (SCMs), Modelos de Resolução de Nuvem (CRMs) e Large Eddy Simulation (LES). Cada modelo tem um domínio de escala que pode ser representado.

Os modelos LES e CRM são modelos numéricos de alta resolução cujos espaçamentos de grade são suficientemente refinados para permitir simulações explícitas de vórtices turbulentos e nuvens individuais ao longo de todo o ciclo de vida (TAO; MONCRIEFF, 2009). O modelo LES é dedicado ao estudo de nuvens cumulus rasas, menores e de vida curta, enquanto que o modelo CRM é adequado para o estudo de nuvens convectivas profundas com um ciclo de vida mais longo (TAO; MONCRIEFF, 2009; FRASSONI et al., 2018).

Vários trabalhos encontrados na literatura mostram a eficiência dos CRMs na simulação de fenômenos atmosféricos (sistemas convectivos) com alta resolução (KHAIROUTDINOV; RANDALL, 2001, 2002, 2003; BRETHERTON; BLOSSEY, 2017; MECHEM; GIANGRANDE, 2018). Mais especificamente para a região amazônica, que é a região de interesse deste artigo, existem diversos estudos realizados que utilizam modelos numéricos do tipo LES (DIAS-JUNIOR; MARQUES FILHO; SÁ, 2015; NEVES; FISCH; RAASCH, 2018; CHAMECKI et al., 2020) e CRM (KHAIROUTDINOV; RANDALL, 2006). No entanto, para essa região, não foram encontrados estudos na literatura com CRMs utilizando como forçantes de grande escala dados do GoAmazon 2014/15. Portanto, o uso de CRMs para estudos na região amazônica, utilizando dados observacionais mais recentes, pode fornecer informações detalhadas sobre a evolução do ciclo de vida da nuvem e a interação da radiação com a nebulosidade que não é possível obter com dados observados. Essas informações podem ajudar a melhorar as parametrizações de fração de nuvens usadas em modelos atmosféricos.



Nesse sentido, obter dados observados e de modelagem de alta resolução é essencial para ajudar a entender como os processos físicos da atmosfera estão relacionados aos efeitos da interação nuvem-radiação que impactam o desenvolvimento de sistemas convectivos na região tropical. No contexto do problema de representação de nuvens em modelos numéricos de tempo e clima, destacam-se os esquemas de frações de nuvens, que se baseiam principalmente em limiares de umidade relativa, e alguns parâmetros importantes para o diagnóstico de frações de nuvens. Esses parâmetros geralmente são calculados empiricamente e a escolha desses valores pode gerar incertezas na representação da nebulosidade (PARK et al., 2016; GEOFFROY et al., 2017). **A hipótese levantada neste trabalho baseia-se em que os processos naturais de formação de nuvens estão relacionados às características dos processos microfísicos de nuvens e a variabilidade do ciclo diurno de variáveis ambientais tais como umidade relativa, temperatura e estabilidade da atmosfera.** Com isso, este trabalho visa obter informações sobre variáveis relacionadas à própria nuvem, como conteúdo de água líquida e gelo, e variáveis de grande escala (temperatura, omega e umidade relativa) para entender as condições de formação, manutenção ou dissipação das nuvens visando uma melhor representação da fração de nuvem em modelos climáticos globais.

Diante destas lacunas relacionados as incertezas do efeito radiativo de nuvens em previsões de tempo e clima, surgem algumas questões científicas que precisam ainda ser exploradas. No âmbito dessa pesquisa, espera-se responder as seguintes questões científicas: **(1) Qual é a sensibilidade da fração de nuvens em relação às variáveis ambientais? (2) Qual é a influência da distribuição vertical de fração de nuvens nos campos radiativos da atmosfera? (3) Qual é o melhor método para estimar a fração de nuvens (uso de CRMs ou parametrização)? (4) Qual é o comportamento da fração de nuvens em diferentes regiões do planeta (continente e oceano)? (5) Como diferentes formas de parametrizar a fração de nuvens impactam nas simulações climáticas? (6) Quais são os mecanismos de retroalimentação mais importantes nas simulações climáticas?**

Existem vários tópicos que justificam a execução deste projeto, por exemplo: a estimativa de nuvens em modelos numéricos da atmosfera continua sendo umas das maiores fontes de incertezas em simulações climáticas. E o aumento de experimentos de campo em diferentes regiões do planeta disponibiliza um conjunto de dados que podem ser

explorados ajudando a melhorar a compreensão dos processos físicos envolvidos na interação entre nuvens e radiação na atmosfera contribuindo para melhorar as parametrizações de nuvens. Este trabalho fornece uma quantidade significativa de informações sobre os processos de formação de nuvens que poderão ser utilizadas também em trabalhos futuros.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo principal desse trabalho é estudar a interação nuvem-radiação e o papel das variáveis de larga escala (temperatura, omega e umidade relativa) e o conteúdo de água líquida e gelo no desenvolvimento, manutenção e dissipação da nebulosidade, combinando dados de modelagem de alta resolução e dados observacionais, visando o desenvolvimento de uma nova parametrização de fração de nuvens.

Para isso, foram definidos os objetivos específicos:

- Simular as variáveis dinâmicas, termodinâmicas, radiativas e de nuvens através do modelo numérico de alta resolução SAM (System for Atmospheric Model).
- Avaliar as simulações numéricas de alta resolução através da comparação da precipitação, fluxo de radiação de onda curta e fração de nuvens simulados pelo SAM e aqueles medidos durante a campanha experimental do GoAmazon 2014/15.
- Analisar como as variáveis de larga escala influenciam na formação e evolução da nebulosidade, e como a nebulosidade impacta os fluxos de radiação de onda curta e longa à superfície.
- Compreender e quantificar as relações entre a fração de nuvem e as variáveis de larga escala, visando à utilização dessas relações no desenvolvimento e ajustes de parametrizações de fração de nuvem.
- Desenvolver uma nova parametrização de fração de nuvens baseada nas relações previamente analisadas, visando uma simulação da distribuição horizontal e vertical da nebulosidade consistente com os dados observados.
- Avaliar o desempenho da nova parametrização de nuvens nas estimativas de fluxos radiativos de onda curta e onda longa descendentes à superfície comparando

dados de modelagem de alta resolução e dados observacionais provenientes de duas campanhas experimentais na região tropical (*GoAmazon 2014/15* e *Tropical Western Pacific*).

- Implementar a nova parametrização no modelo global atmosférico do INPE (BAM), realizar experimentos numéricos na escala climática e analisar o impacto da nova parametrização de nuvens no modelo BAM, principalmente nos campos de nuvens, radiação, precipitação e temperatura a 2m.

## 1.2 Estrutura da Tese

O presente estudo está dividido em outros seis Capítulos. O Capítulo 2 faz uma breve fundamentação dos aspectos associados a este trabalho, principalmente sobre os diferentes tipos de nuvens e suas propriedades microfísicas e macrofísicas, propriedades ópticas e radiativas de nuvens, e algumas das principais metodologias e ferramentas utilizadas no estudo de interação nuvens e radiação. Capítulo 3 apresenta a área de estudo, os dados observacionais e as ferramentas de modelagem utilizadas para o desenvolvimento da tese. Os próximos três Capítulos apresentam os resultados associados às seguintes etapas do trabalho:

- Estudo das interações entre a nebulosidade-radiação e as variáveis dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera, baseado nos dados observacionais do *GoAmazon 2014/15* e em modelagem numérica utilizando um *Cloud Resolving Model* (Capítulo 4).
- Desenvolvimento de uma nova parametrização de fração de nuvem para obter uma estimativa da distribuição horizontal e vertical da nebulosidade consistente com os dados observados (Capítulo 5)
- Avaliação da nova parametrização de fração de nuvem na representação da nebulosidade global e o impacto nos fluxos de radiação e variáveis de larga escala utilizando o Modelo Atmosférico Global Brasileiro - BAM (Capítulo 6)

Cada Capítulo de resultados apresenta as conclusões obtidas no âmbito de cada etapa. Finalmente, as conclusões e considerações finais da tese, bem como trabalhos futuros são sumarizadas no Capítulo 7.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presença dos diferentes tipos de nuvens na atmosfera terrestre é responsável pela maior parte da radiação solar refletida para o espaço e pela maior parte da absorção da radiação terrestre. Portanto, os diferentes tipos de nuvens contribuem no balanço energético do planeta Terra (HARROP; HARTMANN, 2016; WILD, 2020).

A interação da radiação solar (ondas curtas) e terrestre (ondas longas) com os diferentes tipos de nuvens é um processo complexo de ser mensurado. Vários experimentos de campo, como o GoAmazon 2014/15 (MARTIN et al., 2016) e DYNAMO (FLIEGEL; SCHUMACHER, 2012), foram realizados e através dos dados coletados, inúmeras metodologias foram aplicadas para quantificar a fração de nuvens e os efeitos da interação da radiação com cada camada de nuvens, entretanto, estas estimativas ainda apresentam muitas incertezas (FLIEGEL; SCHUMACHER, 2012).

A dificuldade em obter dados observacionais de perfil vertical de fração de nuvens e os efeitos da interação da radiação com nuvens são fatores limitantes para o desenvolvimento de parametrizações robustas, que capturem toda a variabilidade de tipos de nuvens presente na atmosfera (GIANGRANDE et al., 2017; PATHAK; SAHANY; MISHRA, 2020). Portanto, as estimativas de nuvens e os feedbacks de nuvens introduzem grande incertezas em simulações climáticas (WEBB et al., 2017).

As incertezas em simulações climáticas devido a parametrização de nuvens estão relacionadas ao efeito radiativo nas nuvens (CRM, do inglês, *Cloud Radiative Effect*) e consequentemente aos processos de feedback que envolvem a formação dos diferentes tipos de nuvens, interação da radiação com as nuvens, impacto dinâmico e termodinâmico na atmosfera devido ao aquecimento e resfriamento produzido pela a interação da radiação de onda curta e longa com as nuvens.

### 2.1 Os diferentes tipos de nuvens

Na atmosfera terrestre os diferentes tipos de nuvens são classificados em Nuvens rasa (Stratus), Congestus, Convecção profunda (Cumulonimbus), Alto cumulos, Altostratus, Cirrostratus (Anvil) e Cirrus (GIANGRANDE et al., 2017). A formação destes diferentes tipos de nuvens dependem dos processos microfísicos, que estão relacionados a processo de supersaturação, instabilidade atmosférica, processos convectivos (entranhamento e detranhamento), movimento vertical (*updraft* e *downdraft*) (SUNDQVIST; BERGE;

KRISTJÁNSSON, 1989; KHAIN et al., 2015), e aos processos microfísicos relacionados a nucleação e crescimento de gotas, colisões de gotas e produção de gotas de chuva, colisão em fases mistas e nuvens de gelo, sedimentação e congelamento e derretimento (KHAIN et al., 2015). Abaixo são descritos os processos macrofísicos e microfísicos, bem como as propriedades radiativas e ópticas de nuvens.

### **2.1.1 Processos macrofísicos**

Associado aos processos macrofísicos de nuvens, pode-se resumidamente indicar que:

- Os processos de supersaturação são baseados na umidade relativa (RH), sendo essa uma variável física apropriada para diagnosticar a cobertura de nuvens (GEOFFROY; SHERWOOD; FUCHS, 2017). Na supersaturação um limiar de RH é definido, assim um RH crítico (RH<sub>crit</sub>) no qual se supõe que a nuvem se forme.
- Instabilidade Atmosférica atribuída a inversão do gradiente de temperatura são responsáveis pela formação de nuvens stratus.
- Processos convectivos (entranhamento e detranhamento) que são responsáveis pela manutenção ou dissipação de nuvens convectivas.
- Os movimentos verticais (*updraft* e *downdraft*) gerados pela convergência do escoamento são responsáveis pelo aumento da atividade convectiva ou a dissipação da atividade convectiva.

### **2.1.2 Processos microfísicos**

Enquanto que para os processos microfísicos, resume-se:

- Na nucleação o cálculo da distribuição de tamanho de gotículas nucleadas usa a distribuição de tamanho dos núcleos de condensação de nuvens (CNN, do inglês, *Cloud Condensation Nuclei*) e supersaturação. A nucleação de gotículas depende do histórico de supersaturação e é permitida tanto na base da nuvem quanto dentro das nuvens. A nucleação de gotículas afeta a distribuição de tamanho de aerossóis através da eliminação de nucleação.
- No crescimento de gotas, o ajuste de saturação é usado para calcular o crescimento da proporção de mistura de água líquida. Em alguns casos, o aumento da razão de

mistura da água líquida e da concentração de gotas permite a avaliação do raio médio de gota.

- As colisões de gotas e produção de gotas de chuva, são estimadas através da proporção de mistura de gotas de chuva e calculada usando expressões para as taxas de auto conversão. As expressões são empíricas ou derivadas de soluções da equação de coleção estocástica. A forma da proporção de mistura da água da chuva é prescrita.
- A colisão em fases mistas e nuvens de gelo, são estimadas em função das razões de mistura (e concentrações) de hidrometeoros de diferentes classes e são calculadas usando diferentes expressões de parametrização para a conversão de hidrometeoros de uma classe para outra.
- A sedimentação é calculada para partículas pertencentes a diferentes bandas com diferentes velocidades de queda. As velocidades de queda dependem da massa das partículas e da classe dos hidrometeoros. Eles também dependem da taxa de *riming*, fração de água líquida e outros fatores.
- As taxas médias de congelamento e fusão são calculadas pela média das partículas pertencentes à mesma classe de hidrometeoros.

## **2.2 A interação da radiação com as nuvens**

As interações radiativas das nuvens resultam da dispersão, absorção e emissão de fótons por partículas de nuvens (LIOU, 2002). A radiação solar possui um espectro que é composta por diferentes comprimentos de ondas, variando do ultravioleta ao infravermelho próximo. Portanto, a interação dessa radiação com as nuvens (absorção e espalhamento) depende basicamente da distribuição espacial horizontal e vertical, do tamanho das gotas de água líquida e das partículas de gelo. O mesmo ocorre para o espectro da radiação terrestre, os diferentes comprimentos de ondas são absorvidos e emitidos pelas gotas de água líquida e das partículas de gelo que compõem as nuvens.

Nas escalas espaciais dos sistemas de nuvens ou maiores, as interações nuvem-radiação são convenientemente caracterizadas pelos chamados efeitos radiativos (CREs, do inglês, *Cloud radiative Effects*) (RAMANATHAN et al., 1989; ALLAN, 2011). Os CREs podem ser definidos como a diferença entre fluxos radiativos de céu claro (hipotético) e a

contribuição instantânea da nuvem para a radiação. Os CREs podem ser divididos em componentes de radiação de ondas curtas e longas. Portanto, uma boa estimativa da distribuição espacial horizontal e vertical e das propriedades óticas de nuvens são muito importantes para calcular os efeitos radiativos das nuvens na atmosfera.

### **2.3 As propriedades óticas das nuvens**

Em condições de nebulosidade, o comportamento da radiação de ondas curtas e longas depende das propriedades ótica das nuvens, que são definidas em função do conteúdo de água condensada (líquida ou gelo), do tamanho da partícula de água/gelo, formato dos cristais de gelo, espessura e geometria das nuvens. A depender dessas variáveis, pode-se inferir o quanto uma nuvem é opaca (profundidade ótica alta) ou transparente (profundidade ótica baixa) à radiação. As definições das propriedades óticas das nuvens são sucintamente descritas abaixo e encontradas com mais detalhes em (LIOU, 2002; PETTY, 2006).

- O coeficiente de extinção define a propriedade de um conjunto de partículas de nuvens, compostas por gotículas de água ou cristais de gelo, em absorver e/ou espalhar a radiação. A extinção é assim devida duas componentes, uma associada à absorção e outra ao espalhamento da radiação. Ambas componentes dependem da composição (gelo ou água), formato e tamanho das partículas (raio efetivo da partícula), bem como do comprimento de onda da radiação incidente. O coeficiente de extinção é dado pela soma do coeficiente de absorção e espalhamento. O coeficiente de absorção define a propriedade da partícula em absorver a radiação. A radiação absorvida pela atmosfera e superfície é convertida em energia termina, aquecendo o planeta.
- O albedo simples indica a fração da extinção devido ao espalhamento, é quantificado pela razão do coeficiente de espalhamento pelo coeficiente de extinção total, sendo 0 quando não ocorre espalhamento e 1 quando a partícula é não absorvente.
- O parâmetro de assimetria descreve o grau de assimetria do espalhamento, ou seja, define a direção em que o fluxo radiativo seguirá após a interação com a gotícula de água ou cristais de gelo, dependendo, assim, do tamanho e formato da partícula.



Nuvens tendem a espalhar radiação para o hemisfério frontal a incidência da radiação à partícula (para frente, *forward*).

- A última propriedade, a transmissividade, é a parte da radiação que não sofre absorção e nem espalhamento, e que assim, transmitida pelo interior das nuvens, que no caso da radiação solar incidente é em direção a superfície terrestre.

## 2.4 Efeito radiativo de nuvens

As nuvens são formadas por aglomerados de gotículas de água, partículas de gelo ou uma mistura de ambos em suspensão na atmosfera. As mesmas são elementos meteorológicos muito importantes para o sistema terrestre, pois integram parte do ciclo hidrológico e energético do planeta

As nuvens atuam no efeito estufa, aquecendo o planeta através da absorção do fluxo de radiação de onda longa, diminuindo a quantidade desta radiação emitida no topo da atmosfera. Este mecanismo é chamado de Efeito Radiativo de Nuvem para o fluxo de radiação de onda longa (LW CRE, do inglês, *Long Wave Cloud Radiative Effect*) (CHEN; ROSSOW; ZHANG, 2000; KANG et al., 2020). Por outro lado, as nuvens aumentam o albedo planetário, refletindo o fluxo radiativo solar de onda curta de volta para o espaço, assim, resfriando o planeta, mecanismo denominado de Efeito Radiativo de Nuvem para o fluxo de radiação de onda curta (SW CRE, do inglês, *Short Wave Cloud Radiative Effect*) (CHEN; ROSSOW; ZHANG, 2000; KANG et al., 2020). O efeito líquido desses dois processos depende das propriedades microfísicas e macrofísicas das nuvens (JAHANGIR et al., 2021), bem como as propriedades radiativas, como ângulo de incidência e comprimento de onda.

Harrop e Hartmann (2016) descreveram que o efeito radiativo da nuvem (CRE) pode influenciar a extensão da área de nuvens altas tropicais de duas maneiras distintas. A primeira é através da desestabilização radiativa direta das camadas de nuvens elevadas, principalmente como resultado da radiação de ondas longas aquecendo a base da nuvem e resfriando o topo da nuvem. O segundo efeito é a estabilização radiativa, em que o aquecimento radiativo da nuvem na coluna atmosférica prepara a atmosfera para a convecção profunda.

O efeito das nuvens no balanço de energia atmosférica, no entanto, é menos direto (HARROP; HARTMANN, 2016). Como o gradiente vertical de temperatura potencial (*lapse rate*) troposférico é positivo, as nuvens podem aquecer ou resfriar a atmosfera, dependendo de sua estrutura vertical. As nuvens altas (Cirrus) são altamente transparente a radiação solar (albedo pequeno) e absorvem facilmente a radiação de onda longa, assim tendem a aquecer a atmosfera devido ao efeito combinado da maior quantidade de radiação solar entrando no sistema terrestre e a emissão de radiação de onda longa por essas nuvens em direção a superfície. Em contraste ao efeito das nuvens altas, as nuvens baixas tendem a resfriar a atmosfera, pois refletem parte da radiação solar de volta ao espaço (albedo alto) e embora também emitam radiação de onda longa em direção a superfície terrestre, as nuvens baixas apresentam temperaturas mais elevadas devido à proximidade com a superfície terrestre e assim elas emitem radiação de onda longa em direção ao topo da atmosfera quase a mesma intensidade que a superfície. (SLINGO; SLINGO, 1988). Em regiões de convecção profunda dentro dos trópicos, onde as nuvens altas dominam, as interações nuvem-radiação aquecem a troposfera superior porque a absorção de radiação de ondas longas e ondas curtas é muito maior do que a emissão de nuvens de radiação de ondas longas (SLINGO; SLINGO, 1988).

As nuvens altas geralmente tendem a causar um aquecimento na troposfera e na baixa estratosfera devido aos efeitos combinados da alta transmissividade dos fluxos radiativos provenientes do sol (radiação de onda curta) e pela emissão de fluxos infravermelhos termais (radiação de onda longa) por essas nuvens. As nuvens médias e baixas tendem a produzir um resfriamento significativo na atmosfera e na superfície devido à alta refletividade da radiação solar causadas por elas, reduzindo o fluxo incidente à superfície.

No geral, a cobertura de nuvens pode alterar substancialmente a quantidade de radiação incidente à superfície terrestre, influenciando assim nas circulações atmosféricas (VOIGT et al., 2021) e conseqüentemente nas condições de tempo e clima (LI; THOMPSON; BONY, 2015). Esta característica destaca a importância de simular adequadamente a forçante radiativa de nuvens em modelos atmosféricos climáticos.

Uma das formas de estudar e caracterizar os efeitos radiativos de nuvem no sistema terrestre é a partir de dados observacionais obtidos em experimentos de campo, bem como modelagem numérica de tempo e clima, em todas as hierarquias disponíveis entre esses

modelos (MCFARLANE; LONG; FLAHERTY, 2013; BURLEYSON; LONG; COMSTOCK, 2015; MARQUARDT COLLOW; MILLER, 2016; GIANGRANDE et al., 2017).

## **2.5 As diferentes metodologias aplicadas para compreender a interação nuvem-radiação e reduzir as incertezas do efeito radiativo de nuvens**

Para reduzir as incertezas nas simulações numéricas climáticas devido ao feedback de nuvens no modelo climáticos, a comunidade científica tem investido muito em campanhas de campo de coletas de dados como o GoAmazon 2014/15, Dynamo e TWP (descrito na próxima Seção). Através de conjuntos de dados observacionais é possível desenvolver parametrizações cada vez mais sofisticadas que conseguem simular satisfatoriamente os feedbacks de nuvens no modelo climáticos.

### **2.5.1 Experimentos de campo GoAmazon 2014/15 e TWP**

Para obter uma melhor compreensão a respeito da interação das nuvens com a radiação e seus feedbacks, é necessário a realização de experimentos de campo. Com esses experimentos, a partir de dados observacionais, é possível realizar estudos capazes de caracterizar melhor os processos físicos atmosféricos envolvidos na formação de nuvens.

Na região tropical, mais especificamente na região Amazônica e no Oceano Pacífico Tropical, foram realizados dois experimentos de campo com o propósito de obter dados observacionais, principalmente referentes a propriedades de nuvens e radiação.

O primeiro deles, o experimento de Observação e Modelagem da Amazônia do Oceano Verde (GoAmazon 2014/15, do inglês, *The Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon*), foi realizado no período de janeiro de 2014 a dezembro de 2015 nos arredores de Manaus/AM, na região central da bacia amazônica. O foco do experimento foi entender as interações entre a vegetação, química atmosférica, produção de aerossóis, nuvens, radiação e precipitação, com o objetivo de entender e quantificar esses processos interligados (MARTIN et al., 2016; MACEDO; FISCH, 2018; MACHADO et al., 2018). De forma geral, estes dados coletados durante o experimento são de grande importância no campo de análises observacionais, bem como para o desenvolvimento de parametrizações físicas para modelos atmosféricos, no caso desse estudo servirá para ajustes e implementação no esquema de fração de nuvens.

Já o outro experimento, foi realizado sobre o Oceano Pacífico Oeste Tropical (TWP, do inglês *Tropical Western Pacific*). O período de dados disponíveis é de 1996 até dezembro de 2014. Este experimento teve como foco principal a convecção marinha tropical (BURLEYSON; LONG; COMSTOCK, 2015; LONG; MATHER; ACKERMAN, 2016), assim, contendo dados a respeito de propriedades de nuvem e radiação, que é o foco deste projeto

Com esses experimentos é possível realizar diversos estudos teóricos, principalmente, referente as forçantes radiativas de nuvens em diferentes regiões do planeta e com diferentes condições ambientais, ampliando os graus de liberdade que podem ser analisados para o desenvolvimento de parametrizações mais sofisticadas.

### **2.5.2 Estudos observacionais do efeito radiativo de nuvens na região tropical**

Na região tropical, mais especificamente na região amazônica (Manacapuru) e em três pontos no oceano pacífico tropical (Manus, Nauru e Darwin), foram realizados experimentos de campo no qual um dos objetivos foi avaliar a forçante radiativa de nuvens nessas regiões. Os dados foram obtidos pelo *Atmospheric Radiation Measurement Program* (ARM) que realiza medições operacionais desses locais das propriedades das nuvens e radiação (onda curta e onda longa) incidente à superfície. Com essas medições é possível definir os tipos de nuvens que atuam na região e os efeitos radiativos devido cada tipo de nuvem.

Nas regiões situadas no Oceano Pacífico do experimento TWP, a distribuição e frequência de nuvens são similares. Nuvens Cirrus e nuvens baixas apresentaram maior frequência, seguido de Altocumulus e convecção profunda. A maior transmissividade ocorre nas nuvens Cirrus, no qual a radiação solar quase não é espalhada e nem absorvida, essas nuvens são opticamente finas. As nuvens de convecção profunda apresentam menor transmissividade devido ao extenso desenvolvimento vertical e grande profundidade óptica, ou seja, reflete e absorve uma grande quantidade da radiação solar (BURLEYSON; LONG; COMSTOCK, 2015).

OLW CRE é diferente entre as nuvens baixas e altas, com as nuvens baixas tendo maiores LW CRE devido as suas bases mais quentes. A profundidade óptica também explica o maior LW CRE em nuvens com bases baixas, já as nuvens convectivas são opticamente

mais espessas (profundidade óptica maior) aumentando a interação com a radiação de onda longa. Quanto maior for a altitude, as nuvens formadas por cristais de gelo apresentam pouca influência na radiação de onda longa a nível da superfície, assim sendo menor o LW CRE, como no caso das nuvens Cirrus, que apresentam os menores valores de LW CRE (MCFARLANE; LONG; FLAHERTY, 2013; BURLEYSON; LONG; COMSTOCK, 2015).

Em relação ao SW CRF, as nuvens com bases baixas e elevados valores de conteúdos de água condensada tendem a ter maior profundidade óptica e, portanto, menor transmissividade em relação às nuvens com bases médias e altas, que são ópticamente finas e frias (no caso de Cirrus). Assim, o SW CRE é maior em nuvens com bases baixas em relação a nuvens médias e principalmente altas (MCFARLANE; LONG; FLAHERTY, 2013; BURLEYSON; LONG; COMSTOCK, 2015).

Na região amazônica, o experimento GoAmazon 2014/15, o SW e LW CRE são similares aos encontrados em nuvens situadas no oceano pacífico tropical. As nuvens que mais apresentam impactos tanto no SW CRE como no LW CRE são as nuvens de convecção profunda, com maior profundidade óptica e menor transmissividade. As nuvens Cirrus apresentaram maior transmissividade por serem ópticamente finas, portanto, apresentam os menores SW e LW CRE a nível da superfície em relação as demais nuvens presentes na região.

No geral, as nuvens baixas são responsáveis por 35%-47% do SW CRE devido à baixa transmissividade e alta frequência de atuação e por 35%-44% do LW CRE devido as suas bases baixas e quentes. Já as nuvens altas, com frequências semelhantes as nuvens baixas, causam menor impacto, devido a pequena profundidade óptica. São responsáveis por 10%-13% do SW CRE e 10%-16% do LW CRE (MARQUARDT COLLOW; MILLER, 2016; GIANGRANDE et al., 2017).

É importante mencionar que os efeitos radiativos causados por nuvens em uma região ou até mesmo de forma global não dependem apenas das propriedades radiativas das nuvens, mas principalmente da frequência com que um determinado tipo de nuvem atua em uma região.

Estes estudos fornecem uma boa visão a respeito de como as nuvens afetam os fluxos de radiação e, conseqüentemente, modulam o balanço de energia na superfície do planeta. Entretanto, informações mais detalhadas referentes aos processos físicos envolvidos na interação entre os fluxos de radiação e as propriedades microfísicas e macrofísicas, por tipo de nuvens, são necessárias para ajudar a comunidade científica a ter uma visão mais clara a respeito dos desenvolvimentos de sistemas meteorológicos precipitantes, bem como no desenvolvimento de parametrizações de nuvens que possam ser utilizados em modelos de tempo e clima.

Uma outra alternativa, complementar aos estudos observacionais, para realizar trabalhos com o foco de caracterizar a interação nuvem-radiação e desenvolvimentos de parametrizações de esquemas de nuvem é utilizando modelos de coluna única e modelos que resolvem nuvens, como será descrito na próxima seção.

### **2.5.3 Modelo de Resolução de Nuvens**

Os Modelos de Resolução de Nuvem (CRM, do inglês, *Cloud Resolving Model*) são aqueles capazes de resolver explicitamente as circulações em escalas de nuvens individuais devido ao espaçamento de grade da ordem de 1 km ou menos, sendo necessário parametrizar apenas fenômenos em escalas menores, como a turbulência e a microfísica. Tais modelos foram desenvolvidos afim de se estudar as propriedades dinâmicas e microfísicas de nuvens isoladas (WU; LI, 2008; GUICHARD; COUVREUX, 2017). Estes dados das simulações dos CRMs são comparáveis aos dados observados e podem ser utilizados como informações adicionais aos dados observados, para realizar formulações de parametrizações de nuvens e convecções para Modelos de Circulação Geral (MCGs) (GUICHARD et al., 2004; GUICHARD; COUVREUX, 2017).

### **2.5.4 Influência da nebulosidade na modelagem de tempo e clima**

Estudos indicam a importância de uma boa representação do campo de nebulosidade em modelos numéricos de tempo clima (IPCC, 2014; BRETHERTON, 2015; LI; THOMPSON; BONY, 2015). Atualmente, existem dois tipos principais de parametrizações de nuvens que são utilizados:

- O primeiro tipo é uma parametrização diagnóstica de cobertura de nuvens, na qual a cobertura de nuvens é diagnosticada após cada intervalo de tempo das variáveis

do modelo (GEOFFROY; SHERWOOD; FUCHS, 2017) e depois usada para modificar as quantidades de radiação de ondas curtas e de ondas longas. Essas parametrizações geralmente são muito simples e computacionalmente baratas.

- O segundo tipo é uma parametrização prognóstico de cobertura de nuvens, na qual a cobertura de nuvens é adicionada como uma variável de modelo prevista, juntamente com uma segunda variável para a água da nuvem. Estas parametrizações são mais complicadas e também exigem mais de recursos computacionais (PARK; CHAE; HONG, 2016).

As parametrizações de fração de nuvens têm auxiliado na compreensão de muitos aspectos do sistema climático. Na literatura pode-se encontrar alguns impactos da nebulosidade na modelagem de tempo e clima, por exemplo: Através da modelagem numérica pode-se observar que o efeito líquido das nuvens é resfriar a Terra em  $18 \text{ W m}^{-2}$  na média global (LOEB et al., 2018). Segundo Voigt et al., (2021), este resfriamento é essencial para o clima da Terra como o conhecemos, se as nuvens fossem removidas, isso corresponderia a quatro duplicações da concentração de dióxido de carbono na atmosfera (BYRNE; GOLDBLATT, 2014). As nuvens dominam a incerteza na magnitude do aquecimento global médio da superfície em resposta ao aumento do dióxido de carbono, ou seja, a sensibilidade climática (BONY et al., 2006; CEPPI et al., 2017; ZELINKA et al., 2020). Portanto, não é surpreendente que as nuvens tenham sido o foco da ciência do clima e das mudanças climáticas por muitas décadas (CESS et al., 1990; STEPHENS, 2005; BONY et al., 2015). No trabalho de Voigt et al., (2021) conclui-se que a presença de efeitos radiativos de nuvens molda a circulação no clima atual de muitas maneiras importantes, incluindo a largura dos cinturões de chuvas tropicais e a posição das trilhas de tempestades extratropicais. O efeito de bloqueio da radiação de onda longa pelas nuvens, afeta a variabilidade interna e a resposta da circulação ao aquecimento global. A maior parte da expansão da circulação em direção aos polos em resposta ao aquecimento global pode ser atribuída a mudanças radiativas nas nuvens.

### **2.5.5 Processo de *feedback* nuvens na atmosfera**

O mecanismo de retroalimentação (do inglês, *feedback*) em meteorologia é o processo no qual uma determinada variável aumenta (*feedback* positivo) ou diminui (*feedback*

negativo) de intensidade, a partir da interação com uma ou mais variáveis diferentes. O *feedback* pode ocorrer em escala de tempo (1 a 7 dias) e principalmente em escala climática (meses, anos, décadas, etc.). Alguns mecanismos de *feedback* são descritos na literatura, como exemplo, *feedback* de vapor d'água, de neve-gelo, do ciclo do carbono e de nuvens (ZHOU; CHEN, 2015). Sendo este último o foco desta pesquisa, tendo em vista que o *feedback* de nuvens é a principal fonte de incerteza em simulações de clima futuro (IPCC, 2014; BRETHERTON, 2015). O conceito de *feedback* de nuvem pode ser obscuro, em parte porque o termo “*feedback* de nuvem” é frequentemente usado sem ser definido adequadamente e raramente recebe uma definição precisa o suficiente para mostrar como pode ser medido quantitativamente. Outra confusão surge porque existem muitos tipos de *feedbacks* de nuvens. O *feedback* da nuvem pode ser o acoplamento entre a nebulosidade e a temperatura do ar na superfície. Esta mudança na temperatura de superfície pode ser atribuída à diferentes forçantes como o aumento dos gases do efeito estufa, ciclo solar, *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), entre outros. Estas forçantes podem mudar a temperatura do ar na superfície levando a alteração na distribuição de nuvens, que conseqüentemente pode amplificar ou diminuir a perturbação inicial da temperatura (SOLOMON, S. et al., 2007).

No entanto, o efeito radiativo da nuvem varia fortemente com a localização, a estação do ano e tipos de nuvens, portanto uma análise do *feedback* das nuvens deve levar em conta as diferentes regiões do globo, as mudanças nas proporções das frações de diferentes tipos de nuvens, temperaturas das nuvens (em particular relacionadas à altura das nuvens) e propriedades radiativas das nuvens como resposta a uma perturbação. Todas essas mudanças podem ser causadas por efeitos termodinâmicos diretos, pela dinâmica de grande escala que influencia as mudanças de temperatura e umidade, bem como por processos de pequena escala que ocorrem nas próprias nuvens (chamado microfísica de nuvens) (SOLOMON, S. et al., 2007).

No trabalho de Brient e Bony (2013) conclui-se que ocorre um *feedback* positivo de nuvens baixas em resposta ao aquecimento global prevista pelos modelos climáticos. Entretanto, Mülmenstädt et al., (2021) verificaram que em uma atmosfera mais aquecida, parte da população de nuvens muda da fase de gelo e mista (mais fria) para líquida (mais quente). As nuvens líquidas/quentes são mais reflexivas e tem vida mais longa, assim reduz o fluxo de radiação solar absorvida pelo planeta Terra e constituem um *feedback*



radiativo negativo. Existem outros mecanismos de *feedback* de nuvens que devem ser cuidadosamente analisados para poder compreender os impactos nas simulações climáticas.

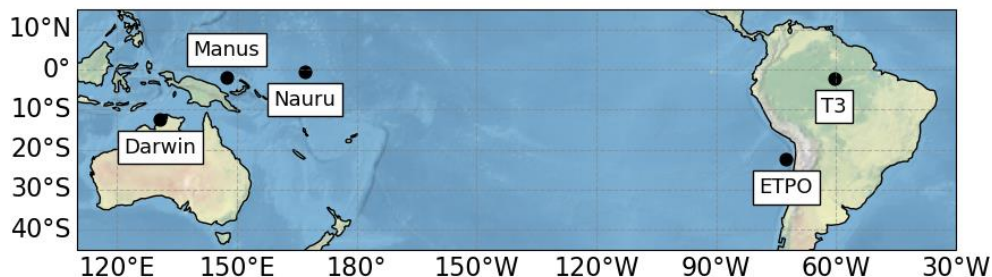
### 3 DADOS E METODOLOGIA

Neste Capítulo são apresentadas as áreas de estudo, os dados observacionais e as ferramentas computacionais utilizadas na tese.

#### 3.1 Dados e áreas de estudo

Neste trabalho foram considerados 5 pontos geográficos situados na região tropical (Fig. 3.1). O ponto denominado de T3 está localizado na parte central da região Amazônica e representa o experimento de campo denominado em inglês de *The Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon* (GoAmazon 2014/15). Os pontos denominados de *Darwin*, *Nauru* e *Manus*, fazem parte do experimento chamado em inglês de *Tropical Western Pacific* (TWP) e o ponto ETPO está localizado na porção Leste do Oceano Pacífico Tropical. Para cada ponto foram utilizados dados observacionais (com exceção do ETPO), reanálises, estimativa de precipitação, estimativas de fluxos de radiação e saídas de modelo de alta resolução. Uma descrição mais detalhada sobre cada uma das áreas de estudo é apresentada nas próximas seções.

Figura 3.1 - Localização das áreas de estudo. TWP (Darwin, Manus e Nauru), GoAmazon 2014/15 (T3) e do ETPO.



Fonte: Produção do autor.

#### 3.1.1 *The Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon* (GoAmazon 2014/15)

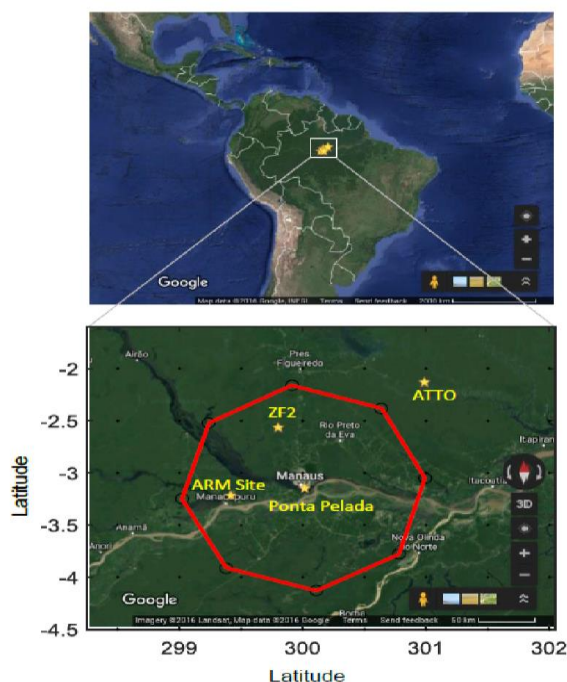
A região amazônica desempenha um papel muito importante na modulação do clima global e regional, especialmente sobre a América do Sul, pois é uma grande fonte de calor e umidade para o desenvolvimento e manutenção de sistemas meteorológicos precipitantes. Devido à variação no padrão de circulação anual e estrutura termodinâmica, a região possui estações úmidas e secas definidas (CARNEIRO; FISCH, 2020), com totais anuais de precipitação de aproximadamente 2200 mm (MARENGO et al., 2018).

As características pluviométricas da região são definidas pela presença de diferentes sistemas e fenômenos meteorológicos ao longo do ano, como a Zona de Convergência Intertropical, Linhas de instabilidade, Friagens, Brisa de Rio e Penetração de Sistemas Frontais e Organização de Convecção (FISCH et al., 1998). Devido à ação de diferentes sistemas meteorológicos em conjunto com a convecção local, a região possui diferentes tipos de nuvens (GIANGRANDE et al., 2017) e a interação dessas nuvens com a radiação é foco de diferentes estudos e campanhas de campo realizadas na região.

O GoAmazon 2014/15 foi um experimento de campo realizado no período de janeiro de 2014 a dezembro de 2015 e contou com vários pontos de coletas de dados nos arredores de Manaus/AM, na região central da bacia Amazônica (Fig. 3.2). A cidade de Manaus é uma região urbanizada dentro da floresta amazônica capaz de causar uma ilha de calor cerca de 3°C mais alta que a floresta circundante. Esta região para os estudos é importante por suas características geográficas, que incluem dois grandes rios próximos e relevo ondulado, atingindo até 200m de altitude (Martin et al., 2016). O foco do experimento foi estudar a interação entre a vegetação-atmosfera, química atmosférica, produção de aerossóis, nuvens, radiação e precipitação, com o objetivo de entender e quantificar esses processos interligados (MARTIN et al., 2016; MACEDO; FISCH, 2018; MACHADO et al., 2018).

Foram utilizados somente os dados obtidos no ponto denominado de *ARM Site* (Fig. 3.2), também chamado de T3 (MARTIN et al., 2016), que está situado na cidade de Manacapuru/AM (3.2133°S e 60.5987°W). Os dados foram coletados através do Programa de Medida de Radiação Atmosférica (ARM, do inglês, *Program Atmospheric Radiation Measurement*) a partir dos conjuntos de instrumentos denominados *ARM Mobile Facility* (AMF) e *ARM Aerial Facility* (AAF). Estes dados, de forma geral, são muito importantes para a comunidade científica, pois permitem realizar estudos detalhados sobre a evolução do ciclo diurno das nuvens e a interação com os fluxos de radiação (GIANGRANDE et al., 2017) e são úteis para estudos que utilizam a modelagem numérica, podendo ser utilizados como dados de condição inicial e forçantes de larga escala para a integração de modelos numéricos dos tipos CRM, LES e SCM, para o desenvolvimento de parametrizações físicas e podem ser utilizados como dados de referência, assim como no presente estudo, para a avaliação de simulações numéricas.

Figura 3.2 - Área de coleta de dados do Experimento GoAmazon 2014/15.



Fonte: Tang et al. (2016).

Durante a campanha de campo do GoAmazon 2014/15 foram realizados dois períodos intensivos de coleta de dados, chamados de IOP1 (15 de fevereiro 2014 a 25 de março de 2014) e IOP2 (01 de setembro 2014 a 10 de outubro de 2014). Estas IOPs foram definidas visando uma melhor caracterização dos períodos úmido (IOP1) e seco (IOP2) da região Amazônica. Como esta pesquisa visa estudar a interação nuvem-radiação durante o período úmido e seco, os dados observados utilizados serão somente os obtidos durante as IOPs.

Os dados gerados durante o GoAmazon 2014/15 que foram utilizados neste artigo são relacionados às características microfísicas (fração de nuvem e tipo de nuvens) e microfísicas (conteúdo de água e conteúdo de gelo) das nuvens, fluxos de radiação de onda longa e onda curta incidente à superfície terrestre para condições de céu claro e céu com nuvens e variáveis de larga escala (temperatura, ômega, umidade relativa). Para as simulações realizadas com o modelo SAM foram utilizados como forçantes de larga escala (advecção horizontal de temperatura e umidade) e como condição inicial (pressão na superfície e perfis de temperatura, umidade específica, componentes U e V do vento) dados do produto Variational Analysis (VARANAL – Tang et al. 2016). A lista dos dados observacionais utilizados neste artigo e as referências onde podem ser encontradas as

metodologias adotadas para a coleta (instrumentos) ou estimativa (produtos) de cada dado é encontrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Resumo dos dados do GoAmazon 2014/15 que foram utilizados nesse trabalho.

Produtos	Variáveis	Referências
*RADFLUXANAL	Fluxo de radiação de onda longa incidente à superfície	(RIIHIMAKI; GAUSTAD; LONG, 2019)
	Fluxo de radiação de onda longa incidente à superfície – Estimado para céu claro	
	Fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície	
	Fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície – Estimado para céu claro	
	Fração de nuvem total – Estimada pela radiação de onda longa	
*Merged RWP-WACR-ARSCL	Tipo de Nuvem - Merge	(FENG et al., 2014; GIANGRANDE et al., 2017)
	Taxa de precipitação - PWD	
*VARANAL	Temperatura	(TANG et al., 2016)
	Omega	
	Umidade específica	
	Componente U do vento	
	Componente V do vento	
	Advecção horizontal de temperatura	
	Advecção horizontal de umidade específica	
	Pressão na superfície	

\* Nomenclaturas utilizadas nos produtos do GoAmazon 2014/15.

Fonte: Produção do autor.

### 3.1.2 *Tropical Western Pacific (TWP)*

O TWP é um conjunto de experimentos de campo de longa duração (de 1996 a 2014), que foram realizados em três regiões localizadas no oceano pacífico tropical. A estratégia principal era que as medições ocorressem em cinco locais distribuídos no oceano pacífico tropical (LONG; MATHER; ACKERMAN, 2016), e ao longo do equador, com o propósito de estudar as mudanças na convecção e na circulação da célula de Walker associados aos eventos de El Niño Oscilação Sul (ENOS) (BJERKNES, 1969; SOUZA; AMBRIZZI, 2002; BAYR et al., 2018). Entretanto, posteriormente, foram definidos apenas três locais. Na nova configuração os 3 pontos deveriam ser localizados em determinadas regiões devidamente selecionadas pela influência do ENOS: um primeiro ponto localizado na piscina quente tropical, o segundo ponto localizados em uma área de alta variabilidade oceânica e atmosférica associados aos ciclos do fenômeno ENOS e o terceiro ponto na região de subsidência no oceano Pacífico oriental.

Após uma avaliação climatológica baseada, boa parte, em observações de satélite, foi definida a Ilha Manus que está próximo a linha do equador, localizada na piscina quente do pacífico. Esta escolha também foi definida pela localização em uma área plana no Aeroporto de Mamote e pelo grande apoio do governo provincial de Manus, em atividades educacionais. Posteriormente, foi definido outro ponto de coleta de dados mais a leste da Ilha de Manus. Nauru foi escolhida, após análises usando séries temporais de radiação de onda longa, como uma região viável para estudos relacionados à interação da nebulosidade com a radiação de onda longa. Com a necessidade de um local para a manutenção dos experimentos em Manus e Nauru, foi criado um ponto de coleta de dados em Darwin em parceria com *Australian Bureaus of Meteorology*. Darwin não é menos importante que Manus e Nauru, pois seu clima é fortemente impulsionado pela monção australiana, com períodos secos, úmidos e de transição (LONG; MATHER; ACKERMAN, 2016).

Dos três pontos do TWP foram utilizados somente dados observacionais de fluxos de radiação de onda longa e onda curta incidente a superfície. As análises em Darwin foram focadas nos períodos úmido e seco da região. Nas regiões de Manus e Nauru o foco foi em período de atuação dos fenômenos El Niño e Lá Niña. Estes períodos foram escolhidos com o objetivo de realizar as análises sob diferentes condições atmosféricas.

### **3.1.3 *Eastern Tropical Pacific Ocean (ETPO)***

Apesar de ser um ponto sem dados observacionais, a região do ETPO foi escolhida para estudo por apresentar um padrão de nebulosidade distinto das demais regiões estudadas. A ETPO é uma região caracterizada pela presença de uma camada permanente de nuvens de pouco desenvolvimento vertical. Segundo Aguirre et al., (2021), os ventos de baixo nível ao longo da costa oeste da América do Sul subtropical são fortemente influenciados pelo Anticiclone do Pacífico Sudeste (APS), uma célula atmosférica quase estacionária de alta pressão que impulsiona os ventos na direção do equador no Peru e no Chile. A variabilidade deste APS ao longo do ano influencia os ventos de baixo nível ao longo da costa oeste da América do Sul subtropical e a combinação com a temperatura do Oceano Pacífico define a estrutura da nebulosidade nesta região durante o ano. Por isso, é uma região interessante e com características próprias de nebulosidade, que numericamente é difícil de simular pelos modelos de grande escala. Esta dificuldade de simular a nebulosidade pode ser similar ao discutido por Painemal et al., (2021) para a costa leste da América do Norte. Para a região do ETPO, os dados referentes aos fluxos de radiação e fração de nuvens são provenientes do produto ERA5.

### **3.1.4 ERA 5**

O conjunto de dados do ERA5 são de reanálises atmosféricas global produzidas pelo *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Este produto combina grandes quantidades de observações históricas global que são estimadas utilizando um sistema avançado de modelagem numérica e assimilação de dados. Estes dados tem uma resolução horizontal de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  com 37 níveis na vertical e estão disponíveis no período de 1979 até o presente. Para mais detalhes ver Hersbach et al., (2020).

Neste estudo os dados do ERA5 foram utilizados como forçantes de grande escala nas simulações com o Modelo de Interação Nuvem-Radiação (CFRM) e também como dados de referência para avaliação da nova parametrização (taxas de aquecimento, fluxos de radiação e fração de nuvem) e das simulações do Modelo Atmosférico Global Brasileiro (BAM) (temperatura a 2 metros).

### 3.1.5 GPCP

Como dado de referência de precipitação para a avaliação das simulações climáticas com o modelo BAM, foi utilizado o GPCP (*Global Precipitation Climatology Project*). O período de dados disponível é de 1979 até o presente. O GPCP consiste em uma combinação de dados provenientes de estações pluviométricas, satélites e observações de sondagem. Está disponível com uma distribuição espacial para todo o globo com uma resolução de 2,5° de latitude e longitude (ADLER et al., 2003). Para este trabalho foram utilizadas média sazonais (climatologia do verão e inverno austral) no período de 1980 a 2010 (31 anos).

### 3.1.6 CERES

Para a avaliação das simulações climáticas com o modelo BAM dos campos dos fluxos de radiação de onda longa e onda curta na superfície e topo da atmosfera para condições de céu claro e com nebulosidade, bem como a cobertura de fração de nuvens, foi utilizado os dados do *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES). Esses dados são produzidos a partir da combinação de dados provenientes de vários instrumentos instalados a bordo de satélites e resultados de modelos (WIELICKI et al., 1996). Os dados do CERES têm resolução horizontal de 1° x 1° e estão disponíveis desde 2000 até os dias atuais.

## 3.2 Modelos numéricos

### 3.2.1 *System for Atmospheric Modeling* (SAM)

O *Cloud Resolving Model* (CRM) utilizado nesta pesquisa foi o System for Atmospheric Model (SAM), versão SAM6.11.4 de julho de 2020 SAM (KHAIROUTDINOV; RANDALL, 2003). O modelo foi criado a partir de um modelo de Simulação de Grandes Turbilhões (LES, do inglês, *Large-Eddy Simulation*) na Universidade de Oklahoma e posteriormente foram implementadas novas parametrizações para transformá-lo em um CRM. Este modelo pode ser utilizado na versão LES em simulações para convecção rasa e no modo CRM para simulações em que há nuvens de convecção profunda com velocidade verticais acima de 1m/s.

O SAM é um modelo não hidrostático com núcleo dinâmico anelástico. Possui cinco esquemas de microfísica, entre eles, *single-moment microphysics*, *double-moment*



*microphysics* (MORRISON; CURRY; KHVOROSTYANOV, 2005) e *Thompson microphysics* (THOMPSON et al., 2008) e dois esquemas de radiação, sendo o CAM3 *Radiation* (COLLINS et al., 2006) e o RRTM (IACONO et al., 2008).

Os fluxos de superfície podem ser prescritos ou simulados utilizando o modelo de superfície acoplado denominado de *Simplified Land Model* (SLM). O SLM foi desenvolvido para ser utilizado em *Cloud Resolving Model* e possui uma camada de vegetação interativa sobre o solo e suporta 17 classes de tipos de solo. Além de utilizar como dados de entrada perfis de conteúdo de areia, argila, umidade e temperatura do solo. Uma descrição mais completa do SLM é encontrada em Lee e Khairoutdinov (2015).

O modelo SAM é utilizado neste trabalho, principalmente, como complemento aos dados observados. Para isso, verifica-se a consistência do modelo em simular a interação entre cobertura de nuvens e fluxos de radiação e variáveis de grande escala (temperatura, umidade relativa e ômega) para utilizar variáveis que não estão disponíveis no GoAmazon 2014/15, bem como compreender a importância de simular corretamente o padrão de nebulosidade em modelos numéricos.

Para este trabalho o modelo SAM foi configurado utilizando o esquema de microfísica single-moment microphysics, o esquema de radiação CAM3 e os fluxos de superfície foram calculados utilizando o modelo SLM. Os dados de forçantes de larga escala (LSF) e a condição inicial (SND) foram extraídas do produto VARANAL do GoAmazon 2014/15 (TANG et al., 2016). No total foram realizadas 8 simulações, com diferentes resoluções horizontal, sendo 4 configurações para o período da IOP1 e as mesmas 4 para o período da IOP2. Cada simulação foi integrada pelo período total de cada IOP (40 dias), com 64 níveis na vertical e variando apenas nos domínios horizontais.

Para ambas IOPs foram utilizados os seguintes domínios horizontais: 82,944Km<sup>2</sup> (grade de 144x144x64 com resolução horizontal de 2000m), 20,736Km<sup>2</sup> (grade de 144x144x64 com resolução horizontal de 1000m), 5,184Km<sup>2</sup> (grade de 144x144x64 com resolução horizontal de 500m) e 82,944Km<sup>2</sup> (grade de 576x576x64 com resolução horizontal de 500m). O resumo das configurações é mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Resolução da grade horizontal das simulações com o SAM.

Simulação SAM_Np $\Delta$ x	Domínio (X, Y, Z)	$\Delta$ x, $\Delta$ y (m)	$\Delta$ t (s)	Número de dias simulados
SAM_144p2000	144x144x64	2000x2000	10	40
SAM_144p1000	144x144x64	1000x1000	10	40
SAM_144p500	144x144x64	500x500	10	40
SAM_576p500	576x576x64	500x500	10	40

X, Y são os números de pontos na horizontal e Z na vertical.  $\Delta$ x e  $\Delta$ y é o espaçamento de grade em metros,  $\Delta$ t é o passo de tempo em segundos.

Fonte: Produção do autor.

### 3.2.2 *Cloud Fraction-Radiation Interaction Model (CFRM)*

O modelo de interação de fração de nuvens e radiação (CFRM) foi desenvolvido para facilitar os testes de novas parametrizações de nuvens e a sua interação com a radiação. O CFRM tem a vantagem de ser numericamente estável, pois não depende de um passo de tempo, além de facilitar o uso de distintos conjuntos de dados com diferentes resoluções temporais. Entretanto, a desvantagem, é que alguns processos físicos importantes na formação da nebulosidade, como a influência da camada limite, superficial, convecção entre outros, não são considerados, e pode gerar algumas incertezas quando comparados com dados observacionais. No entanto, o CFRM permite avaliar o efeito da variabilidade temporal da nebulosidade na radiação, esse é um aspecto importante desse estudo.

Como mencionado, um dos interesses neste trabalho é avaliar a interação entre as nuvens e a radiação, portanto, no modelo CFRM foram implementadas o código de radiação de onda curta e longa desenvolvida por Chou et al., (2001) e Chou e Suarez, (1999) e uma parametrização de nebulosidade utilizada no modelo BAM-1.2 (COELHO et al., 2021) e a nova parametrização desenvolvida neste trabalho.

#### 3.2.2.1 *Esquema de fração de nuvem (Controle)*

A parametrização de nebulosidade utilizada no modelo BAM-1.2 é baseada em Slingo, (1980) e Slingo, (1987). O esquema de geração de nuvens (*clouds generation scheme*, cldgen) calcula a quantidade da cobertura total de nuvens convectivas em função do

logaritmo da precipitação acumulada nas últimas 3 horas (QCLCP). O topo e a base das nuvens convectivas são ajustados em função do esquema de convecção profunda.

As nuvens convectivas altas devido à forte convecção podem ultrapassar camadas acima de 400mb. Neste caso, utiliza-se outra equação para calcular a fração de nuvens, mas também são calculadas em função da QCLCP. Este procedimento se deve a dificuldade do modelo de umidificar o topo da convecção e conseqüentemente a formação da bigorna por saturação.

As nuvens baixas definidas como stratus são associadas à inversão e o ambiente para a formação destas nuvens é calculado em função do critério de estabilidade, que se utiliza do valor do gradiente vertical de temperatura potencial (DTHDP). O DTHDP é calculado em função da pressão entre camadas para a região abaixo de 700mb. Se DTHDP for menor que zero há probabilidade de ocorrer a inversão. Para certificar-se da ocorrência da inversão, o DTHDP deve ser menor que o seu valor crítico de -0.04 e as camadas acima devem manter esta tendência de redução de DTHDP em relação a camada mais baixa. As nuvens stratus são calculadas em função DTHDP da camada mais abaixo, então se verifica o valor da umidade relativa, se é maior que 80% o cálculo das nuvens stratus é ajustado em função da umidade relativa.

As nuvens geradas por saturação na coluna atmosférica são calculadas em função da umidade relativa seguindo alguns critérios. Em camadas abaixo de 400mb o limiar de umidade relativa adotada é de 80% e camadas acima de 400mb o limiar de 90%. Estas nuvens de saturação na coluna atmosférica podem sofrer alterações em baixos, médios e altos níveis da atmosfera.

As nuvens baixas de saturação são definidas em uma camada fina que fica abaixo de 700mb, nesta região há dois tipos de geração de nuvens, primeiro relacionado ao tipo de inversão e segundo associado ao movimento vertical. Abaixo de 700mb a nuvens de supersaturação são calculadas ajustando as nuvens saturadas em função da velocidade vertical ( $\Omega$ ). Valores de  $\omega$  positivos maiores que  $5e-5Pa/s$  (velocidade descendente) destroem as nuvens de saturação e os valores de  $\omega$  entre ( $5e-5$  e  $-5e-5Pa/s$ ) modificam as nuvens de saturação, através de ajuste usando a velocidade vertical, as nuvens de saturação ajustadas são definidas de nuvens de supersaturação. Valores de

ômega menores do que  $-5e-5\text{Pa/s}$  não modificam as nuvens de saturação abaixo de 700mb.

As nuvens médias de saturação são formadas entre 700 e 400mb e estas nuvens médias são compostas somente por nuvens de saturação.

As nuvens altas de saturação são definidas em camadas acima de 400mb, estas nuvens altas também são compostas somente por nuvens de saturação.

Os resultados finais dos cálculos que são retornados pela parametrização de nuvens são a fração de nuvem convectiva calculada em função QCLCP que é constante da base ao topo e a fração de nuvem de saturação calculada em função de variáveis de grande escala que definem o ambiente da coluna atmosférica.

O maior problema relacionado a esta parametrização está associado a grande espessura optica da cobertura de nuvens geradas por esta parametrização, devido o valor da fração de nuvem ser constante da base ao topo da nuvem.

### 3.2.2.2 Novo esquema de fração de nuvem (Experimento)

A nova parametrização de nuvens proposta neste trabalho utiliza-se da função de distribuição de probabilidade (PDF, do inglês, *Probability Distribution Functions*) de Weibull (WEIBULL; SWEDEN, 1951) aplicada nas variáveis prognósticas de concentrações de água líquida e gelo, descrita pela Equação 3.1, abaixo.

$$f(x) = \left( \frac{\beta}{\theta} \left( \frac{x - \delta}{\theta} \right)^{\beta-1} \right) \left( \text{EXP} \left[ - \left( \frac{x - \delta}{\theta} \right)^{\beta} \right] \right), x \geq \delta \quad (3.1)$$

Onde  $\beta$  é o parâmetro de forma,  $\theta$  é o parâmetro de escala e  $\delta$  refere-se ao parâmetro de localização e  $x$  é uma variável da microfísica de nuvens em que se aplica a distribuição. A principal vantagem da Distribuição de Weibull é que a função pode ter características semelhantes de outras distribuições de probabilidade, porém, tem a capacidade de ser mais flexível ao ajuste de diferentes tipos de dados. O parâmetro  $\beta$  e  $\delta$  são calibrados empiricamente e o parâmetro  $\theta$  é parametrizado em função da umidade relativa de cada camada da coluna atmosférica (Tabela 3.3), e a variável  $x$  contém um valor de referência de concentração de água líquida ou gelo que dispara o cálculo da fração de nuvens em diferentes camadas da atmosfera.

Tabela 3.3 - Resumos dos parâmetros.

Parâmetro	Variável da microfísica	Valores
$\beta$	Água líquida	1.0
	Gelo	1.2
$\theta$	Água líquida	0.9
	Gelo	0.9
$\delta$	Água líquida	0.0
	Gelo	0.0

O parâmetro  $\beta$  e  $\delta$  são calibrados empiricamente e o parâmetro  $\theta$  é parametrizado em função da umidade relativa de cada camada da coluna atmosférica.

Fonte: Produção do Autor

Se a concentração de água líquida ou gelo for maior que este valor de referência (Tabela 3.4) há formação de nuvens. Então, são calculadas duas PDFs de Weibull para o perfil de concentração de água líquida e gelo prognosticada pelo modelo (PDF\_WP) e o mesmo procedimento é realizado para a concentração de água líquida e gelo de referência (PDF\_WR). Com isso, a fração de nuvem é calculada entre a razão das PDFs de Weibull da concentração de água líquida e gelo prognosticada e de referencia (PDF\_WP / PDF\_WR). A parametrização fornece as frações de nuvens devido a presença de água líquida e gelo na nuvem.

Tabela 3.4 - Valores de referência para formação de nuvens.

	Mínimo	Máximo
Água líquida (kg/kg)	$1e^{-10}$	$1e^{-05}$
Gelo (kg/kg)	$1e^{-10}$	$1e^{-04}$

Fonte: Produção do autor.

Após obter os perfis de nuvens para água líquida e gelo realiza-se uma combinação entre os dois perfis para calcular o perfil final da nuvem convectiva. A quantidade da cobertura total de nuvens convectivas QCLCP é calculada em função do valor integrado do perfil de nuvem total na coluna atmosférica. Este esquema não depende de variáveis da convecção profunda, tais como valor de precipitação, topo das nuvens e base das nuvens, somente de água líquida e gelo dos esquemas convectivo e microfísica. Outros esquemas

podem ser acoplados as parametrizações que alteram as variáveis prognósticas de água líquida e gelo (PBL, convecção rasa e profunda e microfísica de nuvens) e prognosticar a tendência como cada parametrização física altera a fração de nuvens.

Quando ocorre uma forte convecção, a fração de nuvens convectivas acima de 400mb é ajustada em função de um valor crítico de fração de nuvem de 0.3. Se a fração de nuvem não exceder este valor não pode ocorrer nuvens convectivas, só ocorrerá nuvens convectivas acima deste valor crítico.

As nuvens baixas definidas como stratus associadas com a inversão, são calculadas para camadas atmosféricas abaixo de 700mb. Para definir em qual camada atmosférica ocorre a inversão utiliza-se o gradiente de temperatura potencial calculado em função dos níveis de pressão DTHDP. Quando DTHDP é menor que zero (estável), é a condição do ambiente para a inversão condicional. Se DTHDP for menor que o valor crítico de -0.04 o ambiente entre duas camadas é aproximadamente neutro. A inversão ocorre se a estabilidade na camada acima DTHDP é menor que a estabilidade na camada abaixo DTHDP. Às frações de nuvens stratus ou de inversão são parametrizadas em função da umidade relativa e o cálculo somente ocorre se a umidade relativa do dia corrente for maior que a média do dia anterior.

As nuvens de saturação na coluna atmosférica gerada pela saturação do ambiente são ajustadas em função de algumas considerações físicas. Para as camadas atmosféricas abaixo de 700mb as nuvens de saturação são ajustadas em função do movimento vertical. Se a diferença entre a velocidade vertical ( $\omega$ ) no passo de tempo corrente e a média do dia anterior ( $\Delta\omega$ ) for maior do que zero, não pode ocorrer a formação das nuvens de saturação. Se  $\Delta\omega$  for maior do que  $-5e-5$  é menor do zero a fração de nuvens de saturação sofre um ajuste em função de  $\Delta\omega$ . O resultado final dos cálculos da parametrização de nuvens são os perfis de fração de nuvens convectivas e de supersaturação.

### **3.2.2.3 Clirad**

Segundo a descrição de Chou e Suarez, (1999), a parametrização de transferência radiativa solar (CLIRAD-SW) inclui a absorção devido ao vapor d'água, ozônio ( $O_3$ ), oxigênio ( $O_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), nuvens e aerossóis. As interações entre a

absorção e o espalhamento por nuvens, aerossóis, moléculas (espalhamento de Rayleigh) e a superfície são considerados. No infravermelho, o espectro é dividido em 3 bandas e o método de distribuição  $k$  é aplicado. A redução do fluxo devido ao  $O_2$  é derivada de uma função simples, enquanto a redução do fluxo devido ao  $CO_2$  é derivada de tabelas pré-calculadas. A reflexão e a transmissão de uma camada carregada de aerossol e nuvem são calculadas usando a aproximação de delta-Eddington. Os fluxos são então calculados usando a aproximação de adição de dois fluxos. Para uma camada de nuvem, a espessura óptica é parametrizada em função da quantidade de água/gelo da nuvem e do tamanho efetivo da partícula, enquanto o albedo simples de espalhamento e o fator de assimetria são parametrizados em função do tamanho efetivo da partícula. As propriedades ópticas do aerossol são parâmetros de entrada especificados para o modelo de radiação (CHOU; SUAREZ, 1999).

Segundo a descrição de Chou et al., (2001), a parametrização da transferência radiativa (CLIRAD-LW) para o infravermelho térmico é formulada para uso em modelos climáticos globais. A parametrização divide o espectro infravermelho em oito bandas e inclui os efeitos dos principais absorvedores da radiação terrestre: vapor d'água, dióxido de carbono e ozônio. Na parametrização nenhuma transmitância é pré-calculada, assim, as camadas atmosféricas e a distribuição vertical dos absorvedores podem ser especificadas livremente. O esquema também pode receber qualquer distribuição vertical de fração de nebulosidade com uma espessura óptica arbitrária (CHOU et al., 2001).

Mais detalhes sobre a eficiência e erros sobre os esquemas CLIRAD-SW e CLIRAD-LW podem ser encontrados em Chou e Suarez, (1999) e Chou et al., (2001).

### **3.2.3 Modelo Atmosférico Global Brasileiro (BAM)**

O BAM-3D é um modelo atmosférico de escala global desenvolvido integralmente pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) e atualmente é utilizado operacionalmente para realizar previsões em escala de tempo. A versão do BAM utilizada nesse trabalho é a 2.2.1 descrita em Lima, (2021).

As equações primitivas do BAM-3D são discretizadas utilizando o método espectral e aproximação hidrostática. O núcleo dinâmico possui duas formulações (euleriano e semi-

lagrangeano) e pode ser facilmente alterada para qualquer uma das duas opções. A coordenada vertical disponível para a integração é a coordenada híbrida.

O esquema de nuvem atualmente utilizado segue uma abordagem diagnóstica no qual a fração de cobertura de nuvens é calculada a partir de valores pré-determinados de velocidade vertical, umidade relativa, temperatura potencial e instabilidade (SLINGO, 1980, 1987).

As condições de contorno inferiores, sobre os oceanos, serão utilizadas as séries temporais prescritas de temperatura da superfície do mar (TSM) a partir da Interpolação Ótima da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA-OISST, do inglês, *National Oceanic and Atmospheric Administration – Optimum Interpolation Sea Surface Temperature*). Os dados estão disponíveis em: [http://www.emc.ncep.noaa.gov/research/cmb/sst\\_analysis/](http://www.emc.ncep.noaa.gov/research/cmb/sst_analysis/).

Tabela 3.5 - Configuração do BAM-3D para as simulações climáticas.

Resolução espacial	T0126L042 (~ 1° x 1° e 42 níveis na vertical)
Dinâmica	Euleriana
Convecção profunda	Arakawa e Schubert simplificado (HAN; PAN, 2011)
Convecção rasa	Tiedtke (TIEDTKE, 1989)
Radiação de onda longa	CLIRAD (CHOU et al., 2001)
Radiação de onda curta	CLIRAD (CHOU; SUAREZ, 1999), modificado por Tarasova e Fomin, (2000)
Microfísica	Morrison (MORRISON; CURRY; KHVOROSTYANOV, 2005)
Camada limite planetária	Bretherton e Park (BRETHERTON; PARK, 2009)
Superfície	IBIS 2.6-CPTEC (KUBOTA, 2012)
Esquema de nuvem	Parametrização controle descrita na Seção 3.2.2.1 (SLINGO, 1980, 1987) Nova parametrização descrita na Seção 3.2.2.2 (WEIBULL; SWEDEN, 1951)

Fonte: Produção do autor



### 3.3 Análises estatísticas dos resultados

Para a avaliação das simulações realizadas com os modelos SAM, CFRM e BAM foram utilizadas algumas métricas estatísticas, são elas: o (3.2) coeficiente de correlação de Pearson, (3.3) BIAS e (3.4) Raiz quadrática do erro-médio (RMSE, do inglês, *Root Mean Squared Error*).

$$\text{Coeficiente de correlação } (r) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (3.2)$$

$$\text{BIAS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (3.3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3.4)$$

Onde  $x_i$  são os resultados das simulações,  $y_i$  são os dados de referência e  $N$  é o número considerado nos cálculos estatísticos.

## **4 ESTUDO DAS INTERAÇÕES ENTRE A NEBULOSIDADE-RADIAÇÃO E AS VARIÁVEIS DINÂMICAS E TERMODINÂMICAS DA ATMOSFERA, BASEADO NOS DADOS OBSERVACIONAIS DO GOAMAZON 2014/15 E EM MODELAGEM NUMÉRICA UTILIZANDO UM CLOUD RESOLVING MODEL**

Este Capítulo visa apresentar um estudo sobre a relação das variáveis dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera na definição da nebulosidade sobre a região central da bacia Amazônica (Figura 3.2). Para esse estudo utilizou-se modelo SAM (Seção 3.2.1) e dados observacionais do GoAmazon 2014/15 (Seção 3.1.1). Inicialmente foi analisada a habilidade do modelo SAM em simular os padrões de precipitação, fração de nuvens e fluxos de radiação de onda curta nos períodos úmidos (IOP1) e seco (IOP2). Adicionalmente, foi analisado a performance do modelo em simular o ciclo diurno das variáveis de larga escala, nuvens e fluxos de radiação. E na última etapa foi avaliada a relação entre as variáveis meteorológicas de larga escala e a fração de nuvens com base nos dados observados e simulados. Estas relações foram utilizadas no desenvolvimento e ajustes de parametrizações de fração de nuvem apresentada na Seção 3.2.2.2.

### **4.1 Sensibilidade da resolução horizontal e validação do modelo SAM**

Esta Seção tem o objetivo de avaliar o impacto da resolução horizontal nas simulações realizadas com o modelo SAM, para os períodos da IOP1 e IOP2 que ocorreram durante o experimento GoAmazon 2014/15. Adicionalmente, o Capítulo avalia a habilidade do modelo em simular os padrões de precipitação, fração de nuvens e radiação durante os referidos períodos que são representativos da estação úmida e seca, respectivamente. Foram testadas 4 diferentes configurações de resoluções horizontais para cada período simulado (IOP1 e IOP2), totalizando 8 simulações (Tabela 3.2).

A Figura 4.1 mostra a série temporal simulada com o SAM e os dados observacionais de referência da fração de nuvem, fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície e taxa de precipitação, para o período da IOP1

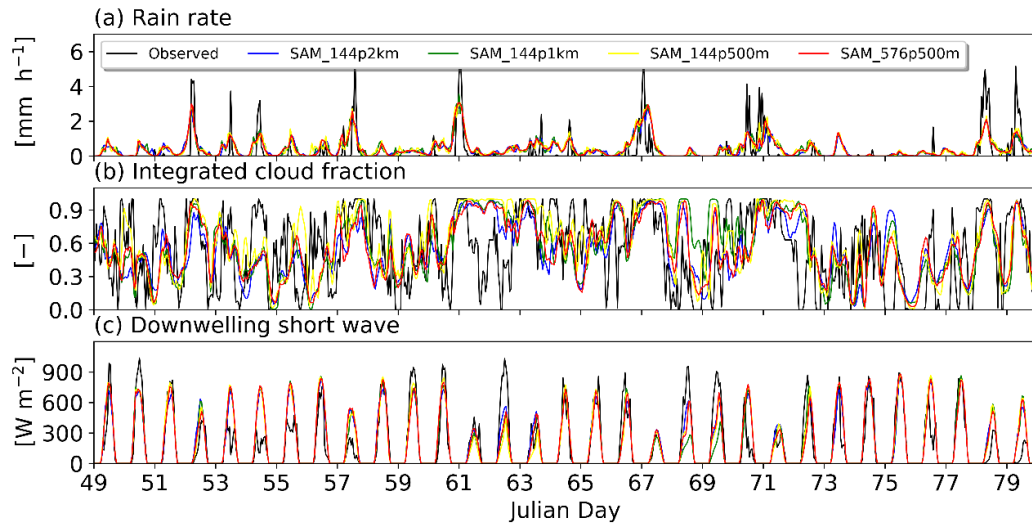
A evolução temporal da taxa de precipitação (Figura 4.1a) é bem representada nas simulações do modelo SAM para o período úmido (IOP1). Apesar de subestimar a intensidade dos picos de máxima precipitação diária, o modelo reproduz o ciclo diário da precipitação observada, com picos máximos bem definidos e taxas de precipitação acima

de 2,5 mm h<sup>-1</sup>. A consistência do modelo SAM, principalmente em representar a precipitação já foi mostrada por outros autores, porém, para outras regiões do planeta (KHAIROUTDINOV; RANDALL, 2003; BLOSSEY et al., 2007). O bom desempenho do modelo SAM deve-se aos dados utilizados como forçantes de larga escala (neste estudo VARANAL/GoAmazon 2014/15) para representar a dinâmica em modelos do tipo CRM e SCM. Essas forçantes são produzidas utilizando, em parte, dados de precipitação provenientes de produtos de radar e medidas observacionais in situ (TANG et al., 2016).

A simulação da fração de nuvem (Figura 4.1b) pelo modelo SAM é consistente com os dados observados. Na série temporal da IOP1 (período úmido) é observado que os picos máximos de precipitação (Figura 4.1a) estão associados aos valores máximos de fração de nuvem. Durante os máximos de fração de nuvens, verifica-se ainda uma diminuição no fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície (Figura 4.1c). Estes resultados são fisicamente consistentes, pois a presença de nuvens principalmente aquelas de convecção profunda, tendem a gerar grandes volumes de precipitação e diminuem a quantidade da radiação solar transmitida à superfície terrestre.

É importante mencionar que a fração de nuvens observada, usada no presente estudo, é uma medida pontual e indireta da condição de nebulosidade, sendo estimada a partir da radiação de onda longa descendente observada (DÜRR, 2004; RIIHIMAKI; GAUSTAD; LONG, 2019). Nesse contexto, destaca-se o dia juliano 61 (02 de março de 2014), em que apesar das simulações e as observações concordarem com ausência de chuva e baixa incidência de radiação solar, as simulações divergem com relação ao ciclo diário da fração de nuvens. A observação indica uma evolução temporal da fração de nuvens ao longo do dia com valores abaixo de 0.6, enquanto que as simulações apresentam valores praticamente constantes e próximos de 1. Imagens de satélite GOES-13 (não apresentado aqui) mostram a presença de nuvens do tipo multicamadas ao longo de todo o dia, próximo a região experimental, discordando assim das observações. Neste sentido, a fração de nuvens usada neste trabalho deve ser considerada um *proxy* da condição de nebulosidade. Por ser uma estimativa a partir de outra variável, pode apresentar alguma inconsistência como nesse caso. Assim, justifica-se a importância de usar como complemento ao dado observado, os resultados das simulações do modelo SAM.

Figura 4.1 - Série temporal da fração de nuvem integrada, taxa de precipitação e fluxo de radiação de onda curta para a IOP1.



Os valores de fração de nuvem 0 indica céu sem nuvens e 1 céu totalmente coberto por nuvens. A unidades da taxa de precipitação de fluxos de radiação são  $\text{mm h}^{-1}$  e  $\text{W m}^{-2}$ , respectivamente. As linhas de cor preta são os dados de referência (observados) e as linhas de demais cores representam as diferentes resoluções horizontais.

Fonte: Produção do autor.

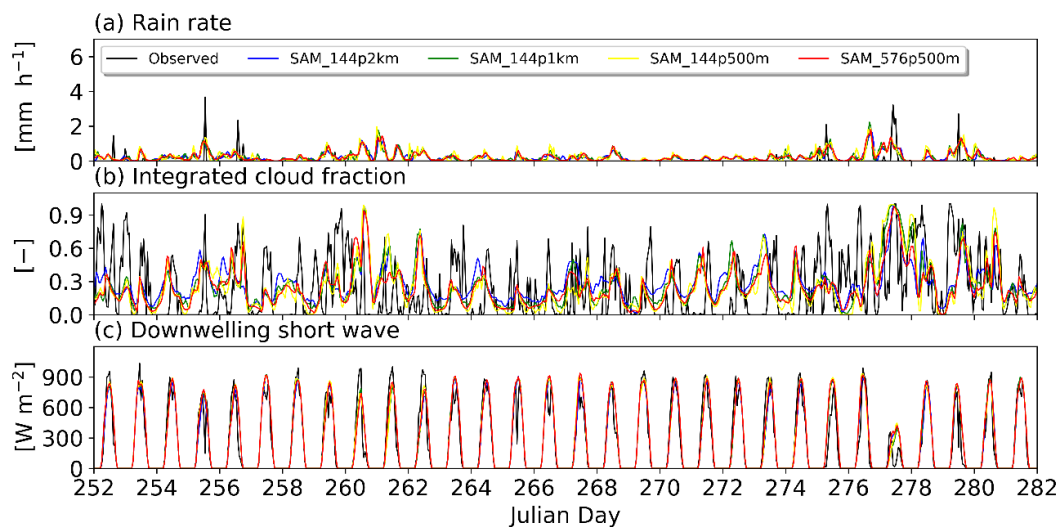
A Figura 4.2 é similar a Figura 4.1, porém, para o período seco (IOP2). Como esperado para o período seco na região amazônica, o modelo SAM simulou taxas de precipitação (Figura 4.2a) menores em relação ao período úmido (IOP1), consistente com os dados observados. Os picos da taxa de precipitação de valores abaixo de  $2.0 \text{ mm h}^{-1}$  também são simulados corretamente, igualmente como no período úmido (IOP1). A fração de nuvem (Figura 4.2b) indica uma menor quantidade da presença de nuvens no período seco em relação ao período úmido, tanto para os dados observacionais quanto para as simulações com o modelo SAM.

Os fluxos de radiação de onda curta incidente à superfície (Figura 4.2c) são maiores no período seco em relação ao período úmido, devido a menor quantidade de nuvens presente neste período. No entanto, as observações mostram que os últimos dias do período seco são caracterizados como sendo os mais úmidos e com taxa maior de precipitação ao longo deste período. Essa característica da série temporal é bem representada pelas simulações. Destaca-se o dia juliano 277 (04 de outubro de 2014), em que há uma diminuição da quantidade de onda curta incidente à superfície devida a alta frequência de cobertura de nuvens (Figura 4.2b) e ocorrência de precipitação (Figura 4.2a).

De forma geral, o modelo SAM tem a habilidade de simular adequadamente os diferentes padrões de precipitação, fração de nuvens e fluxo de radiação de onda curta observados nos períodos úmido (IOP1) e seco (IOP2) para a região amazônica. Esses resultados estão relacionados em parte às forçantes de larga escala (VARANAL/GoAmazon 2014/15) que são utilizadas nas simulações. Essas forçantes utilizadas durante a integração são geradas a partir da precipitação observada e elas determinam as condições de grande escala dos sistemas atmosféricos que atuam na região de estudo para o modelo SAM. Além do mais, os resultados consistentes estão relacionados as opções de parametrizações físicas utilizados nas simulações.

Outros autores (KHAIROUTDINOV; RANDALL, 2003; BLOSSEY et al., 2007) já mostraram a boa habilidade do modelo SAM em simular as variáveis observadas em outras regiões do planeta. Entretanto, para as estações seca e úmida da região amazônica não foram encontrados na literatura, trabalhos que utilizam o modelo SAM.

Figura 4.2 - Série temporal da fração de nuvem integrada, taxa de precipitação e fluxo de radiação de onda curta para a IOP2.



Os valores de fração de nuvem 0 indica céu sem nuvens e 1 céu totalmente coberto por nuvens. A unidades da taxa de precipitação de fluxos de radiação são  $\text{mm h}^{-1}$  e  $\text{W m}^{-2}$ , respectivamente. As linhas de cor preta são os dados de referência (observados) e as linhas de demais cores representam as diferentes resoluções horizontais.

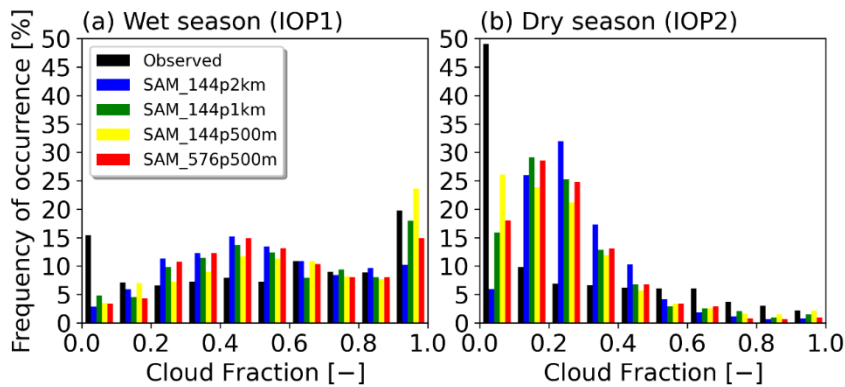
Fonte: Produção do autor.

As Figuras 4.3a e 4.3b mostram os histogramas de distribuição de fração de nuvens na região amazônica, para o período úmido (IOP1) e seco (IOP2). A distribuição da fração de nuvens é apresentada para os dados observados e para as simulações do modelo SAM, com diferentes resoluções horizontais.

No período da IOP1 (Figura 4.3a) é observado no histograma de distribuição um pico de valores máximos (acima de 0,9) de fração de nuvens. A distribuição da fração de nuvens está consistente com as características meteorológicas desse período, em que há mais presença de nuvens devido a convecção local e a presença de sistemas de grande escala que favorecem a convecção na região, como linhas de instabilidade (Cohen, et al. 1995), CCMs (Complexo Convectivo de Mesoescala) e a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical). O modelo SAM simula adequadamente o padrão de distribuição de nuvens para o período úmido (IOP1) na Amazônia. As diferentes resoluções horizontais mostraram resultados semelhantes entre elas, havendo diferença para os valores máximos de fração de nuvem, porém não significativa. Com relação a observação, o modelo SAM em todas as resoluções apresentou um número menor de casos com fração de nuvens abaixo de 0,2. No entanto, estes casos de baixa nebulosidade (fração  $<0,2$ ) é observada por períodos muito curtos durante o IOP1 (Figura 4.1b). Para outros valores de fração de nuvem o modelo simula razoavelmente bem, acompanhando a distribuição dos dados observacionais.

No período seco (Figura 4.3b), o padrão observado e simulado de distribuição de fração de nuvens é inverso ao período úmido, com número menor de casos com fração de nuvens acima de 0,4. Este padrão é esperado, sabendo que no período seco a maior parte da convecção é gerada por fatores locais, sem significativas influências da grande escala. O modelo SAM apresentou uma deficiência em simular valores de fração de nuvens abaixo de 0,4. Essa é uma característica esperada, uma vez que as parametrizações de fração de nuvens, de forma geral, têm deficiência em simular condições de céu parcialmente claro com presença de nuvens rasas. As simulações em todas as diferentes resoluções horizontais representam bem a distribuição de fração de nuvens.

Figura 4.3 - Histograma de distribuição da fração de nuvem integrada para os dados observados e simulados com o modelo SAM para os períodos das IOP1 e IOP2.



O valor 0 representa céu sem nuvem e 1 céu completamente nublado. A barra preta é referente aos dados observados e as demais cores são as simulações com SAM com diferentes resoluções horizontais.

Fonte: Produção do Autor.

Na Tabela 4.1, o coeficiente de correlação da precipitação e da radiação de onda curta entre os dados observados e simulados apresenta uma boa correlação indicando que a variabilidade do dado observado é bem simulada pelo modelo. Entretanto, os BIAS e RMSEs indicam que os dados simulados pelo SAM são superestimados em relação a observação.

A análise estatística da fração de nuvem não mostra valores satisfatórios para os índices estatísticos, provavelmente devido a metodologia do cálculo da fração de nuvem obtida com dados observados (RIIHIMAKI; GAUSTAD; LONG, 2019) e como é parametrizado no modelo SAM (KHAIROUTDINOV; RAMDALL, 2003) que produzem valores de fração de nuvem distintos.

Desta forma, a partir do histograma de distribuição da fração de nuvem integrada (Figura 4.3) e das análises estatísticas (Tabela 4.1) não foi possível definir uma melhor configuração de resolução horizontal para ser usada no trabalho, por isso optou-se por utilizar a média entre as 4 resoluções (ensemble) para as demais análises.

Tabela 4.1 - Resumo da análise estatística entre as simulações com o modelo SAM e os dados observacionais do GoAmazon 2014/15.

	PRP			CF			SW		
<b>Simulações (IOP1)</b>	<b>r</b>	<b>BIAS</b>	<b>RMSE</b>	<b>r</b>	<b>BIAS</b>	<b>RMSE</b>	<b>r</b>	<b>BIAS</b>	<b>RMSE</b>
SAM_144p2km	0,63	0,16	0,68	0,34	0,00	0,34	0,85	11,04	144,24
SAM_144p1km	0,62	0,16	0,69	0,33	0,03	0,36	0,81	8,56	160,72
SAM_144p500m	0,62	0,17	0,69	0,41	0,07	0,35	0,82	9,37	156,62
SAM_576p500m	0,65	0,17	0,67	0,36	0,02	0,34	0,83	13,04	152,05
SAM_Ensemble	0,64	0,17	0,68	0,38	0,03	0,34	0,83	10,50	151,12
<b>Simulações (IOP2)</b>	<b>r</b>	<b>BIAS</b>	<b>RMSE</b>	<b>r</b>	<b>BIAS</b>	<b>RMSE</b>	<b>r</b>	<b>BIAS</b>	<b>RMSE</b>
SAM_144p2km	0,24	0,19	0,39	0,17	0,05	0,30	0,94	7,79	106,16
SAM_144p1km	0,20	0,19	0,41	0,24	0,02	0,30	0,95	14,29	104,44
SAM_144p500m	0,24	0,20	0,42	0,27	0,01	0,30	0,95	18,24	106,44
SAM_576p500m	0,23	0,20	0,40	0,24	0,01	0,29	0,94	17,91	108,31
SAM_Ensemble	0,24	0,19	0,39	0,24	0,02	0,29	0,95	14,55	105,28

O coeficiente de correlação (r), BIAS e RMSE foram calculados entre os dados observados e cada simulação com diferentes resoluções horizontais. Para o período úmido (IOP1) e seco (IOP2).

Fonte: Produção do autor.

Nesta etapa, é mostrado que as simulações dos períodos da IOP1 e IOP2, que ocorreram durante o experimento GoAmazon 2014/15, com o modelo SAM são satisfatórias analisando as séries temporais de precipitação, fração de nuvens e fluxo radiativo de onda curta. Na próxima secção deste Capítulo é realizada uma discussão mais detalhada para o caso de dois dias específicos. A escolha dos casos, representa um dia típico do período úmido e outro do período seco, assim, pode-se avaliar a habilidade do modelo SAM (sendo a média entre as diferentes resoluções horizontais) e a consistência física entre as variáveis relacionadas à interação nuvem-radiação.

#### 4.2 Ciclo diurno das variáveis de larga escala e fluxos de radiação

Nesta Seção, os resultados são discutidos para duas datas distintas e com características típicas do período úmido (Dia juliano 52, 21 de fevereiro de 2014 - IOP1) e seco (Dia juliano 277, 04 de outubro de 2014 - IOP2). Outros dias foram analisados, mas apenas



esses dois dias foram escolhidos para ilustrar os resultados principais encontrados. Além disso, os dias foram escolhidos em função da presença dos tipos de nuvens, em especial em que as ocorrências de nuvens altas, médias e baixas fossem bem definidas no decorrer do dia. Ou seja, procurou-se analisar dois dias em cada tipo de nuvem tivesse ocorrência constante por um período de pelo menos 2 horas e que fosse dominante em relação a outro tipo de nuvens. O objetivo principal é avaliar o comportamento das variáveis de larga escala e os fluxos de radiação em relação à presença de diferentes tipos de nuvens. Também é importante saber se o modelo SAM simula de forma consistente o papel da nebulosidade na interação com fluxos de radiação e variáveis de grande escala, devido à necessidade de utilizar variáveis do modelo que não são possíveis de obter observacionalmente, no caso deste estudo o conteúdo de água líquida e gelo.

As Figuras 4.4a e 4.4b mostram o ciclo diurno, do dia 21 de fevereiro de 2014, das variáveis observacionais e provenientes das simulações realizadas com o modelo SAM, respectivamente. As variáveis analisadas são: tipos de nuvens, perfil de fração de nuvens, radiação incidente à superfície de onda longa e onda curta, taxa de precipitação, fração de nuvens integrada na coluna. Adicionalmente, as Figuras mostram as anomalias em relação à média do dia anterior para os perfis de temperatura, omega e umidade relativa. Essas anomalias são importantes na avaliação, pois são produzidas pelos processos físicos (entranhamento, detranhamento, *updraft*,  *downdraft*, energia estática, etc.) relacionados a diferentes tipos de nuvens (convectivas, rasas, stratus, cirros, etc.), além de que são variáveis, geralmente, utilizadas nas parametrizações de fração de nuvem.

Os dados observados (Figura 4.4a) mostram a evolução dos tipos de nuvens durante o dia 21 de fevereiro de 2014. Nas primeiras horas do dia há presença de nuvens do tipo Cirrus em altos níveis e nuvens associadas à convecção rasa em baixos níveis. Aproximadamente às 06 horas local, quando inicia o aquecimento por radiação solar ocorre uma evolução das nuvens rasas para do tipo Congestus e posteriormente para nuvens de convecção profunda (entre 08 e 13 horas local). Após a convecção profunda e ocorrência de precipitação, no restante do dia, é observado a presença de nuvens altas e algumas nuvens baixas rasas.

Para o fluxo de radiação de onda curta, observa-se que há um efeito negativo, ou seja, uma diminuição da radiação incidente à superfície, na presença de nuvens do tipo

cumulos congestus e cumulonimbus. Entretanto, o maior efeito negativo do fluxo de radiação de onda curta ocorre na presença de convecção profunda que apresenta grande espessura óptica e geométrica, além de topo alto e frio. Esses tipos de nuvem refletem parte da radiação de onda curta de volta ao espaço, e absorvem a radiação solar incidente, diminuindo a quantidade de radiação à superfície. A linha vermelha, que mostra o efeito radiativo de nuvens (diferença entre fluxos na condição de céu com nuvens e céu claro), indica claramente uma diminuição do fluxo de radiação de onda curta de cerca de  $800 \text{ W m}^{-2}$  observado na presença de nuvem relacionado a convecção profunda (Deep).

Além de uma atmosfera bastante úmida, os diferentes tipos de nuvens também interferem distintamente nos fluxos de radiação de onda longa. Nuvens com base baixa e grande desenvolvimento vertical, como os congestos e convecção profunda apresentam maior forçante radiativa, aumentando em até  $40 \text{ W m}^{-2}$  a radiação de onda longa descendente à superfície. Por outro lado, nuvens altas e formada por cristais de gelo, como Cirrustratus, apresentam forçante de  $20 \text{ W m}^{-2}$ , enquanto Cirrus tem efeito nulo em termos da radiação de onda longa descendente.

A variável fração de nuvem integrada mostra valores próximos de 1, indicando que o céu estava totalmente coberto por nuvens, durante as primeiras horas da manhã até aproximadamente as 13 horas local. Nesse período é observada a presença de nuvens dos tipos *Shallow*, *Congestus* e *Deep*. No início da noite, às 18 horas local, observa-se a diminuição da fração de nuvens, que está associada à presença de algumas nuvens *Cirrus*.

As variáveis de larga escala como temperatura, omega e umidade relativa foram analisadas, pois são de grande importância na representação das características microfísicas na formação das nuvens e também são utilizadas para estimar a nebulosidade nos modelos numéricos atmosféricos, a partir de parametrizações de fração de nuvens (GEOFFROY; SHERWOOD; FUCHS, 2017). Essas variáveis foram analisadas em forma de anomalias em relação à média do dia anterior. As características médias do dia anterior podem indicar no cálculo da anomalia das variáveis de larga escala (temperatura, ômega e umidade relativa) se há a atuação de algum sistema de grande escala ou condições ambientais mais intensas favoráveis a formação de diferentes tipos de nuvens.

Na Figura 4.4a, de 00 a 09 horas local é observado na atmosfera um comportamento favorável a geração de convecção profunda, onde há uma tendência de anomalia negativa de temperatura em médios níveis e positiva em baixos níveis, fortes movimentos verticais ascendentes em todo perfil atmosférico e grande quantidade de umidade relativa na média e baixa atmosfera. Após esse horário é observada, de fato, a presença de nuvens associadas à convecção profunda. A precipitação ocorre entre 04 e 11 horas local e está associada a nuvens *Shallow*, *Congestus* e *Deep*. Após a precipitação, há o aquecimento da atmosfera devido a liberação de calor latente, movimentos verticais subsidentes fracos e anomalia positiva de umidade relativa.

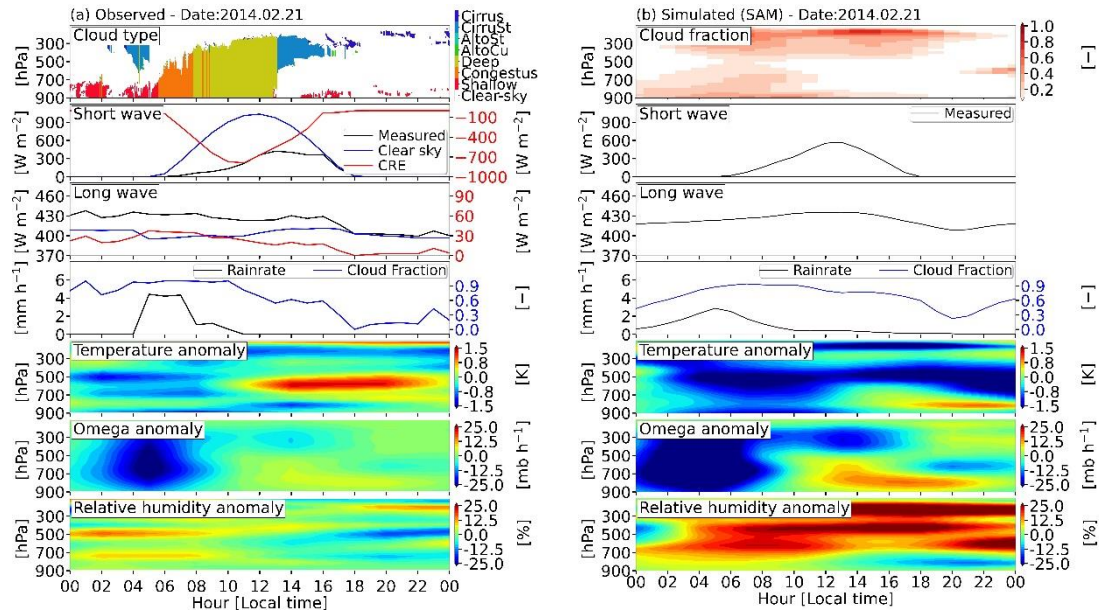
A Figura 4.4b, mostra o ciclo diurno do perfil simulado pelo SAM de fração de nuvens, radiação de onda longa e onda curta incidente à superfície, fração de nuvem integrada, precipitação e as anomalias de temperatura, ômega e umidade relativa em relação à média do dia anterior.

O padrão do perfil de fração de nuvem simulado com o modelo SAM é similar ao padrão de distribuição dos tipos de nuvens obtidos a partir dos dados observacionais (Figura 4.4a), entretanto, a fração de nuvem do modelo SAM é descrita em termos de intensidade, em que 1 representa céu completamente nublado e 0 céu claro. Durante o ciclo diurno, nas primeiras horas do dia (de 00 às 06 horas local), assim como nos dados observados, há presença de nuvens em baixos e altos níveis. A partir das 06 horas local, o modelo SAM mostra nuvens em todas as camadas da atmosfera, indicando a evolução para convecção profunda, entretanto, esse padrão persiste somente até aproximadamente às 08 horas local. Os dados observados indicam que há presença de nuvens geradas em função da convecção profunda até as 13 horas local. Após esse horário (entre 13 e 00 horas local), o modelo SAM simulou a presença de nuvens em altos e baixos níveis, assim como mostra os dados observados.

Os fluxos incidentes na superfície, de radiação de onda curta e onda longa simulados com o modelo SAM mostram um comportamento similar aos dados observados, tanto em termos do padrão do ciclo diurno quanto em magnitude dos valores. A radiação de onda longa, assim como nos dados observados, mostra aumento no fluxo incidente à superfície na presença de nuvens. Nuvens com base baixa e, portanto, mais quentes, emitem maior quantidade de radiação de onda longa em direção a superfície terrestre. As anomalias de

temperatura, omega e umidade relativa obtidas do modelo SAM mostraram o padrão similar, porém com modulo das intensidades das anomalias maiores em comparação aos dados observados.

Figura 4.4 - Ciclo diário da nebulosidade, fluxos de radiação e anomalias das variáveis de larga escala para o dia 21 de fevereiro de 2014.



As Figuras do painel (a) são derivadas do GoAmazon 2014/15 e do painel (b) é a simulação proveniente do modelo SAM. O CRE foi calculado pela diferença entre os fluxos de radiação para céu claro e céu com nuvens. As anomalias das variáveis de larga escala foram calculadas em relação à média do dia anterior.

Fonte: Produção do autor.

As Figuras 4.5a e 4.5b mostram o ciclo diurno das mesmas variáveis da Figura 4.4a (observado) e 4.4b (modelo SAM), porém para um dia do período seco (04 de outubro de 2014 - IOP2).

O ciclo diurno dos tipos de nuvens (Figura 4.5a) mostra que nas primeiras horas do dia (entre 00 e 06 horas local) há presença de nuvens altas (*Cirrus*) e baixas (*Shallow e Congestus*), logo após (entre 07 e 14 horas local) é observada a evolução de nuvens rasas (*Shallow*) para convecção profunda (*Deep*) e nos horários posteriores é possível observar a presença de nuvens altas que persistem até o final do dia (entre 14 e 23 horas local). Tanto os fluxos de radiação de onda curta quanto os fluxos de onda longa mostram variações relacionadas aos diferentes tipos de nuvens presentes na atmosfera. Entretanto, durante a presença da convecção profunda o modelo SAM tem deficiência em simular a

atenuação da radiação de onda curta. As propriedades físicas e a quantidade de água líquida e gelo e outros hidrometeoros podem afetar a atenuação da radiação de onda curta pelas nuvens. Estas e outras considerações físicas são discutidas nas próximas secções.

A fração de nuvem integrada mostra maiores valores (aproximadamente 1) em horários com a presença de nuvens altas/baixas e onde ocorre convecção profunda. Somente na presença de nuvens altas, os valores de fração de nuvens são baixos, em torno de 0.1 e 0.2. Como mencionado anteriormente, a fração de nuvem integrada observada é estimada a partir do fluxo de radiação de onda longa, isso pode levar a erros nas estimativas, principalmente da estimativa da fração de nuvens altas. Devido a grande quantidade de umidade em baixos níveis na região amazônica, o fluxo de radiação de onda longa emitido pelas nuvens altas é pouco transmitido à nível da superfície, parte da radiação emitida pela nuvem é absorvida pelo vapor d'água nos níveis baixos, o qual reemite em direção à superfície. Sendo assim, a radiação de onda longa descendente a superfície é pouco sensível à radiação emitida por nuvens altas e, isso pode explicar os baixos valores observados de fração de nuvens na presença de nuvens altas do tipo *Cirrus* e *Cirrustratus*. Nas simulações a fração de nuvens tende a ser maior.

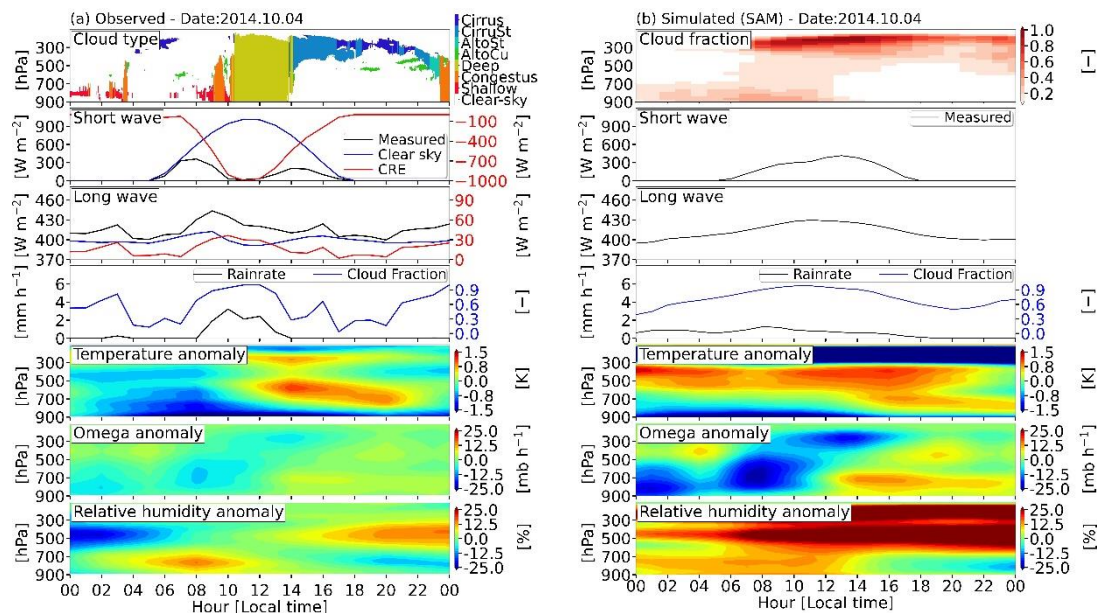
As anomalias em relação à média do dia anterior de temperatura, omega e umidade relativa, descrevem bem o comportamento atmosférico para a geração das nuvens presentes durante o ciclo diurno. Antes da convecção profunda, a atmosfera está com anomalias negativas de temperatura, a variável omega indica a que há movimentos verticais ascendentes (omega negativo) e há disponibilidade de vapor d'água para condensação indicado pelas anomalias positivas de umidade relativa. Logo após a precipitação que ocorre na presença das nuvens relacionadas a convecção profunda (entre 06 e 14 horas local) observa-se anomalias positivas de temperaturas, possivelmente relacionada a liberação de calor latente.

A Figura 4.5b mostra o ciclo diurno das variáveis simuladas com o modelo SAM. A simulação do perfil de fração de nuvens está semelhante ao padrão dos tipos de nuvens obtidos a partir dos dados observacionais. Os valores simulados do perfil de fração de nuvens, que variam de 0 para céu claro e 1 para céu totalmente nublado, são capazes de indicar claramente a presença dos diferentes tipos de nuvens (altas, baixas e profundas). De forma geral, o padrão de fração de nuvens simulado com o modelo SAM representou

bem o padrão dos tipos de nuvens presentes durante o ciclo diurno observados. Os fluxos de radiação de onda curta e onda longa são impactados pela presença dos diferentes tipos de nuvens na atmosfera, principalmente de convecção profunda. Essas variações nos fluxos radiativos, também, são observadas nos dados de referência (Figura 4.5a).

A fração de nuvem integrada simulada mostra um máximo (aproximadamente 1.0) nos horários em que há nuvens relacionadas à convecção profunda. Na presença de nuvens altas são observados valores de fração de nuvens de aproximadamente 0.5. Isso indica o bom desempenho do modelo SAM em simular as variáveis relacionadas às nuvens.

Figura 4.5 - Ciclo diário da nebulosidade, fluxos de radiação e anomalias das variáveis de larga escala para o dia 04 de outubro de 2014.



As Figuras do painel (a) são derivadas do GoAmazon 2014/15 e do painel (b) é a simulação proveniente do modelo SAM. O CRE foi calculado pela diferença entre os fluxos de radiação para céu claro e céu com nuvens. As anomalias das variáveis de larga escala foram calculadas em relação à média do dia anterior.

Fonte: Produção do autor.

### 4.3 Relação entre as variáveis meteorológicas de larga escala e a fração de nuvens

As duas últimas seções mostraram qualitativamente que o modelo SAM apresenta um excelente desempenho nas simulações de variáveis associadas às nuvens e de grande escala, bem como mostra boa descrição dos processos de formação de nuvens e interação da radiação e nuvens.

Essa Seção mostra as relações entre as variáveis de larga escala (temperatura,  $\omega$  e umidade relativa), fração de nuvens, fluxos de radiação e conteúdo de água líquida/gelo a partir de gráficos de dispersão. O objetivo é analisar o quanto as variáveis estão correlacionadas entre si, principalmente com a fração de nuvem. Busca-se assim entender a interação dos fluxos de radiação com a fração de nuvens, bem como determinar relação entre os valores de fração de nuvens e as anomalias das variáveis de larga escala e conteúdo de água líquida/gelo, com o objetivo de propor essas relações para usar na parametrização física relacionada à geração, manutenção e dissipação de nebulosidade.

Para isso, considera-se uma amostra maior de dias dentro dos períodos úmido e seco. Foram selecionados 7 dias do período úmido (IOP1) e 5 dias do período seco (IOP2). Similar a Seção anterior, o critério para as escolhas dos dias foi baseado na presença de um ciclo diurno bem definido de nuvens, em que foi possível verificar, a partir dos observacionais, a presença de nuvens altas (Cirrus), nuvens relacionadas à convecção rasa (Shallow) e convecção profunda (Deep). Nas Figuras foram utilizados todos os dias escolhidos de cada período e para a camada atmosférica entre 965 hPa e 90 hPa. Para as variáveis de larga escala foram utilizados somente os valores referentes às condições ambientais que estão associadas à formação de nuvens, os valores mínimos de anomalia de temperatura, mínimos de anomalia de  $\omega$  (quando negativo indicam movimento vertical ascendente) e máximos de anomalia de umidade relativa. Os valores máximos/mínimos são extraídos a partir do perfil vertical de cada variável.

#### **4.3.1 As relações entre a radiação, dinâmica e termodinâmica com a fração de nuvens a partir dos dados observados do GoAmazon 2014/15**

Foram analisados os gráficos de dispersão entre a fração de nuvem integrada e os fluxos de radiação de onda longa (Figura 4.6a) e onda curta (Figura 4.6b), anomalias de temperatura e umidade relativa (Figura 4.6c), valores mínimos de anomalia de temperatura (Figura 4.6d), mínimos de anomalia de  $\omega$  (Figura 4.6e) e máximos de anomalia de umidade relativa (Figura 4.6f), para o período úmido (IOP1) utilizando os dados observados do GoAmazon 2014/15.

O gráfico de dispersão do fluxo de radiação de onda longa em relação a fração de nuvem (Figura 4.6a), mostra uma tendência positiva, ou seja, os maiores valores de fração de nuvens estão associados a maiores valores de fluxo de radiação de onda longa. Esses

resultados indicam que o efeito radiativo de nuvens para radiação de onda longa intensifica com o aumento de cobertura de nuvens na atmosfera. Por outro lado, os maiores valores de fração de nuvens estão associados a uma diminuição na radiação de onda curta incidente à superfície (Figura 4.6b), principalmente na presença de nuvens de convecção profunda (*Deep* – marcadores amarelos). Essas nuvens apresentam valores altos de albedo, refletindo grande parte da radiação solar incidente no planeta de volta para o espaço, e adicionalmente atenuam a radiação solar descendente.

A Figura 4.6c mostra a relação entre as anomalias mínimas de temperatura e máximas de umidade relativa, e indica uma tendência negativa entre as duas variáveis. No primeiro quadrante da Figura é observado que nuvens altas (Cirrus e Cirrostratus) e médias (Altostratus) estão associadas a anomalias positivas de temperatura e de umidade relativa. No segundo quadrante, as anomalias positivas de temperatura e negativas de umidade relativa são observadas para nuvens do tipo de convecção rasa (Shallow) e Cirrus. No processo de formação dessas nuvens, as mudanças de fase do vapor d'água para água líquida e gelo tendem a aquecer a atmosfera.

O quarto quadrante mostra que anomalias negativas de temperatura e anomalias positivas de umidade relativa estão principalmente relacionadas a nuvens do tipo de convecção profunda (Deep). Os valores positivos de anomalia de umidade relativa estão associados a advecção horizontal de umidade e os valores negativos de anomalia de temperatura com a advecção vertical que favorece a ascensão do ar úmido e quente, conseqüentemente a descida de ar seco e frio para níveis inferiores da atmosfera resfriam o ambiente.

As variáveis de larga escala (temperatura, omega e umidade relativa) que são comumente utilizadas em parametrizações de fração de nuvens são mostradas nas Figuras 4.6d, 4.6e e 4.6f, respectivamente. A fração de nuvens tende a aumentar com a anomalia negativa de temperatura. Neste caso, as parcelas de ar quente e úmido da região amazônica se elevam e sofrem processo de expansão e condensação formando as nuvens, e conseqüentemente resfriando o ambiente. Nuvens de convecção profunda (marcadores amarelos) são observadas quando as anomalias de temperatura estão entre -1 e -2 K e no intervalo de fração de nuvens de 0,4 e 1. Para nuvens do tipo Shallow (marcadores vermelhos) é observado que anomalias positivas de temperatura estão relacionadas a

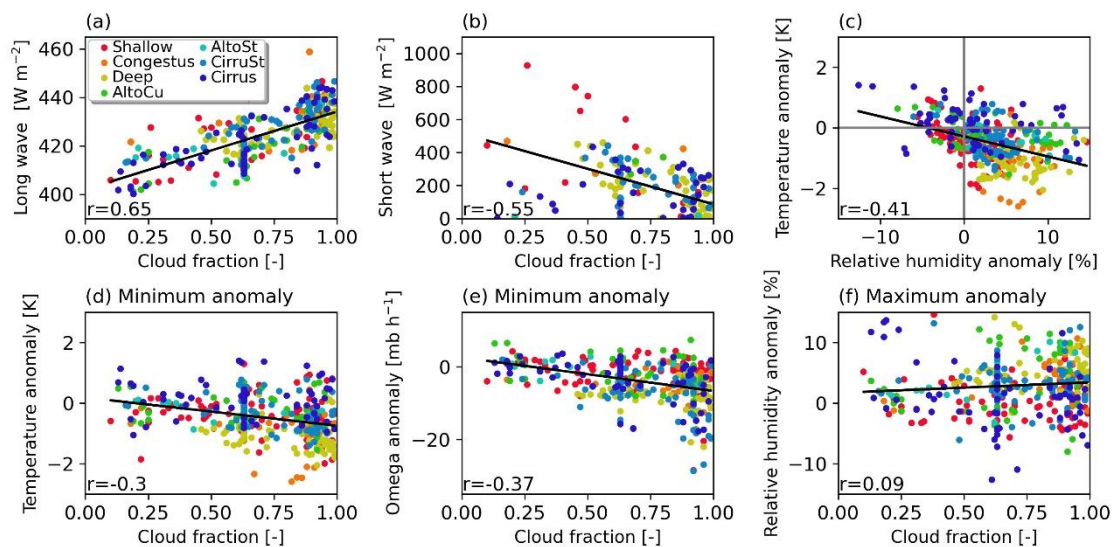


anomalias negativas de umidade relativa, sendo associadas ao processo de condensação do vapor d'água.

A Figura 4.6e mostra que a fração de nuvens tem tendência positiva com anomalia negativa de ômega. Os valores mínimos de anomalia negativas de ômega indicam movimentos verticais ascendentes fortes na atmosfera favorecendo a formação de nuvens.

Não foi encontrada relação significativa entre fração de nuvens e anomalia de umidade relativa (Figura 4.6f). Entretanto, as nuvens relacionadas a convecção profunda (marcadores amarelos) aparecem somente relacionadas a valores de anomalia positiva de umidade relativa, indicando que para formação desse tipo de nuvem é necessário que a atmosfera esteja bastante úmida.

Figura 4.6 - Dispersão entre a fração de nuvens observada e radiação de onda longa, radiação de onda curta, taxa de precipitação, valores mínimos da variância de temperatura, mínimo de omega e máximo de umidade relativa para os casos selecionados durante o IOP1.



Cada cor representa um tipo de nuvem, blue (Cirrus), cobalt (CirruSt), teal (AltoSt), green (AltoCu), yellow (Deep), orange (Congestus), red (Shallow) and white (clear-Sky).

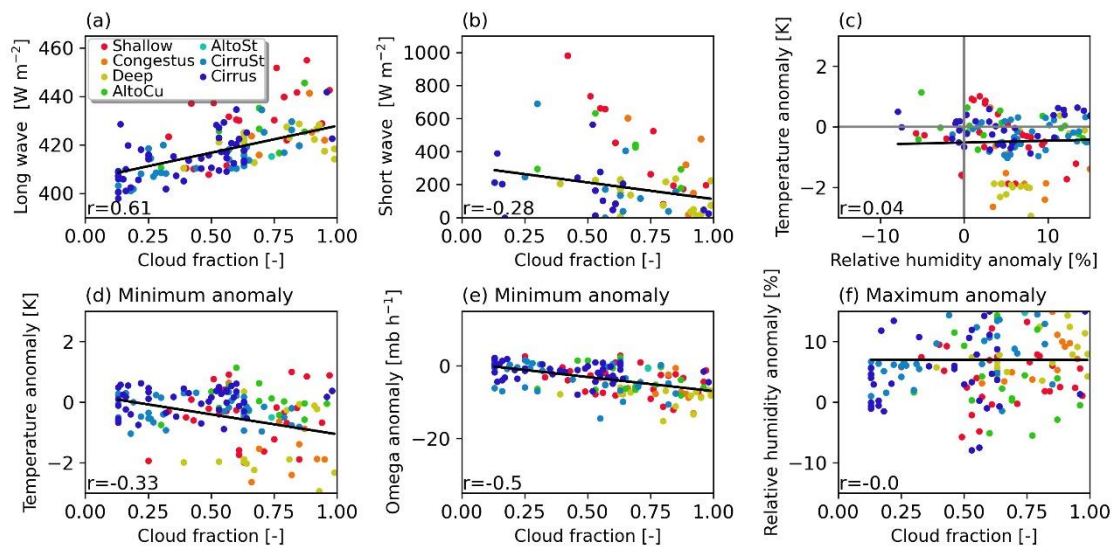
Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.7 mostra o gráfico de dispersão para as mesmas variáveis da Figura 4.6, porém para os 5 dias escolhidos do período seco (IOP2). O comportamento das variáveis em relação a fração de nuvens é similar ao encontrado no período úmido (IOP1), e resumidamente aqui listados: i) aumento (diminuição) da radiação onda longa (onda

curta) com a fração de nuvem, mostrado nas Figuras 4.7a e 4.7b; ii) apesar de não encontrar relação entre os valores mínimos de anomalia de temperatura e máximos de umidade relativa, as nuvens de convecção profunda são encontradas no quarto quadrante e associadas a anomalias negativa de temperatura e positiva de umidade relativa (Figura 4.7c); iii) valores mínimos de anomalia de temperatura e ômega, assim como no período úmido, durante a estação seca mostra uma tendência de aumento da fração de nuvem (Figura 4.7d e 4.7e), ou seja, a diminuição da temperatura e movimentos verticais ascendentes estão associados a maior presença de nuvens, principalmente dos tipos Congestus (marcadores laranja), Shallow (marcadores vermelhos) e Deep (marcadores amarelos).

No período seco foi observado menor quantidade de nuvens dos tipos Cirrus (marcadores azuis) e CirruSt (marcadores azuis cobalt) associado a valores máximos de fração de nuvem (entre 0.7 e 1.0) em relação ao período úmido (Figura 4.6). Essas nuvens no período úmido estão associadas à disponibilidade de umidade e pela formação da bigorna em nuvens associadas à convecção profunda.

Figura 4.7 - Dispersão entre a fração de nuvens observada e radiação de onda longa, radiação de onda curta, taxa de precipitação, valores mínimos da variância de temperatura, mínimo de omega e máximo de umidade relativa para os casos seleccionados durante o IOP2.



Cada cor representa um tipo de nuvem, blue (Cirrus), cobalt (CirruSt), teal (AltoSt), green (AltoCu), yellow (Deep), orange (Congestus), red (Shallow) and white (clear-Sky).

Fonte: Produção do autor.

### **4.3.2 As relações entre radiação, dinâmica e termodinâmica com a fração de nuvens a partir das simulações com o SAM**

A discussão das relações entre as variáveis de larga escala, fluxos de radiação e fração de nuvem é realizada para as simulações do modelo SAM. Para esta análise são utilizados os mesmos dias escolhidos para os dados observados (7 dias para a IOP1 e 5 dias para a IOP2).

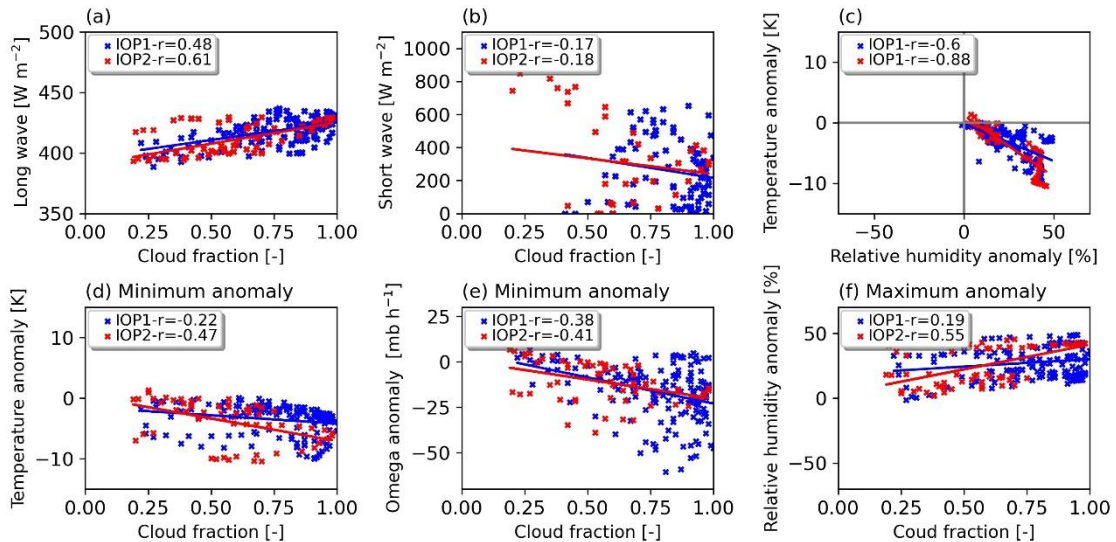
A Figura 4.8 mostra os gráficos de dispersão entre a fração de nuvem com o fluxo de radiação incidente a superfície de onda longa (Figura 4.8a), onda curta (Figura 4.8b), temperatura e umidade relativa (Figura 4.8c). A Figura ainda apresenta os gráficos de dispersão da fração de nuvem com as anomalias mínima de temperatura (Figura 4.8d), mínima de ômega (Figura 4.8e) e máximas de umidade relativa (Figura 4.8f) para os períodos úmido (IOP1 – marcadores azuis) e seco (IOP2 – marcadores vermelhos).

O fluxo de radiação de onda longa incidente à superfície aumenta com o aumento da fração de nuvem, tanto para o período úmido como para o período seco. No período úmido é observado que há mais ocorrência de altos valores de fração de nuvem (entre 0.8 e 0.9) devido a atuação de sistemas de larga escala, juntamente com a convecção local. A relação entre a radiação de onda longa incidente na superfície e a fração de nuvens integrada é complexa, pois muitas vezes a radiação que chega à superfície não representa as nuvens em níveis mais altos da atmosfera, porém há uma boa relação entre as variáveis. Para os fluxos de radiação de onda curta há a tendência de diminuição em relação ao aumento da fração de nuvem, devido a absorção e ao albedo das nuvens. A correlação entre as variáveis não é o ideal, devido a presença de muita radiação difusa na atmosfera que impede uma correlação direta entre a radiação de onda curta e a fração de nuvens integrada na vertical. As tendências entre os fluxos de radiação de onda longa e curta em relação às frações de nuvem estão consistentes com aquelas encontradas nos dados observados. A Figura 4.8c mostra o gráfico de dispersão dos valores mínimos de anomalia de temperatura e valores máximos de anomalia de umidade relativa. Assim como nos dados observados é identificado uma tendência negativa.

A Figura 4.8d mostra a anomalia mínima de temperatura em relação a fração de nuvem. É observado que há uma tendência de aumento da fração de nuvem em relação a valores mais negativos de anomalia de temperatura. O mesmo comportamento é observado para

as anomalias negativas de  $\omega$  (Figura 4.8e). Essas tendências são observadas tanto para o período úmido quanto para o período seco. A anomalia de umidade relativa (Figura 4.8f) mostra um comportamento inverso em relação a temperatura e  $\omega$ , os maiores valores de anomalia de umidade relativa estão associados a maiores valores de fração de nuvem. O comportamento dessas variáveis em relação a fração de nuvem é fisicamente consistente. Quando há nuvens observa-se uma redução da temperatura e são necessários movimentos verticais ascendentes e disponibilidade de água na atmosfera. Esses resultados também concordam com os apresentados na análise observacional.

Figura 4.8 - Dispersão entre a fração de nuvens simulada com o modelo SAM e radiação de onda longa, radiação de onda curta, anomalias de temperatura e umidade relativa, valores mínimos de anomalia de temperatura, mínimo de  $\omega$  e máximo de umidade relativa para os casos selecionados durante o IOP1 e IOP2.



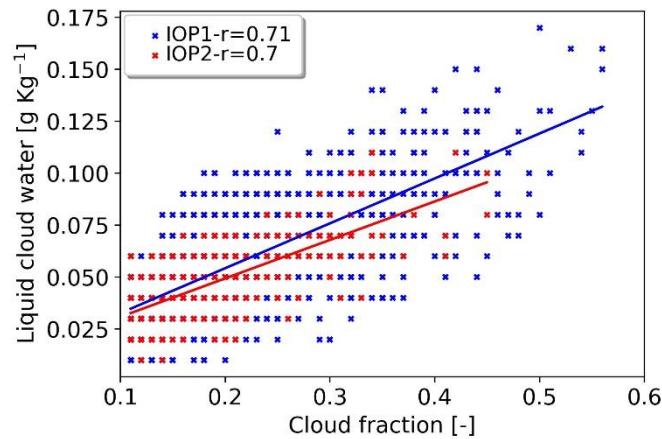
Os marcadores azuis representam o período úmido (IOP1) e os marcadores vermelhos representam o período seco (IOP2).

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.9 mostra o gráfico de dispersão entre o conteúdo de água líquida e a fração de nuvem, ambos simulados com o modelo SAM e para todos os níveis atmosféricos. É observado uma clara tendência de aumento da fração de nuvem à medida que há o aumento do conteúdo de água líquida. Maiores valores de fração de nuvem e conteúdo de água são observados no período úmido (entre 0.4 e 0.7 de fração de nuvem e 0.10 e 0.18 g/Kg de LCW). A boa correlação tanto para o período úmido (0.71) quanto para o período

seco (0.70) indica que LCW pode ser utilizada para estimar a fração de nuvens a partir de parametrizações físicas utilizadas em modelos numéricos de tempo e clima.

Figura 4.9 - Dispersão entre a fração de nuvem e conteúdo de água líquida simuladas.



Os marcadores azuis representam o período úmido (IOP1) e os marcadores vermelhos representam o período seco (IOP2). Nesse caso foram consideradas apenas as camadas inferiores da atmosfera.

Fonte: Produção do autor.

#### 4.4 Conclusão

Os resultados obtidos neste Capítulo visaram compreender as interações entre as variáveis dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera e a nebulosidade. Para isso foram utilizados dados observacionais da campanha de campo GoAmazon 2014/15. De forma complementar a estes dados foi utilizado um modelo numérico de alta resolução (CRM-SAM). Todas as análises foram realizadas para o período úmido (IOP1) e para o período seco (IOP2).

As séries temporais da taxa de precipitação, fração de nuvem integrada e fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície, simuladas utilizando o modelo SAM (com diferentes resoluções horizontais) foram comparadas com os dados observacionais obtidos durante a campanha de campo do GoAmazon 2014/15. O modelo SAM, mesmo subestimando os picos máximos da taxa de precipitação simulou satisfatoriamente os padrões desta variável comparando com os dados observacionais. A fração de nuvem integrada e o fluxo de radiação de onda curta também seguem o mesmo padrão da taxa de precipitação. Tanto nas simulações quanto nos dados observacionais, os picos máximos de precipitação estão associados à valores máximos de fração de nuvens e com diminuição do fluxo de radiação

de onda curta incidente à superfície. Esse comportamento da radiação de onda curta está relacionado ao forte albedo das nuvens, principalmente nuvens de convecção profunda. Em ambos períodos (úmido e seco), as simulações foram consistentes e isso pode ser confirmado pelo histograma de distribuição de fração de nuvens, que mostrou maior ocorrência de valores máximos de fração de nuvens (de 0.9 a 1.0), no período úmido e maior ocorrência de valores mínimos de fração de nuvens (de 0.0 a 0.4), no período seco. Este padrão de máximo (úmido) e mínimo (seco) da variável fração de nuvem é devido ao período úmido ser caracterizado pela atuação de sistemas de larga escala (Linhas de instabilidade, CCMs e ZCIT) juntamente com a convecção local, ocasionando maior ocorrência de nuvens, principalmente de convecção profunda e gerando mais precipitação neste período em relação ao período seco.

Para as análises referentes as series temporais dos períodos úmido e seco, foi escolhido um dia de cada período para uma análise mais detalhada do ciclo diurno das interações entre os fluxos de radiação, variáveis dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera, e a nebulosidade. As variáveis temperatura, ômega e umidade relativa foram analisadas em forma de anomalias em relação à média do dia anterior.

Em ambos os dias, o perfil de fração de nuvem simulada com o modelo SAM mostrou um padrão semelhante ao encontrado nos dados observados. O comportamento dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa incidentes à superfície estão fisicamente associados aos padrões de nuvens encontrados nos dados observados e na simulação com o modelo SAM. Foi possível observar nos dados simulados que há um efeito negativo (positivo) no fluxo de radiação de onda curta (longa) incidente a superfície, devido a presença dos diferentes tipos de nuvens e a forma da distribuição vertical da fração de nuvem. De forma geral, o impacto nos fluxos de radiação de onda curta e onda longa estão associados, principalmente, a presença de nuvens de convecção rasa e profunda.

As anomalias em relação à média do dia anterior das variáveis de larga escala apresentaram comportamentos fisicamente associados a formação, evolução e dissipação da nebulosidade. Na evolução das nuvens associadas a convecção rasa para profunda foi observado que havia anomalias positivas (negativas) de temperatura em baixos (médios) níveis, intensos movimentos verticais ascendentes e anomalia positiva de umidade relativa em baixos níveis. Também foi observado aquecimento da atmosfera após a

ocorrência de precipitação, possivelmente associada a liberação de calor latente. Este comportamento foi encontrado nos dados observados e na simulação com o SAM. Com isso, conclui-se que as anomalias das variáveis de larga escala podem ser relevantes estimativas para utilizar em parametrizações de fração de nuvem em modelos numéricos de tempo e clima.

Referente as análises das series temporais e as análises dos dois dias escolhidos, foi possível concluir que as variáveis obtidas observacionalmente com diferentes metodologias mostraram consistência física entre elas. O único ponto a ressaltar é referente a variável fração de nuvem integrada verticalmente, que é estimada a partir da radiação de onda longa. Esta estimativa, no geral mostrou um comportamento consistente, entretanto por ser uma variável estimada a partir do fluxo de radiação de onda longa, pode apresentar alguma inconsistência em casos de atmosfera com alto conteúdo de umidade, como por exemplo a região Amazônica. Em relação ao modelo SAM foi observado um bom desempenho quando comparado aos dados observados. Também mostrou consistências física entre as variáveis analisadas, o que já era de se esperar, por se tratar de um modelo que simula um sistema integrado da atmosfera, a partir de parametrizações físicas sofisticadas e uma dinâmica prescrita a partir das forçantes de larga escala. Dessa forma, as simulações com o modelo SAM podem suprir a necessidade da utilização de variáveis que não podem ser obtidas de forma observacional, como exemplo, perfis verticais de fração de nuvem, conteúdo de água e gelo.

Os resultados das análises de dispersão confirmaram que os fluxos de radiação incidentes à superfície mostram alterações associadas a presença de nuvens na atmosfera, principalmente de convecção profunda. Foi observado uma tendência positiva entre a fração de nuvem e a radiação de onda longa, havendo maior fração de nuvem e maior fluxo de radiação de onda longa. O contrário acontece com a fluxo de radiação de onda curta (maiores valores de fração de nuvem estão associados a menores valores de fluxo de radiação de onda curta). Esse comportamento foi encontrado nos dados observados e nas simulações com o SAM, assim mostrando a importância de simular de forma consistente a fração de nuvem para um bom desempenho do esquema de radiação em modelos numéricos de tempo e clima, tendo em vista que os esquemas de radiação utilizam a informação de fração de nuvem para estimar os fluxos de radiação.

Os diferentes tipos de nuvens estão associados a diferentes condições ambientais representadas pelas anomalias das variáveis de larga escala. Como exemplo, as nuvens altas e médias estão associadas a anomalias positiva de temperatura e umidade relativa. As nuvens relacionadas a convecção profunda, que modificam os fluxos de radiação, estão associadas, principalmente a anomalias negativa de temperatura e anomalias positiva de umidade relativa. Esta análise mostrou que as anomalias das variáveis de larga escala podem ser utilizadas para a estimativa de fração de nuvem. O perfil do conteúdo de água é outra variável importante e que também pode ser utilizada para estimativa de fração de nuvem, pois mostrou uma tendência positiva e boa correlação com a fração de nuvem.

A partir dos resultados das Seções 4.1 e 4.2, fica evidente a importância de se simular corretamente a representação da cobertura de nuvens em um modelo de tempo e clima. Os resultados da seção 3.3 indicam que a fração de nuvens está relacionada às anomalias das variáveis de grande escala e conteúdo de água líquida/gelo. Portanto, propomos que os resultados encontrados na Seção 4.3 sejam utilizados para definir limites para variáveis de grande escala (umidade relativa, ômega e temperatura) e conteúdo de água no desenvolvimento e calibração de parametrizações de frações de nuvens. Esses resultados são uma tentativa de representar melhor a nebulosidade em modelos numéricos de tempo e clima e, assim, reduzir erros relacionados a nuvens.



## 5 UMA NOVA PARAMETRIZAÇÃO DE FRAÇÃO DE NUVEM PARA OBTER UMA ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL DA NEBULOSIDADE CONSISTENTE COM OS DADOS OBSERVADOS

Os resultados do Capítulo anterior foram utilizados no ajuste da nova parametrização de fração de nuvens proposta nesse trabalho (descrita na Seção 2.2.3). Sendo assim, o objetivo desse Capítulo é avaliar a nova parametrização de fração de nuvem utilizado o modelo de interação fração de nuvem e radiação (CFRM). Esse modelo permite analisar o comportamento dos fluxos de radiação de onda longa e onda curta em função do perfil de fração de nuvem.

O CFRM foi integrado utilizando os dois esquemas de fração de nuvem descritos na Seção 2.2.3. A partir daqui as simulações realizadas com o CFRM utilizando o esquema controle de fração de nuvem é chamado de CFRM\_ctl e as simulações utilizando o novo esquema de fração de nuvem apresentado nesse trabalho é chamado de CFRM\_exp.

Assim como no Capítulo anterior, as simulações foram realizadas para os períodos úmido (IOP1) e seco (IOP2) da região amazônica (GoAmazon 2014/15). De forma adicional, nesse Capítulo também foram utilizadas mais 4 áreas de estudo para realizar as simulações com o CFRM, são elas: Darwin, Manus, Nauru e ETPO (descritos nas seções 2.1.2 e 2.1.3). As simulações em Darwin foram realizadas para os períodos úmido e seco da região, Manus e Nauru foram divididas em períodos de El Niño e La Niña e para a região do ETPO o período simulado foi janeiro de 2010.

As simulações para a região do GoAmazon 2014/15 foram realizadas utilizando os dados do SAM (simulações realizadas no Capítulo 3) e do ERA5 como forçantes de larga escala, para as demais regiões foram utilizados apenas os dados do ERA5 como forçantes.

A integração vertical da fração de nuvem foi padronizada a partir da distribuição vertical da fração de nuvens obtida dos dados de referência (SAM e ERA5) e das simulações com o CFRM, através da Equação 5.

$$\frac{\sum_{i=1}^n (p_i \cdot x_i)}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (5)$$

Onde  $p$  são os níveis de pressão e  $x$  é o valor da variável fração de nuvem em cada nível de pressão ( $p$ ).

## 5.1 Fração de nuvem

As Figuras 5.1a e 5.1b mostram a fração de nuvem integrada na coluna do período úmido (IOP1) e período seco (IOP2), para as simulações com o CFRM utilizando como forçantes os dados do SAM para a região do GoAmazon 2014/15. Nesse caso, o dado de referência é a fração de nuvem padronizada da simulação do SAM. Importante, mencionar que as simulações do SAM são mais completas, pois considera toda a física da interação superfície-atmosfera, diferente do CFRM que considera apenas parâmetros dinâmicos e termodinâmicos na descrição da nebulosidade

No período úmido (Figura 5.1a), a fração de nuvens atinge valores maiores em relação ao período seco (Figura 5.1b). Isso deve-se a maior atividade convectiva local juntamente com a atuação de sistemas de grande escala no período úmido sobre a região amazônica, gerando altos volumes de precipitação. A simulação do CFRM com a nova parametrização (CFRM\_exp) mostra valores máximos de fração de nuvem de 0.4, próximo aos dados de referência de 0.3. Enquanto que na simulação com a parametrização controle (CFRM\_ctl), os valores máximos chegam a 0.65 e a dispersão entre a simulação e o dado de referência é maior em relação a nova parametrização.

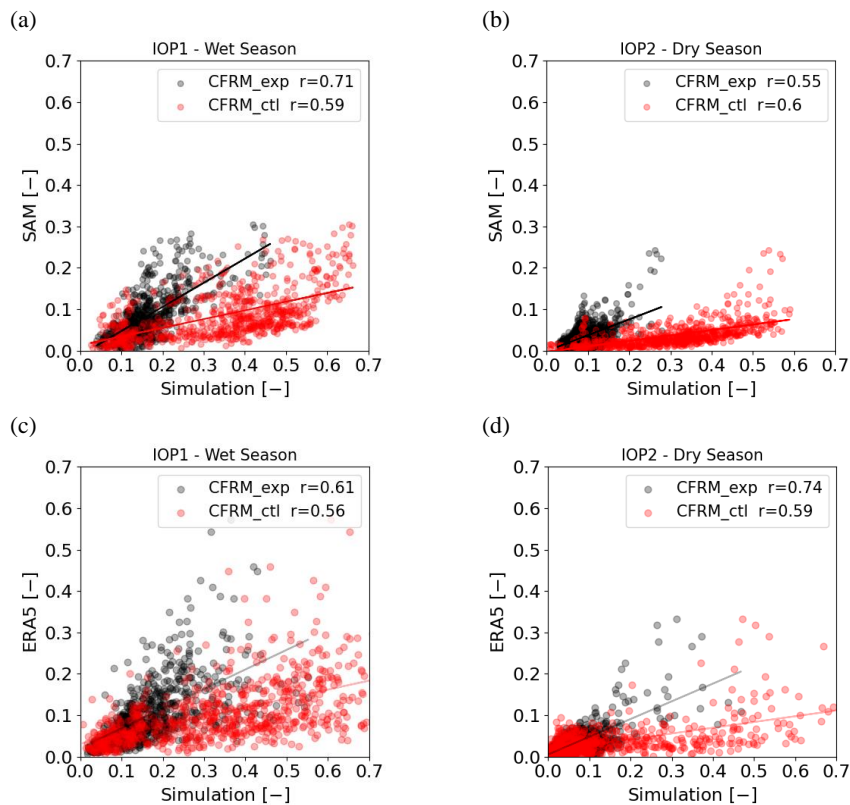
No período seco (Figura 5.1b) observa-se menores valores de fração de nuvem em ambas as simulações, porém o CFRM\_exp simula os valores máximos de fração de nuvem de 0.3, próximos aos dados de referência. Na simulação com CFRM\_ctl é possível observar valores que chegam até 0.6, indicando uma superestimativa significativa na nebulosidade.

As Figuras 5.1c e 5.1d mostram as simulações utilizando os dados do ERA5 como forçante de grande escala e dados de referência. O comportamento geral da fração de nuvem no período úmido e seco na região do GoAmazon 2014/15 é simulado com consistência pelo CFRM. É possível verificar maior quantidade de fração de nuvem no período úmido em relação ao período seco, assim como nas simulações utilizando os dados do SAM. Também foi possível observar que em termos de magnitude dos valores máximos de fração de nuvens, as simulações com o CFRM\_exp, mostra valores mais próximos aos encontrados com os dados de referência, apesar de mostrar um maior espalhamento quando comparado às simulações realizadas com o SAM.

Apesar da dispersão das simulações utilizando como forçantes os dados do ERA5 ser maior que aquelas utilizando os dados do SAM, ambos os experimentos demonstraram que a nova parametrização de fração de nuvem (CFRM\_exp) descreve melhor a nebulosidade. Isso indica que a nova parametrização permite corrigir os valores excessivos de fração de nuvens sobre todas as localidades, impactando nos fluxos radiativos como apresentado na próxima Seção.

Como as simulações que utilizam os dados do ERA5 como forçantes para a simulação com o CFRM mostraram resultados consistentes, as demais simulações para as regiões do TWP e ETPO foram realizadas utilizando os dados do ERA5 como forçantes.

Figura 5.1 - Gráfico de dispersão da fração de nuvem do ponto T3 do GoAmazon 2014/15.



As simulações foram realizadas com o CFRM utilizando a nova parametrização de fração de nuvem proposta nesse trabalho (pontos pretos) e com a parametrização de fração de nuvem controle (pontos vermelhos). A primeira linha do painel utiliza os dados do SAM como forçantes de grande escala e dados de referência, e a segunda linha do painel utiliza os dados do ERA5 como forçantes de grande escala e dados de referência.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.2 mostra os gráficos de dispersão da fração de nuvem para as três regiões do TWP.

A região de Darwin é fortemente impactada pelo sistema de monção australiana, com isso o clima nesta região é basicamente dividido em um período úmido/chuvoso e um período seco/menos chuvoso. As simulações com o CFRM, bem como os dados de referência, mostraram que os maiores valores de fração de nuvens são encontrados no período úmido. No entanto, a simulação com CFRM\_exp estima valores máximos de fração de nuvem mais próximos aos valores encontrados nos dados de referência (ERA5). Em ambos os períodos úmido e seco (Figura 5.2a e Figura 5.2b) as simulações com o CFRM\_ctl superestimam a fração de nuvem, mostrando também um maior espalhamento quando comparado com a simulação realizada utilizando a nova parametrização de fração de nuvens proposto neste trabalho.

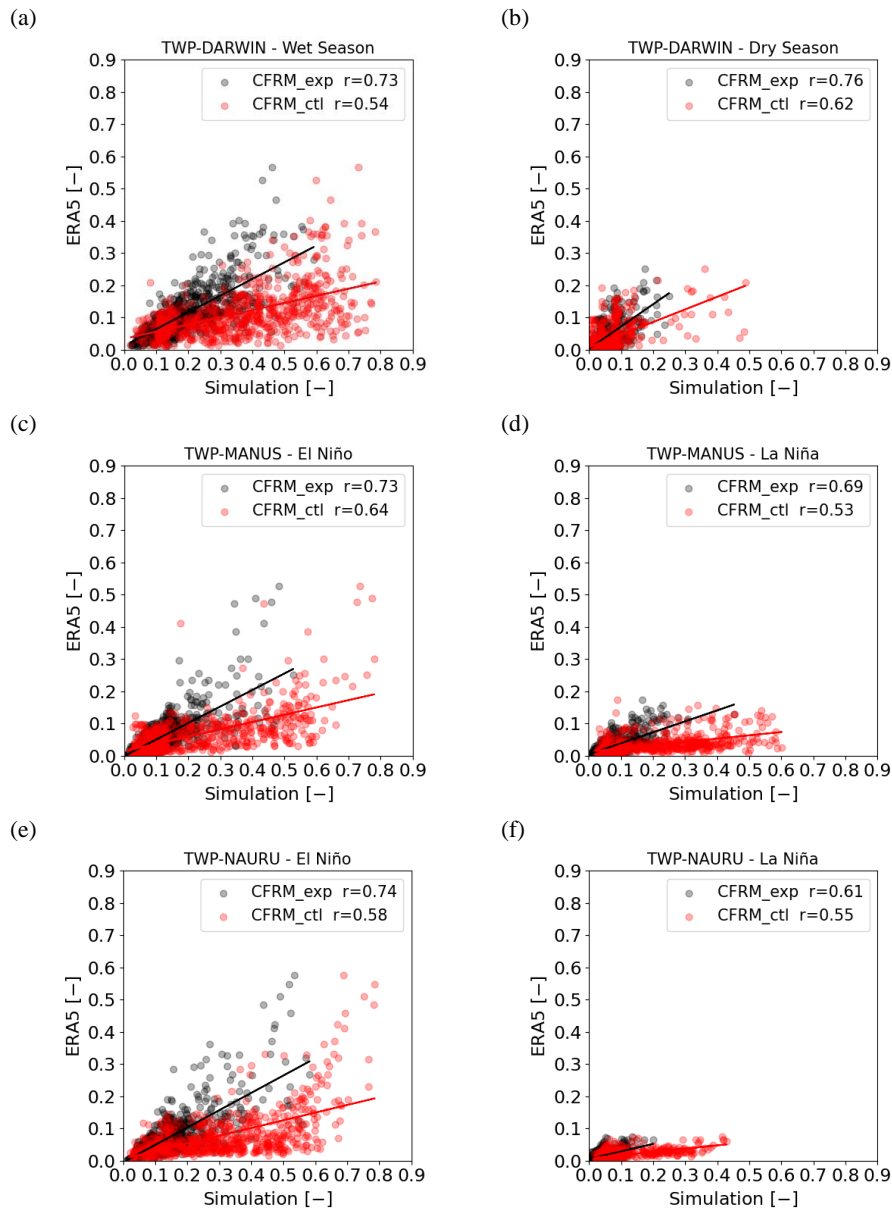
Para as regiões de Nauru e Manus, as análises foram realizadas separadamente para os períodos de atuação dos fenômenos El Niño e La Niña. Essa divisão tem o objetivo de verificar a sensibilidade da nova parametrização de fração de nuvens às variações de fenômenos oceânico-atmosféricos, como no caso o ENSO (*El Niño Southern Oscillation*). De forma geral, essas regiões têm a variabilidade da convecção dominada pelo ENSO e MJO (*Madden Julian Oscillation*) (LONG; MATHER; ACKERMAN, 2016).

As Figuras 5.2c e 5.2d mostram as simulações na região de Manus e as Figuras 5.2e e 5.2f para a região de Nauru, ambas localidades para períodos em que haviam influências dos fenômenos de El Niño e La Niña.

No período de El Niño nas duas localidades (Manus e Nauru) foi notado maiores valores de fração de nuvem nas simulações, em comparação com o período de La Niña, concordando com os dados de referência. Os valores máximos de fração de nuvem simulado com CFRM utilizando a nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp) são aproximados aos dados de referência. No caso da utilização da parametrização de fração de nuvem controle (CFRM\_ctl) os valores de fração de nuvens é superestimado e mostra maior espalhamento. Em ambas as localidades, a magnitude dos valores de fração de nuvem é muito próxima durante o período de El Niño. Entretanto, durante o período de La Niña são observados maiores valores de fração de nuvem em Manus. Esta

localidade situa-se na piscina quente do pacífico tropical e apresenta pouca variabilidade intra-sazonal ou interanual de nebulosidade e efeitos radiativos de nuvens devido ao fenômeno ENOS (MCFARLANE; LONG; FLAHERTY, 2013; LONG; MATHER; ACKERMAN, 2016).

Figura 5.2 - Gráfico de dispersão da fração de nuvem para os três pontos do experimento TWP.

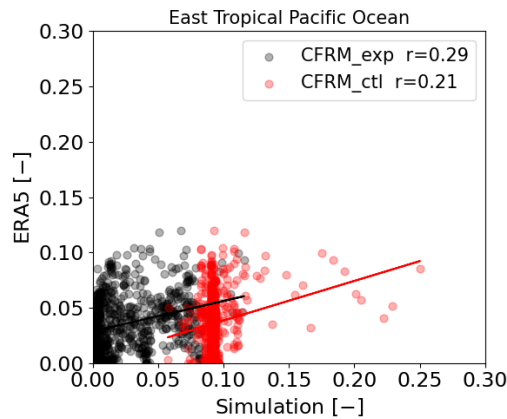


As simulações foram realizadas com o CFRM utilizando a nova parametrização de fração de nuvem proposta nesse trabalho (pontos pretos) e com a parametrização de fração de nuvem controle (pontos vermelhos). Essas simulações utilizam os dados do ERA5 como forçantes de grande escala e dados de referência.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.3 mostra a dispersão da fração de nuvem integrada na coluna para um ponto localizado na porção Leste do Oceano Pacífico Tropical (ETPO - Figura 3.1). As simulações foram realizadas utilizando os dados do ERA5 como forçantes e dados de referência. No geral, foram observados baixos valores de fração de nuvem, entretanto as simulações com o CFRM foram consistentes em relação aos dados de referência em termos de magnitude. A simulação com o CFRM\_exp mostrou valores máximos de fração de nuvem de até 0.1, consistente com o dado de referência, enquanto que com a parametrização controle (CFRM\_ctl) os valores de fração de nuvem chegaram até 0.25.

Figura 5.3 - Gráfico de dispersão da fração de nuvem para o ponto ETPO.



As simulações foram realizadas com o CFRM utilizando a nova parametrização de fração de nuvem proposta nesse trabalho (pontos pretos) e com a parametrização de fração de nuvem controle (pontos vermelhos). Essa simulação utiliza os dados do ERA5 como forçantes de grande escala e dados de referência.

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 5.1 mostra os coeficientes de correlação ( $r$ ) entre as simulações com o CFRM e os dados de referência. No período úmido do experimento GoAmazon 2014/15, utilizando os dados do SAM como forçantes de larga escala e dados de referência, foi observado uma melhor correlação utilizando a nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp), com o valor de 0,71, enquanto que com a parametrização controle (CFRM\_ctl) a correlação é de 0,59. Durante o período seco não houve uma diferença significativa em termos de correlação utilizando as duas parametrizações de fração de nuvens.

No caso da utilização dos dados do ERA5 como forçantes de larga escala e referência, foi notado uma melhor correlação durante os dois períodos (úmido e seco) quando utiliza a nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp).

Nas demais regiões que utilizam somente os dados do ERA5 como forçantes e dados de referência, a utilização da nova parametrização de fração de nuvens mostrou maiores valores de correlação, principalmente no período seco em Darwin (0.76) e períodos de El Niño em Manus (0.73) e Nauru (0.74), condições que apresentam maior quantidade nebulosidade devido à maior atividade convectiva. Na região do ETPO, os valores de correlação são baixos, entretanto mostrou uma melhor correlação utilizando a nova parametrização de fração de nuvens (0.29) em relação a utilização da parametrização controle (0.21).

Tabela 5.1 - Resumo dos coeficientes de correlação de fração de nuvem entre as simulações e os dados de referência.

	Coeficiente de correlação (r)	CFRM_exp	CFRM_ctl
SAM	GoAmazon 2014/15 Período Úmido (Seco)	0,71 (0,55)	0,59 (0,60)
	GoAmazon 2014/15 Período Úmido (Seco)	0,61 (0,74)	0,56 (0,59)
ERA5	TWP – Darwin Período Úmido (Seco)	0,73 (0,76)	0,54 (0,62)
	TWP – Manus El Niño (La Niña)	0,73 (0,69)	0,64 (0,53)
	TWP – Nauru El Niño (La Niña)	0,74 (0,61)	0,58 (0,55)
	East Tropical Pacific Ocean.	0,29	0,21

Fonte: Produção do autor.

Na próxima Seção é realizado uma avaliação do impacto das duas parametrizações de fração de nuvens (CFRM\_ctl e CFRM\_exp) nas estimativas dos fluxos de radiação de onda longa e onda curta incidentes à superfície.

## 5.2 Fluxos de radiação de onda longa e onda curta

Nessa Seção, a parametrização de nuvens proposta neste trabalho será avaliada em função do impacto nos fluxos de radiação de onda longa e onda curta incidentes à superfície. Como o CFRM é um modelo com o código de radiação CLIRAD acoplado à nova parametrização de fração de nuvens proposta nesse trabalho, é possível analisar o impacto da nebulosidade nos fluxos radiativos. A versão controle da parametrização de fração de nuvens também foi incluída na comparação.

A Figura 5.4 mostra os fluxos de radiação de onda curta (OCIS) e onda longa (OLIS) incidentes à superfície e o efeito radiativo das nuvens nesses fluxos para os dados observados do GoAmazon 2014/15 e para as simulações com o CFRM utilizando a nova parametrização de fração de nuvem (CFRM\_exp) e a parametrização de fração de nuvens controle (CFRM\_ctl), durante o período úmido (IOP1). O efeito radiativo das nuvens (CRE) foi calculado pela diferença entre o fluxo de radiação para céu com presença de nebulosidade e o estimado para céu claro.

A Figura 5.4a mostra que a série temporal do fluxo de radiação de onda curta incidente a superfície foi simulado com consistência pelo CFRM utilizando as duas parametrizações de fração de nuvem, observa-se uma diminuição da radiação solar na presença de nuvens. O efeito da nebulosidade é notado nas simulações, porém, fica evidente que com a nova parametrização de fração de nuvens (linha vermelha – Figura 5.4a), a simulação desses fluxos se aproxima mais dos dados observados (linha preta – Figura 5.4a), tanto em dia com máxima intensidade de radiação, possivelmente devido à ausência de nuvens, como em dia com mínimo de radiação, devido a presença de nuvens.

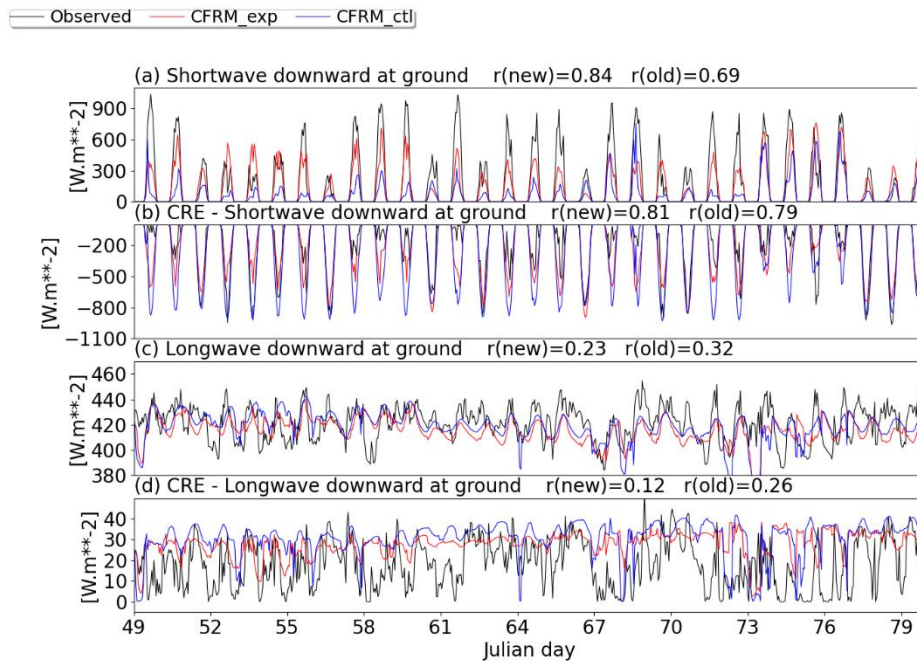
A Figura 5.4b mostra o efeito radiativo das nuvens (CRE) para o fluxo de onda curta incidente à superfície. O CFRM é sensível às nuvens simuladas com o esquema de nuvem acoplado, mostrando, por exemplo, o impacto das nuvens nos dias julianos 77 e 78 em que mostra uma diminuição significativa da radiação solar em aproximadamente  $900\text{W m}^{-2}$ .

Os fluxos de radiação de onda longa incidente à superfície e o CRE são mostrados nas Figuras 5.4c e 5.4d, respectivamente. É possível observar que as simulações acompanham o padrão temporal, indicando que o esquema de radiação de onda longa é sensível à



parametrização de nuvens proposto neste trabalho. Entretanto, a nova parametrização de fração de nuvem não apresenta melhor desempenho em relação à parametrização controle. A radiação de onda longa é uma variável difícil de ser simulada por modelos numéricos, pois dependem de inúmeros fatores, entre esses destaca-se, presença de nuvens, altura da base da nuvem, perfil termodinâmico da atmosfera, quantidade de condensado de água e do vapor d'água na baixa troposfera. A performance do código de radiação de onda longa depende da acurácia dos perfis termodinâmicos utilizados como forçantes, que nesse estudo são provenientes de outros modelos (SAM e ERA5). Outra grande incerteza na estimativa dessa variável radiativa está relacionada à simulação correta da altura e da temperatura da base da nuvem, variáveis que juntamente com a fração de nuvens, são fundamentais para o cálculo da radiação de onda longa emitida pela nuvem na direção da superfície. Além do mais, outra questão relevante na estimativa da radiação de onda longa está associada à presença de vapor d'água. Sabe-se que a região amazônica contém uma grande quantidade de disponibilidade de vapor d'água na atmosfera, e acarreta impacto significativo de efeito estufa através da absorção e emissão de radiação de onda longa. Caso o perfil vertical da concentração do referido gás de efeito estufa não seja bem representado no modelo, pode levar a erros na estimativa da radiação de onda longa. Sendo assim, estudos sobre o efeito da nebulosidade na radiação de onda longa precisa incluir em mais detalhes análises sobre essas fontes de incertezas, principalmente, aquelas associadas as questões da temperatura, altura da base e topo das nuvens nesses modelos.

Figura 5.4 - Série temporal dos fluxos de radiação e efeito radiativo de nuvens (CRE) para o período da IOP1 do GoAmazon 2014/15. Simulações utilizando os dados do SAM como forçantes de larga escala.



A linha preta é o dado observado obtido do GoAmazon 2014/15 e a linha vermelha (azul) é a simulação do CFRM utilizando a nova (controle) parametrização de fração de nuvem. O CRE foi calculado fazendo a diferença entre os fluxos de radiação de onda curta e onda longa para céu com nuvens e céu claro.

Fonte: Produção do autor.

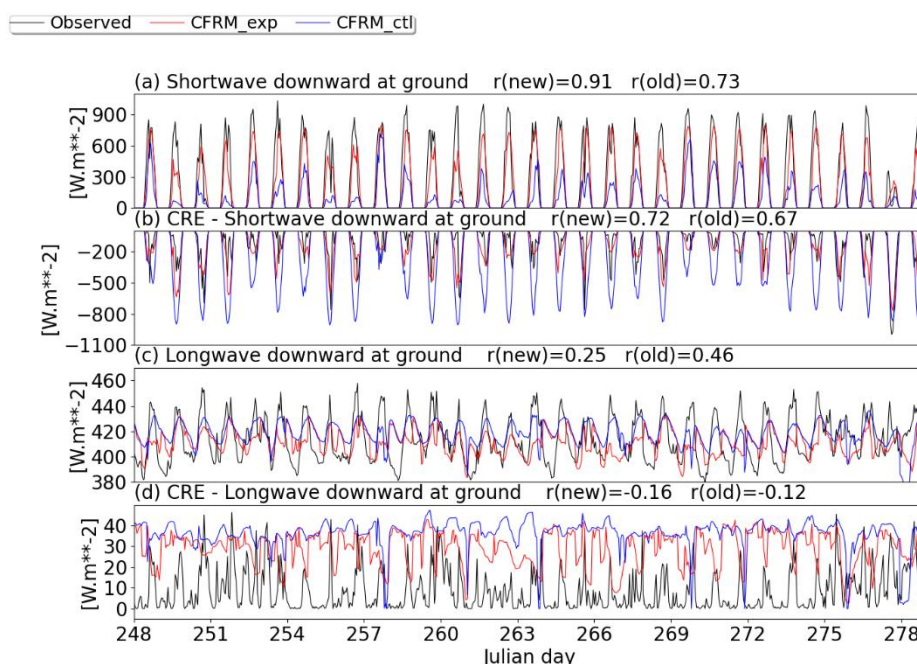
Devido a menor quantidade de fração de nuvem esperada no período seco (IOP2), observa-se que a incidência de radiação de onda curta é maior (Figura 5.5a) em relação ao período úmido (Figura 5.4a). A simulação do CFRM\_exp mostra um melhor desempenho comparada ao CFRM\_ctl. No caso da simulação com a parametrização controle (CFRM\_ctl) é possível verificar que há uma subestimativa do fluxo de radiação de onda curta durante quase toda a série temporal.

Nesse sentido, destaca-se o dia juliano 277 em relação a série, em que se observou uma diminuição significativa no fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície, devido a presença de nuvem. O CFRM simulou com consistência essa diminuição, indicando o bom desempenho da parametrização de nuvens proposto neste trabalho. A série temporal do efeito radiativo das nuvens para o fluxo de radiação de onda curta (Figura 5.5b) confirma o bom desempenho do CFRM utilizando a nova parametrização de fração de

nuvens proposta neste trabalho. É possível observar que com a antiga parametrização de nuvens há uma superestimativa do CRE de onda curta.

Assim como no período úmido, o padrão do fluxo de radiação de onda longa é simulado pelo CFRM no período seco (IOP2 – Figura 5.5c). Uma característica importante observada, é que no período seco, os valores de fluxos de radiação de onda longa incidente à superfície são menores em relação ao período úmido, e em parte deve-se a menor quantidade de fração de nuvens na estação seca. Isso pode ser melhor descrito em termos do efeito radiativo das nuvens (Figura 5.5d), em que a simulação com nova parametrização tem menores valores de radiação de onda longa incidente à superfície em relação a parametrização controle, concordando com o dado observado.

Figura 5.5 - Série temporal dos fluxos de radiação e efeito radiativo de nuvens (CRE) para o período da IOP2 do GoAmazon 2014/15. Simulações utilizando os dados do SAM como forçantes de larga escala.

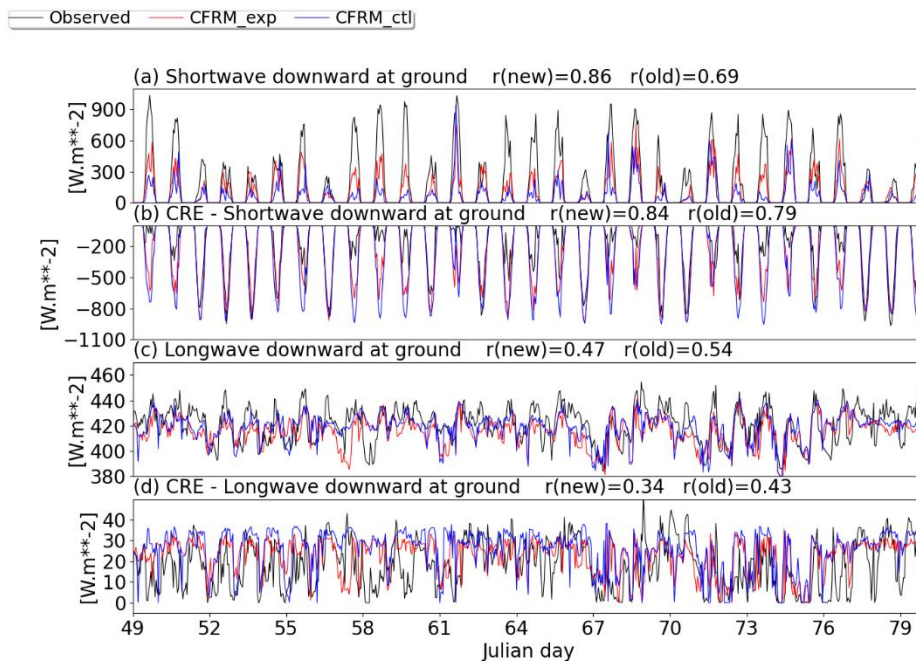


A linha preta é o dado observado obtido do GoAmazon 2014/15 e a linha vermelha (azul) é a simulação do CFRM utilizando o novo (controle) esquema de fração de nuvem. O CRE foi calculado fazendo a diferença entre os fluxos de radiação de onda curta e onda longa para céu com nuvens e céu claro.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.6 mostra o mesmo que a Figura 5.4, porém utilizando os dados do ERA5 como forçantes. No período úmido (IOP1), o fluxo de radiação de onda curta incidente a superfície foi melhor simulado com CFRM\_exp em relação ao CFRM\_ctl. Observa-se que o efeito radiativo de nuvens de onda curta também é melhor simulado pelo CFRM\_exp, indicando o bom desempenho da nova parametrização de fração de nuvem. O padrão da série temporal do fluxo de radiação de onda longa (Figura 5.6c) é simulado com consistência pelo CFRM\_exp, assim como o efeito radiativo das nuvens (Figura 5.6d) e mostrou um melhor desempenho em relação a simulação realizada com o CFRM utilizando os dados do SAM como forçantes.

Figura 5.6 - Série temporal dos fluxos de radiação e efeito radiativo de nuvens (CRE) para o período da IOP1 do GoAmazon 2014/15. Simulações utilizando os dados do ERA5 como forçantes de larga escala.



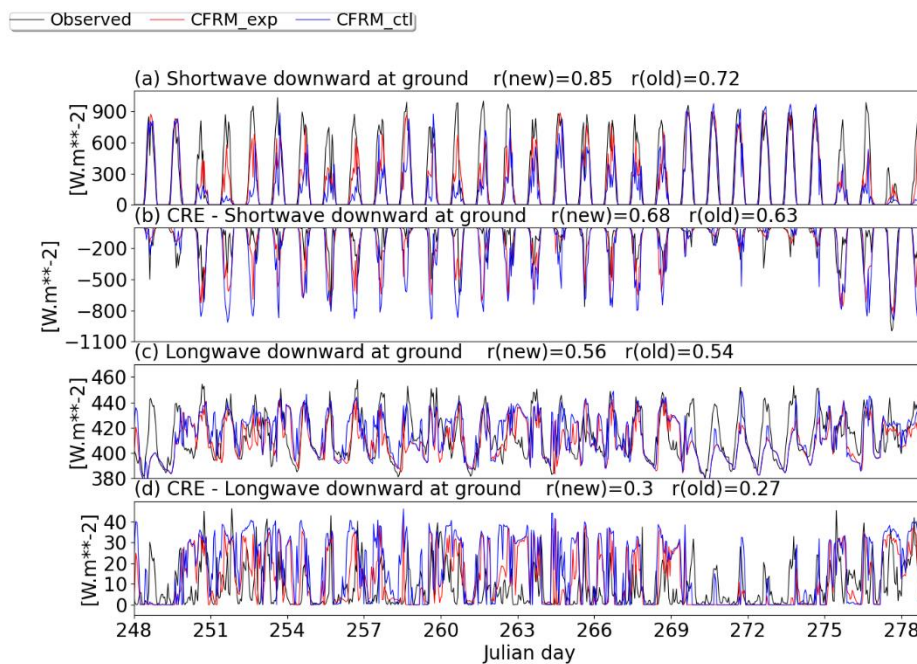
A linha preta é o dado observado obtido do GoAmazon 2014/15 e a linha vermelha (azul) é a simulação do CFRM utilizando o novo (controle) esquema de fração de nuvem. O CRE foi calculado fazendo a diferença entre os fluxos de radiação de onda curta e onda longa para céu com nuvens e céu claro.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.7 mostra a série temporal dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa para o período seco (IOP2) e utilizando os dados do ERA5 como forçante de larga escala.

De forma geral, o fluxo de radiação de onda curta é simulado com consistência pelo CFRM. A simulação com o CFRM\_exp se aproxima mais dos dados observados. O padrão do fluxo de radiação de onda longa é simulado com consistência pelo CFRM e assim como no período úmido (IOP2) mostra em melhor desempenho em relação a simulação utilizando os dados do SAM como forçantes,

Figura 5.7 - Série temporal dos fluxos de radiação e efeito radiativo de nuvens (CRE) para o período da IOP2 do GoAmazon 2014/15. Simulações utilizando os dados do ERA5 como forçantes de larga escala.



A linha preta é o dado observado obtido do GoAmazon 2014/15 e a linha vermelha (azul) é a simulação do CFRM utilizando o novo (controle) esquema de fração de nuvem. O CRE foi calculado fazendo a diferença entre os fluxos de radiação de onda curta e onda longa para céu com nuvens e céu claro.

Fonte: Produção do autor.

Como foi mostrado nessa Seção, as simulações realizadas com o CFRM utilizando os dados do SAM e do ERA5 como forçantes de grande escala, mostraram resultados consistentes em relação aos dados observados. Um aspecto importante de mencionar, é que o fluxo de radiação de onda longa que é uma variável difícil de ser simulada pela dependência de mais fatores atmosféricas além das nuvens, mostrou melhor resultado quando foi utilizado os dados do ERA5 como forçante de grande escala. Então decidiu-se utilizar somente os dados do ERA5 como forçantes para o teste da nova parametrização

de fração de nuvens (CFRM\_exp) nas demais regiões definidas neste estudo (TWP e ETPO).

A Tabela 5.2 mostra os valores de correlação dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa das simulações realizadas com o CFRM em relação aos dados observados. Para o GoAmazon utilizando os dados do SAM como forçantes, os valores de correlação foram maiores utilizando a nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp) para o fluxo de radiação de onda curta, indicando que a parametrização proposta neste trabalho é melhor em relação a parametrização controle. No caso do fluxo de radiação de onda longa não foi observado melhora, em termos dos valores de correlação, entretanto na série temporal foi observado uma simulação consistente do padrão desta variável. A causa para isso está relacionado à possíveis incertezas na determinação da altura e temperatura da base da nuvem, bem como nos próprios perfis de temperatura e do vapor d'água, e não somente com a fração de nebulosidade.

Para as demais regiões foi utilizado o dado do ERA5 como forçantes de larga escala. De forma geral foi observado maiores valores de correlação nas simulações com o CFRM\_exp em relação ao CFRM\_ctl, indicando um melhor desempenho da nova parametrização de fração de nuvem em simular a nebulosidade e assim uma melhor representação das nuvens para o código de radiação.

Em relação as simulações dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa incidentes a superfície, o CFRM simulou com consistência os padrões das séries temporais dessas variáveis para os períodos úmido e seco na região amazônica e Darwin (TWP)

Tabela 5.2 - Resumo dos valores de correção dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa observado e simulado com o CFRM.

	FORÇANTE (SAM)		FORÇANTE (ERA5)								
	GOAMAZON		GOAMAZON		NAURU		MANUS		DARWIN		ETPO
	IOP1	IOP2	IOP1	IOP2	LA NIÑA	EL NIÑO	LA NIÑA	EL NIÑO	ÚMIDO	SECO	JAN 2010
OCIS EXP (CTL)	0,84 (0,69)	0,91 (0,73)	0,86 (0,69)	0,85 (0,72)	0,89 (0,85)	0,87 (0,76)	0,86 (0,80)	0,87 (0,80)	0,80 (0,62)	0,97 (0,94)	0,96 (0,85)
CRE OCIS EXP (CTL)	0,81 (0,79)	0,72 (0,67)	0,84 (0,80)	0,68 (0,63)	0,53 (0,41)	0,77 (0,73)	0,50 (0,51)	0,74 (0,73)	0,77 (0,74)	0,68 (0,62)	0,51 (0,62)
OLIS EXP (CTL)	0,24 (0,32)	0,25 (0,46)	0,47 (0,54)	0,56 (0,54)	0,38 (0,15)	0,26 (0,27)	0,28 (0,18)	0,43 (0,49)	0,43 (0,27)	0,83 (0,81)	0,06 (0,18)
CRE OLIS EXP (CTL)	0,12 (0,26)	-0,16 (-0,12)	0,34 (0,43)	0,3 (0,27)	0,24 (0,10)	0,20 (0,23)	0,08 (0,08)	0,18 (0,20)	0,08 (0,06)	0,46 (0,41)	0,04 (0,17)

Siglas foram utilizadas para simplificar a nomenclatura na Tabela. OCIS representa o fluxo de radiação de onda curta incidente a superfície, OLIS representa o fluxo de radiação de onda longa incidente a superfície. O CRE é o efeito radiativo das nuvens, calculado pela diferença entre os fluxos de radiação para condições de céu com nebulosidade e estimado para céu claro.

Fonte: Produção do autor.

### 5.3 Taxas de aquecimento devido a radiação de onda longa e onda curta

Nessa Seção a nova parametrização de fração de nuvens, é analisada em função dos perfis das taxas de aquecimento/resfriamento radiativo.

A Figura 5.8a mostra os resultados das simulações do CFRM, forçada com os dados do SAM, utilizando a nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp) e a parametrização controle (CFRM\_ctl) para o período úmido (IOP1 – GoAmazon 2014/15) da região Amazônica. Na taxa de aquecimento de radiação de onda curta, a principal característica é encontrada em altos níveis (entre 500 e 100 hPa), onde o aquecimento é maior devido a nuvens de extenso desenvolvimento vertical no período chuvoso da região. Em relação aos esquemas de nuvens, a simulação com o CFRM\_exp se aproxima



mais dos resultados das taxas de aquecimento por onda curta do SAM (referência), em comparação com a simulação do CFRM\_ctl.

Em relação às taxas de aquecimento/resfriamento devido a radiação de onda longa, as duas simulações (CFRM\_exp e CFRM\_ctl), apresentam resultados similares. Entretanto, a simulação do CFRM\_exp mostra resultados ligeiramente melhores em relação ao CFRM\_ctl. É possível observar uma taxa de resfriamento abaixo de 250 hPa até 700 hPa devido à presença das nuvens no período úmido (IOP1) nos dados de referência e simulações. No entanto, verifica-se que as taxas de aquecimento simuladas em baixos níveis por ambos esquemas de fração de nuvens não é observado no dado de referência (SAM). Essa taxa de aquecimento possivelmente está associada a um problema na descrição da temperatura da superfície na simulação, tendo em vista que o CFRM não conta com um modelo de superfície acoplado, gerando uma superestimativa da taxa de aquecimento por radiação de onda longa em baixos níveis.

A Figura 4.8b mostra as simulações das taxas de aquecimento/resfriamento devido a radiação de onda curta e onda longa para o período seco (IOP2) do GoAmazon 2014/15. A principal diferença das taxas de aquecimento/resfriamento no período seco em relação ao período úmido (Figura 5.8a) é que essas taxas são encontradas mais em baixos níveis (500 e 700 hPa). Isso ocorre, devido a menor frequência de nuvens relacionadas a convecção profunda na estação seca (IOP2), nesse período tem a predominância de nuvens baixas. Esse padrão das taxas de aquecimento pode ser visto tanto na taxa de aquecimento por onda curta quanto por onda longa. É observado também que a simulação com o CFRM\_exp mostra resultados mais aproximados da taxa de aquecimento do SAM em relação a simulação com o CFRM\_ctl.

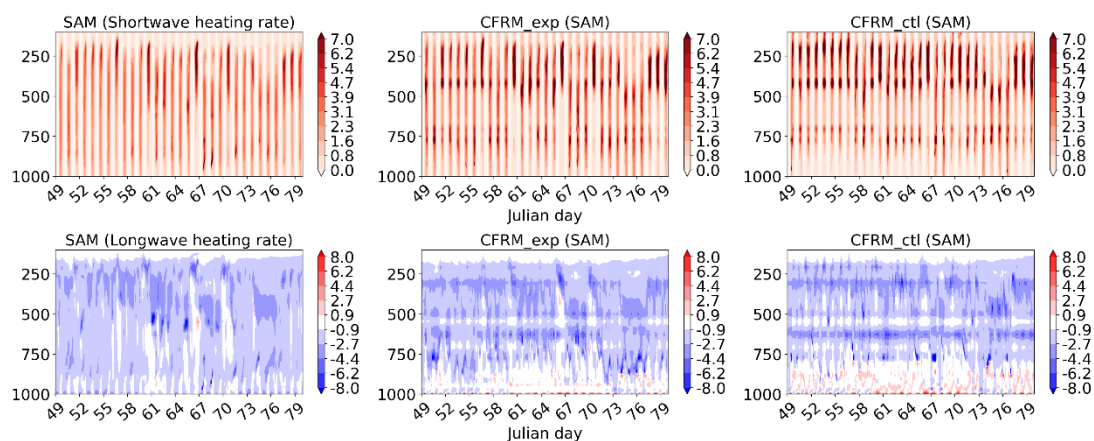
A taxa de resfriamento por onda longa também se encontra em níveis mais baixos quando comparado com a taxa de aquecimento do período úmido. Esse comportamento é melhor observado na simulação utilizando a nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp) do que na utilização da parametrização controle (CFRM\_ctl). Com isso é possível observar que a taxa de resfriamento com a nova parametrização de fração de nuvens se aproxima mais das taxas de resfriamento do SAM. Entretanto, assim como no período úmido, também é observado taxa de aquecimento em baixos níveis devido a



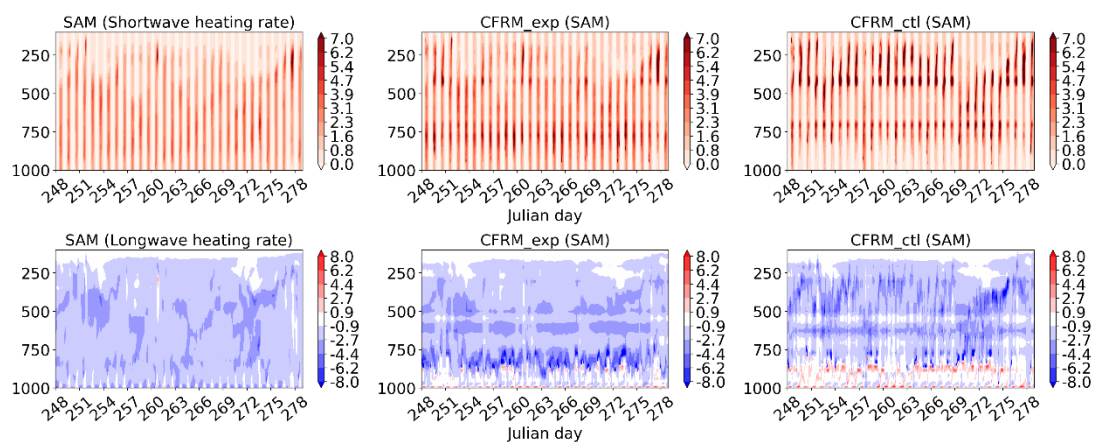
superestimativa da temperatura na superfície. Contudo esse erro mostra-se menor quando se utiliza a nova parametrização de fração de nuvens.

Figura 5.8 - Simulações das taxas de aquecimento/resfriamento radiativo para região do GoAmazon 2014/15 utilizando dados do SAM como forçantes.

(a) GoAmazon IOP1 – SAM



(b) GoAmazon IOP2 – SAM



Simulações para o período úmido (IOP1). (a) Primeira linha de Figuras mostra a taxa de aquecimento devido radiação de onda curta e segunda linha taxa de aquecimento/resfriamento devido radiação de onda longa. Primeira coluna de Figuras são os dados de referência (SAM), segunda coluna são as simulações com o CFRM\_exp e terceira coluna são as simulações com o CFRM\_ctl, ambas simulações forçadas com os dados do SAM. (b) é o mesmo do (a), porém para o período seco (IOP2).

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.9 mostra as simulações com o CFRM das taxas de aquecimento/resfriamento para o GoAmazon 2014/15 assim como na Figura 5.8, porém a diferença é que essas

simulações foram realizadas utilizando os dados do ERA5 como forçantes de larga escala, tanto para o período seco (IOP1) quanto para o período úmido (IOP2).

O padrão das taxas de aquecimento/resfriamento nas simulações utilizando os dados do ERA5 como forçantes é similar ao encontrado nas simulações utilizando os dados do SAM. A Figura 5.9a, que é referente ao período úmido (IOP1), também mostra que a taxa de aquecimento devido a radiação de onda curta se encontra acima de 500 hPa até 100 hPa. Esse padrão é observado nos dados de referência (ERA5) e nas duas simulações do CFRM (CFRM\_exp e CFRM\_ctl). As taxas de aquecimento por radiação de onda curta são maiores em altos níveis devido a maior frequência de nuvens do tipo convecção profunda com alto desenvolvimento verticais no período úmido da região Amazônica.

Com relação a radiação de onda longa, é observado que a taxa de resfriamento se encontra entre 250 e 750 hPa. Também é possível observar no dado de referência que em 250 hPa há taxa de aquecimento e esse comportamento não é observado na simulação utilizando a parametrização controle de fração de nuvens, mas é observado nas simulações com a nova parametrização de fração de nuvens. Em geral, a parametrização controle de fração de nuvens mostra apenas o resfriamento da atmosfera por radiação de onda longa.

Em baixos níveis também é observado alguns pontos com tendência de aquecimento devido a radiação de onda longa, e esse comportamento não é observado no dado de referência. Como já mencionado antes, isso pode ser devido a falta do esquema de superfície acoplado.

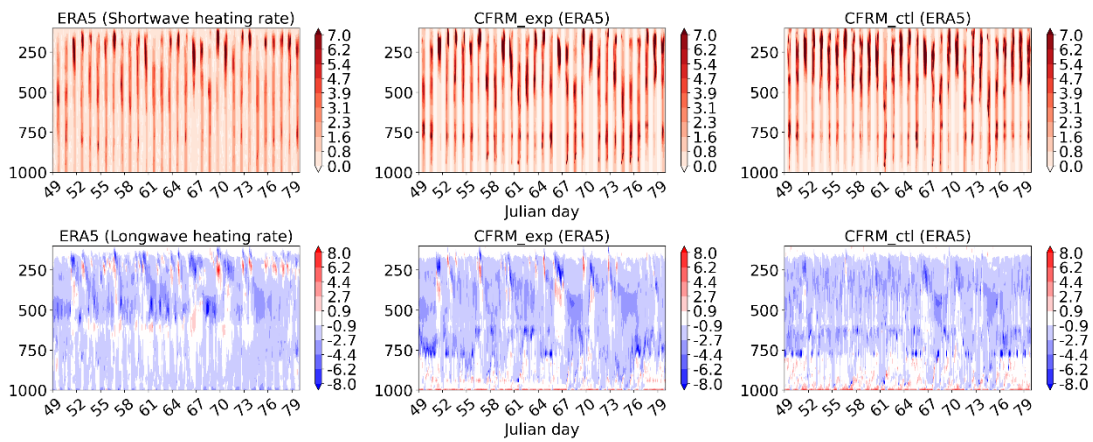
A Figura 5.9b mostra as taxas de aquecimento/resfriamento para o período seco (IOP2). Nesse período há predominância de nuvens baixas na região amazônica, com isso é observado que a taxa de aquecimento devido a radiação de onda curta se encontra mais em baixos níveis, entre 850 e 500 hPa. Apesar de alguns pontos de tendência de aquecimento serem encontrados em altos níveis, a maior parte vai se concentrar em baixos níveis devido a predominância de nuvens baixas no período seco da região. Esse padrão é encontrado tanto nos dados do ERA5, como em ambas as simulações com o CFRM\_exp e CFRM\_ctl.

Com relação a radiação de onda longa é observado que no período seco, com a predominância de nuvens baixas, as taxas de resfriamento aparecem em níveis mais

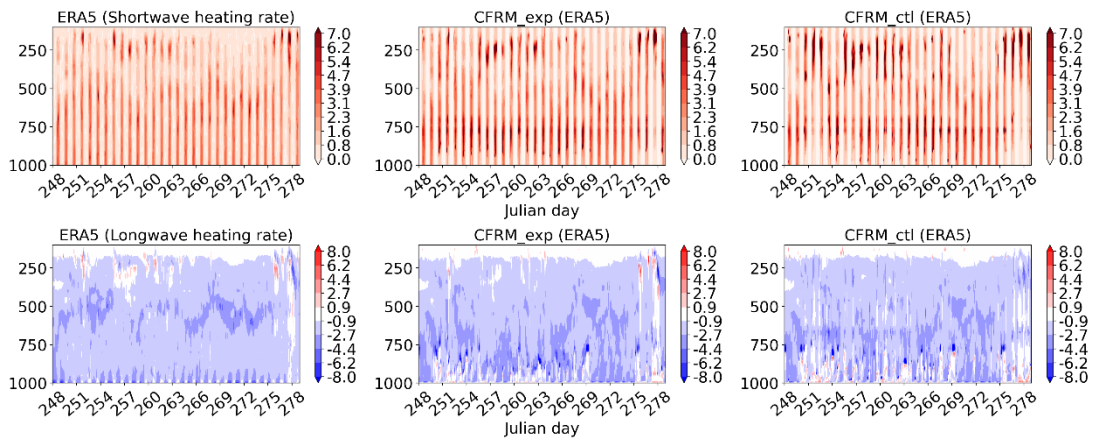
baixos da atmosfera, entre 500 e 1000 hPa. Essa taxa de resfriamento também é simulada com consistência utilizando a nova parametrização de fração de nuvens, principalmente em baixos níveis, onde a simulação com a parametrização controle tende a superestimar a taxa de aquecimento por onda longa.

Figura 5.9 - Simulações das taxas de aquecimento/resfriamento radiativo para região do GoAmazon 2014/15 utilizando dados do ERA5 como forçantes.

(a) GoAmazon IOP1 - ERA5



(b) GoAmazon IOP2 - ERA5



(a) Primeira linha de Figuras mostra a taxa de aquecimento devido radiação de onda curta e segunda linha taxa de aquecimento/resfriamento devido radiação de onda longa. Primeira coluna de Figuras são os dados de referência (ERA5), segunda coluna são as simulações com o CFRM\_exp e terceira coluna são as simulações com o CFRM\_ctl, ambas simulações forçadas com os dados do ERA5 para o período úmido (IOP1). (b) é o mesmo do (a), porém para o período seco (IOP2).

Fonte: Produção do autor

A Figura 5.10 mostra a forçante radiativa das nuvens (CRE) nas taxas de aquecimento/resfriamento devido a radiação de onda curta e onda longa. Para isso, foi feita a diferença entre as taxas de aquecimento/resfriamento devido a radiação de onda curta e onda longa para céu com condições de nebulosidade e para a estimativa de céu sem nuvens. Esta análise, no geral, serve como complemento para as análises das Figuras 5.8 e 5.9.

A Figura 5.10a mostra que a forçante radiativa é maior em altos níveis no período úmido (IOP1), devido a presença de nuvens convectivas que chegam até o topo da atmosfera. Esse padrão é bem simulado pelo CFRM tanto utilizando a nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp), quanto utilizando a parametrização controle (CFRM\_ctl). Entretanto, o CFRM\_ctl, tende a superestimar, enquanto que o CFRM\_exp simula o efeito radiativo das nuvens nas taxas de aquecimento mais próximo do padrão apresentado no dado de referência (SAM).

Quando se trata do efeito radiativo das nuvens nas taxas de aquecimento/resfriamento devido a radiação de onda longa, é possível observar a predominância de valores positivos. Esses valores positivos, que são mostrados em duas camadas da atmosfera, estão associados à presença de nuvens de convecção profunda, que tem um extenso desenvolvimento vertical e são predominantes nesse período na região amazônica. O CFRM utilizando as duas parametrizações de fração de nuvens simulou com consistência o padrão do efeito radiativo das nuvens na taxa de aquecimento/resfriamento devido a radiação de onda longa, entretanto a nova parametrização (CFRM\_exp) mostra uma melhor representação em comparação com o dado de referência. Isso pode ser visto principalmente entre os dias 75 e 77 que possivelmente não houve a presença de nuvens de convecção profunda, gerando taxas de aquecimento/resfriamento em baixos níveis, esse padrão a nova parametrização de fração de nuvens descreve melhor em relação a parametrização controle.

A Figura 5.10b também mostra o efeito radiativo das nuvens nas taxas de aquecimento/resfriamento, porém para o período seco da região amazônica (IOP2).

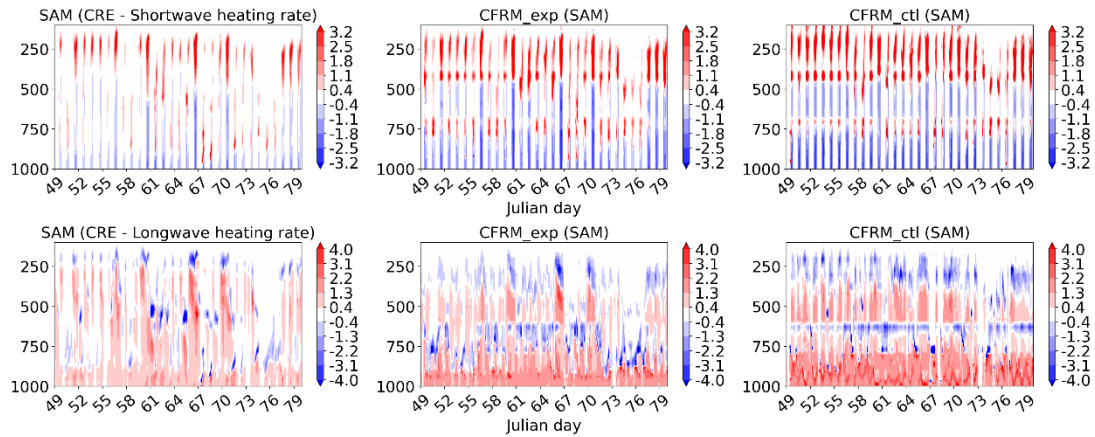
No caso da taxa de aquecimento por radiação de onda curta é verificado um efeito radiativo das nuvens positivo onde há presença de nuvens, tanto nos dados de referência

(SAM) quanto nas simulações com as duas parametrizações de fração de nuvens (CFRM\_exp e CFRM\_ctl). Entretanto, a parametrização controle tende a superestimar a variável em relação a nova parametrização, que descreve melhor o padrão do efeito radiativo das nuvens.

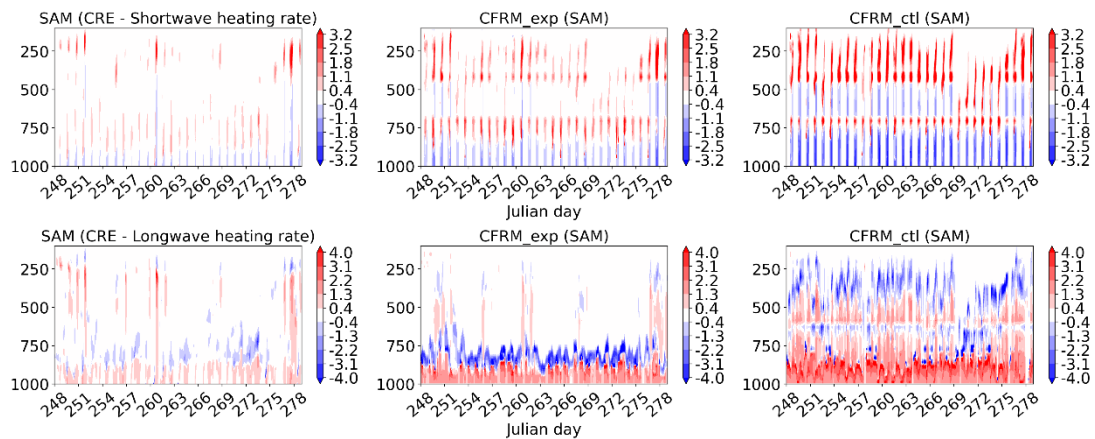
Quando se trata do efeito radiativo das nuvens na taxa de aquecimento/resfriamento devido a radiação de onda longa fica mais claro o melhor desempenho da nova parametrização de fração de nuvens proposto neste trabalho. A simulação com o CFRM\_exp indica a predominância de nuvens baixas assim como no dado de referência, o que é coerente para o período seco da região. Por outro lado, a parametrização controle tende a superestimar o efeito radiativo das nuvens e mostra uma camada positiva acima de 600 hPa indicando que há presença de nuvens altas ou com extenso desenvolvimento vertical.

Figura 5.10 - Simulações do efeito radiativo das nuvens nas taxas de aquecimento/resfriamento para região do GoAmazon 2014/15 utilizando dados do SAM como forçantes.

(a) GoAmazon IOP1 – SAM



(b) GoAmazon IOP2 – SAM



(a) Primeira linha de Figuras mostra o CRE da taxa de aquecimento devido radiação de onda curta e segunda linha CRE da taxa de aquecimento/resfriamento devido radiação de onda longa. Primeira coluna de Figuras são os dados de referência (ERA5), segunda coluna são as simulações com o CFRM\_exp e terceira coluna são as simulações com o CFRM\_ctl, ambas simulações forçadas com os dados do SAM para o período úmido (IOP1). (b) é o mesmo do (a), porém para o período seco (IOP2).

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.11 mostra o efeito radiativo das nuvens nas taxas de aquecimento/resfriamento devido a radiação de onda curta e onda longa para os períodos úmido e seco da região amazônica utilizando os dados do ERA5 como referência e forçantes de larga escala para as simulações com o CFRM.

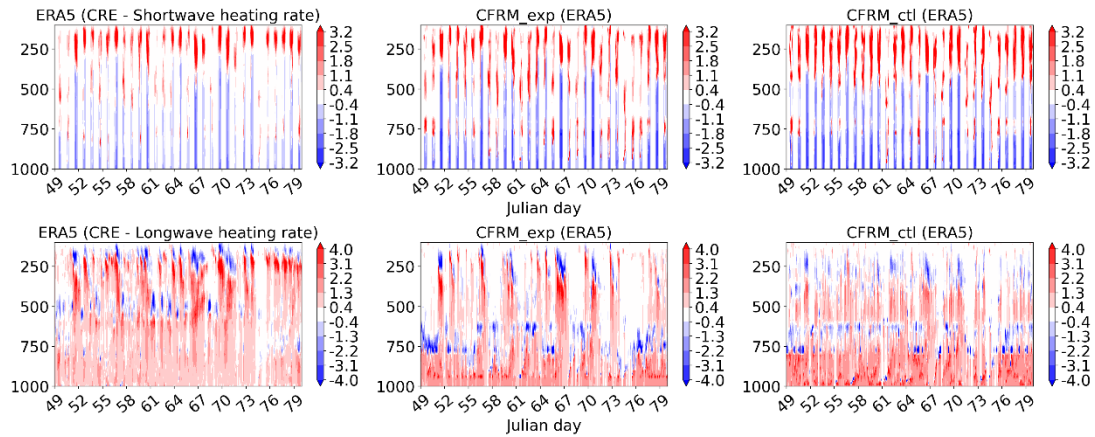
O CFRM utilizando os dados do ERA5 como forçantes, simulam bem o efeito radiativo nas taxas de aquecimento/resfriamento, devido a radiação de onda curta e onda longa,

tanto utilizando a nova parametrização proposta neste trabalho (CFRM\_exp) quanto a parametrização controle (CFRM\_ctl). O padrão é semelhante ao obtido nas simulações com o CFRM utilizando os dados do SAM como forçantes, mostrando que o efeito radiativo das nuvens nas taxas de aquecimento/resfriamento é maior em altos níveis no período úmido (IOP1 – Figura 5.11a) e maior em baixos níveis no período seco (IOP2 – Figura 5.11b). Entretanto, nesse caso, a parametrização controle (CFRM\_ctl) de fração de nuvens também tende a superestimar o efeito radiativo das nuvens em relação a parametrização proposta neste trabalho (CFRM\_exp).

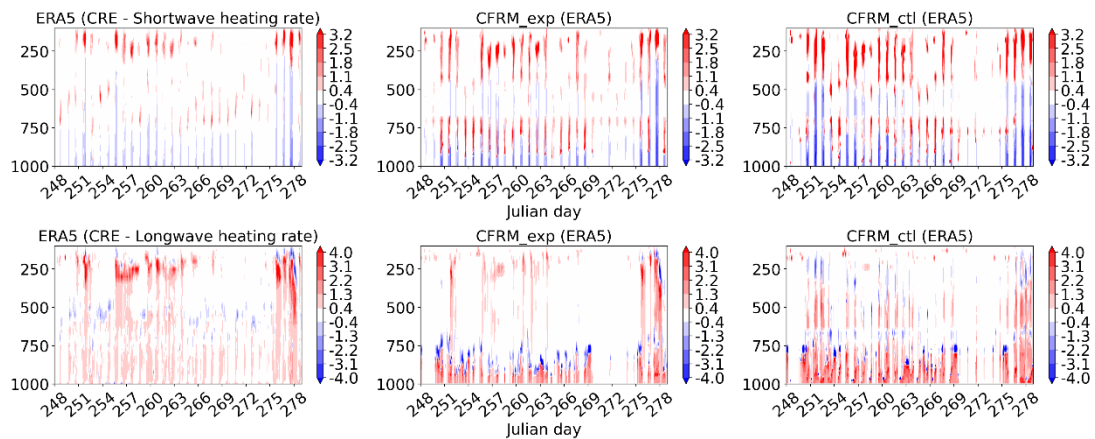
Um resultado interessante é que nas simulações que são forçadas com os dados do ERA5, os resultados do efeito radiativo das nuvens nas taxas de aquecimento/resfriamento, se aproximam mais dos dados do SAM (referência) do que o próprio dado de referência do ERA5. Isto indica que a nova parametrização de fração de nuvens tende a corrigir o erro nas taxas de aquecimento dos dados do ERA5.

Figura 5.11 - Simulações do efeito radiativo das nuvens nas taxas de aquecimento/resfriamento para região do GoAmazon 2014/15 utilizando dados do ERA5 como forçantes.

(a) GoAmazon IOP1 - ERA5



(b) GoAmazon IOP2 - ERA5



(a) Primeira linha de Figuras mostra o CRE da taxa de aquecimento devido radiação de onda curta e segunda linha CRE da taxa de aquecimento/resfriamento devido radiação de onda longa. Primeira coluna de Figuras são os dados de referência (ERA5), segunda coluna são as simulações com o CFRM\_exp e terceira coluna são as simulações com o CFRM\_ctl, ambas simulações forçadas com os dados do ERA5 para o período úmido (IOP1). (b) é o mesmo do (a), porém para o período seco (IOP2).

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 5.3 mostra um resumo dos valores de correlação entre as simulações com o CFRM (CFRM\_exp e CFRM\_ctl) e os dados de referência (SAM e ERA5), para as taxas de aquecimento/resfriamento devido a radiação de onda curta e onda longa e o efeito radiativos das nuvens nessas taxas. As correlações analisadas foram calculadas para as simulações realizadas no ponto T3 do GoAmazon 2014/15 e nas demais regiões mostradas na Figura 3.1 (Darwin, Nauru, Manus e ETPO).



As taxas de aquecimento devido a radiação de onda curta mostraram os maiores valores de correlação, principalmente, para a simulação do GoAmazon 2014/15 utilizando os dados do SAM como forçantes no CFRM. Nas demais regiões, incluindo o GoAmazon 2014/15, porém utilizando os dados do ERA5 como forçantes, os valores de correlação foram maiores quando se utiliza a nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp). Somente na região do ETPO que os valores de correlação foram o mesmo para as duas parametrizações (0.71).

Em relação a forçante radiativa de nuvem na taxa de aquecimento devido a radiação de onda curta, os valores de correlação são maiores utilizando a nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp) em relação às simulações utilizando a parametrização controle (CFRM\_ctl). Isto indica que a nova parametrização de fração de nuvem representa melhor a nebulosidade em relação à parametrização controle, para todas as áreas de estudo, exceto para a região do ETPO que não mostra uma melhora em termos de correlação.

As taxas de aquecimento/resfriamento devido a radiação de onda longa, também mostraram melhor correlação com os dados de referência nas simulações utilizando a nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp). O efeito radiativo das nuvens na taxa de aquecimento devido a radiação de onda longa também foi melhor simulado na utilização da nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp).

De forma geral, a utilização da nova parametrização de fração de nuvens mostra resultados melhores em relação a parametrização controle. As taxas de aquecimento/resfriamento devido a radiação de onda curta e onda longa, bem como o efeito radiativo das nuvens nessas taxas de aquecimento, foram melhor simuladas com o CFRM\_exp.

Tabela 5.3 - Resumo dos valores de correlação entre as taxas de aquecimento/resfriamento simuladas com o CFRM e os dados de referência.

	FORÇANTE (SAM)		FORÇANTE (ERA5)								
	GOAMAZON		GOAMAZON		NAURU		MANUS		DARWIN		ETPO
	IOP1	IOP2	IOP1	IOP2	LA NINA	EL NINO	LA NINA	EL NINO	ÚMIDO	SECO	JAN 2019
HRSW EXP (CTL)	0,93 (0,87)	0,96 (0,91)	0,34 (0,27)	0,59 (0,47)	0,78 (0,77)	0,49 (0,46)	0,71 (0,64)	0,36 (0,35)	0,55 (0,47)	0,61 (0,60)	0,71 (0,71)
CRE HRSW EXP (CTL)	0,83 (0,51)	0,65 (0,27)	0,48 (0,29)	0,60 (0,45)	0,44 (0,34)	0,61 (0,51)	0,55 (0,44)	0,64 (0,55)	0,54 (0,39)	0,37 (0,24)	0,28 (0,44)
HRLW EXP (CTL)	0,42 (0,47)	0,08 (0,28)	0,57 (0,56)	0,45 (0,50)	0,46 (0,21)	0,79 (0,63)	0,87 (0,65)	0,81 (0,69)	0,70 (0,58)	0,58 (0,56)	0,04 (0,05)
CRE HRLW EXP (CTL)	0,75 (0,34)	0,70 (0,32)	0,56 (0,35)	0,63 (0,35)	0,15 (0,01)	0,73 (0,50)	0,72 (0,45)	0,73 (0,56)	0,68 (0,37)	0,63 (0,55)	0,01 (0,01)

Foram utilizadas siglas para simplificar a nomenclatura na Tabela. HRSW representa a taxa de aquecimento devido a radiação de onda curta, HRLW representa a taxa de aquecimento devido a radiação de onda longa. O CRE é o efeito radiativo das nuvens, calculado pela diferença entre os a taxa de aquecimento/resfriamento para condições de céu com nebulosidade e estimado para céu claro.

Fonte: Produção do autor.

## 5.4 Conclusão

Nesta segunda Seção de resultados, o objetivo principal foi desenvolver uma parametrização de fração de nuvens para obter uma melhor estimativa da distribuição vertical da nebulosidade que seja consistente com os dados observados, visando contribuir para a redução das incertezas dos modelos numéricos utilizados na previsão de tempo e clima. O estudo foi realizado para diferentes pontos na região tropical do planeta.

Primeiramente foram analisados os gráficos de dispersão da fração de nuvem integrada com o intuito de verificar se a nova versão da parametrização de fração de nuvens mostra uma melhor representação da nebulosidade em relação à parametrização controle.

O CFRM foi integrado utilizando tanto a nova parametrização quanto a parametrização controle. Os resultados mostraram que o CFRM simulando com consistência o padrão da nebulosidade. As duas parametrizações mostraram maiores valores de fração de nuvens nos períodos úmidos da região do GoAmazon 2014/15 e Darwin em relação ao período seco dessas duas regiões, consistente com os dados de referência. Nas regiões de Nauru e Manus, os maiores valores de fração de nuvens foram encontrados nos períodos de atuação do fenômeno El Niño, tanto nas simulações quanto nos dados de referência. Em períodos de La Niña os valores de fração de nuvens são menores nas duas localidades, entretanto na região de Manus, por estar localizado na piscina quente do Pacífico Tropical, apresenta valores maiores em relação à Nauru, e esse padrão é melhor simulado pelo CFRM utilizando a nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp).

Apesar de que as duas parametrizações mostraram padrões semelhantes em relação a diferentes períodos para todas as localidades, as simulações com o CFRM\_exp, mostraram valores mais próximos aos dados de referência e menor espalhamento em relação às simulações realizadas utilizando a parametrização controle.

A segunda parte dos resultados visou analisar o comportamento dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa incidente à superfície em função da nebulosidade simulada com o CFRM utilizando as duas parametrizações de fração de nuvem (CFRM\_exp e CFRM\_ctl). Também teve o objetivo de validar a utilização dos dados do ERA5 como forçantes para a realização das simulações do CFRM para as demais áreas de estudo (TWP e ETPO) que não há dados simulados do SAM.

Os resultados mostraram que na região do GoAmazon 201/15 as simulações com o CFRM forçadas com o SAM, mostraram resultados consistentes com os dados de referência, principalmente quando utilizada a parametrização de nuvens proposta neste trabalho (CFRM\_exp).

No período úmido há vários dias com diminuição no fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície, devido a maior frequência de nuvens, e esse padrão não é encontrado no período seco em que há uma diminuição na frequência de nuvens. Este comportamento foi melhor simulado com o CFRM\_exp. As simulações com a parametrização controle (CFRM\_ctl) mostram uma subestimativa do fluxo de radiação

de onda curta nos períodos úmido e seco na região do GoAmazon 2014/15, indicando que esta parametrização tende a superestimar a nebulosidade. Este comportamento é confirmado principalmente na análise do efeito radiativo das nuvens nos fluxos de radiação.

Com relação ao fluxo de radiação de onda longa incidente à superfície, não é possível definir uma clara melhora nas simulações realizadas utilizando a nova parametrização de fração de nuvens. Pois, é uma variável difícil de ser simulada em modelos numéricos por depender de inúmeros fatores que não são tratados neste trabalho e que foram descritos nos resultados.

As simulações utilizando os dados do ERA5 como forçantes mostraram resultados similares às simulações realizadas utilizando os dados do SAM como forçantes e uma ligeira melhora na simulação do fluxo de radiação de onda incidente a superfície. Com isso, permitiu-se realizar as simulações para as demais áreas de estudo, utilizando os dados do ERA5 como forçantes.

Na última parte dos resultados, foram analisadas as taxas de aquecimento/resfriamento devido a radiação de onda longa e onda curta, juntamente com o efeito radiativo das nuvens.

As simulações do CFRM, utilizando os dados do SAM como forçantes, descrevem bem o comportamento das taxas de aquecimento nos períodos úmido e seco na região amazônica. No período úmido, devido a maior frequência de nuvens altas e de convecção profunda foi possível observar maiores variações nas taxas de aquecimento/resfriamento em níveis mais altos da atmosfera, enquanto que no período seco devido a maior frequência de nuvens baixas as variações nas taxas de aquecimento/resfriamento são observadas em níveis mais baixos da atmosfera. Esse comportamento é melhor simulado utilizando a nova parametrização de fração de nuvens (CFRM\_exp).

Os resultados encontrados nas simulações utilizando os dados do ERA5 como forçantes, são similares aos utilizando dados do SAM. Entretanto, os resultados do efeito radiativo das nuvens nas taxas de aquecimento/resfriamento, se aproximam mais dos dados do SAM (usado como referência) do que o próprio dado de referência do ERA5, indicando

que a nova parametrização de fração de nuvens tende a corrigir o erro nas taxas de aquecimento dos dados do ERA5.

Tanto para as taxas de aquecimento, quanto para a forçante radiativa de nuvens, as simulações do CFRM utilizando a nova parametrização de nuvens mostram resultados consistentes com os dados de referência.

No próximo Capítulo a nova parametrização de fração de nuvens é implementada no modelo global de tempo e clima BAM. Como os resultados apresentados neste Capítulo indicaram um bom desempenho da nova parametrização de fração de nuvens quando acoplado a um esquema de radiação (nesse caso o CLIRAD), espera-se que sua aplicação em um modelo de tempo e clima também diminua os erros associados à representação da nebulosidade.

## **6 AVALIAÇÃO DA NOVA PARAMETRIZAÇÃO DE FRAÇÃO DE NUVEM NA REPRESENTAÇÃO DA NEBULOSIDADE GLOBAL E O IMPACTO NOS FLUXOS DE RADIAÇÃO E VARIÁVEIS DE LARGA ESCALA UTILIZANDO O MODELO ATMOSFÉRICO GLOBAL BRASILEIRO**

Nos Capítulos anteriores foram obtidos os resultados observacionais e de modelagem numérica de alta resolução que indicam a importância de construir uma boa parametrização de nebulosidade para a representação mais realística dos diferentes tipos de nuvens e a sua interação com a radiação. Com base nas informações obtidas dos resultados foi construída uma parametrização de nebulosidade em função de algumas variáveis ambientais e de microfísica de nuvens. Esta parametrização mostrou melhorias significativas na descrição da interação da nebulosidade com a radiação quando testadas para alguns sítios experimentais (Figura 3.1). Adicionalmente, os resultados também mostraram uma boa consistência física e correlação com os dados observados. Entretanto, para consolidar esta nova parametrização há a necessidade de implementar e validar os resultados em algum modelo atmosférico. Portanto, neste terceiro Capítulo de resultados, é discutido o comportamento de um modelo atmosférico interagindo com esta nova parametrização de fração de nuvens que foi desenvolvida neste trabalho. A implementação foi realizada no Modelo Atmosférico Global Brasileiro (BAM) e experimentos climáticos foram configurados para analisar a interação do modelo BAM com esta nova parametrização de fração de nuvens. A configuração dos experimentos consiste em realizar duas simulações climáticas globais para o período de (1975-2010) com o BAM, sendo que no primeiro experimento utilizou-se a parametrização de fração de nuvem controle (simulação chamada de BAM\_ctl) e no segundo experimento utilizou-se a nova parametrização de fração de nuvens apresentada e avaliada na Seção anterior de resultados (simulação chamada de BAM\_exp).

O objetivo desse Capítulo é analisar o comportamento de algumas variáveis geradas pelas simulações climáticas realizadas com o modelo BAM e entender como um modelo atmosférico interage com esta nova parametrização de fração de nuvens.

Foram analisadas a interação dos fluxos de radiação de onda longa e onda curta com a nebulosidade gerada pela nova parametrização de fração de nuvem, bem como o impacto na precipitação e temperatura do ar a 2 metros. Para a avaliação dos experimentos serão

utilizados os seguintes dados de referência: CERES para a fração de nuvens e os fluxos de radiação de onda longa e onda curta na superfície e topo da atmosfera, GPCP para a precipitação e ERA5 para temperatura a 2 metros. As métricas estatísticas que são utilizadas nas análises são as médias climatológicas, BIAS, RMSE e coeficiente de correlação entre as simulações e os dados de referência. Os campos destes índices estatísticos são plotados espacialmente. Optou-se em analisar as médias anuais para os dados dos fluxos de radiação e fração de nuvens, assim como as médias sazonais (verão e inverno) para as demais variáveis.

### **6.1 Avaliação da melhoria na representação da cobertura total da nebulosidade em simulação longa**

Uma representação da distribuição espacial (vertical e horizontal) realística da nebulosidade é o principal fator para analisar se qualquer parametrização de nuvens está consistente fisicamente com as variáveis ambientais (umidade relativa, temperatura, concentração de água líquida e gelo). A Figura 6.1 mostra a distribuição média anual global (de 2001 a 2016) do campo de nebulosidade simulada com o modelo BAM e obtida com os dados de nebulosidade do CERES. Os dados de referência (CERES – Figura 6.1a) mostram maiores valores de fração de nuvens nas regiões oceânicas, aproximadamente, nas faixas de latitude de 60° Norte-Sul, associado a passagens dos sistemas frontais transientes e as regiões de *storm track* (BENGTSSON; HODGES; ROECKNER, 2006). Na região equatorial também é observado uma faixa de nebulosidade associado à presença da ZCIT (WALISER; GAUTIER, 1993). Os menores valores de fração de nuvem são encontrados nas regiões desérticas do planeta associados a atuação dos anticiclones semipermanentes (PEIXOTO; OORT, 1992), inibindo a formação de nuvens. A média global da fração de nuvem obtida com os dados do CERES é de 0.61, a média para a região tropical (faixa entre 30° Norte -Sul) é de 0.53 e para a região somente da América do Sul é de 0.63.

A simulação com o BAM\_ctl (Figura 6.1b), que utiliza a parametrização de fração de nuvens padrão do modelo BAM mostra uma superestimativa na distribuição global da fração de nuvem em relação ao dado de referência do CERES, principalmente na região tropical. Este comportamento pode ser atribuído a parametrização das nuvens convectivas utilizada no experimento controle, que utiliza uma estimativa de fração de nuvens em

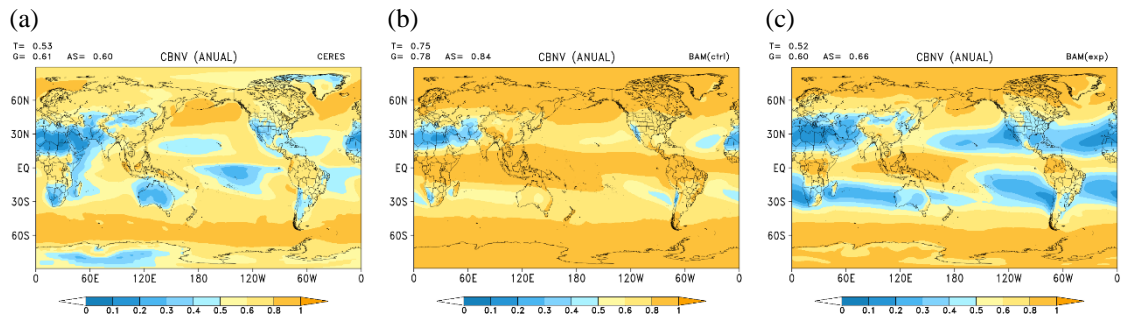
função do logaritmo da intensidade de precipitação acumulada em 3 horas e replica o mesmo valor da fração de nuvens da base ao topo das nuvens convectiva para todos os níveis do modelo. Em altas latitudes, acima de 60° (norte e sul) a fração de nuvens é calculada em função do movimento vertical ( $\omega$ ), estabilidade da atmosfera ( $\frac{\Delta\theta}{\Delta z}$ ) e limiares de umidade relativa (RH). Nestas regiões, erros na estimativa da umidade relativa devido à variação de temperatura simulada pelo modelo e os limiares de umidade relativa utilizados para o cálculo de parametrização de fração de nuvens podem resultar na superestimativa da fração de nuvens simulada pelo modelo BAM. Como consequência verifica-se na simulação controle (Figura 6.1b), que o padrão da nebulosidade (média global (0.75), a média para a região tropical (0.78) e na América do Sul (0.84)) são maiores em relação ao dado do CERES. No trabalho de Gonçalves (2017) com o modelo BAM, verifica-se os mesmos erros utilizando o código radiativo *Rapid Radiation Transfer Model* (RRTMG - (IACONO, 2011)), portanto, pode-se concluir que o problema está no diagnóstico da nebulosidade. Os erros no diagnóstico e ou prognóstico do padrão de nebulosidade continuam sendo um dos maiores desafios em modelos numéricos da atmosfera.

Para tentar resolver o problema de superestimativa de fração de nuvens, a nova parametrização desenvolvida neste trabalho utiliza uma função de distribuição de probabilidade de Weibull para as variáveis da microfísica (água líquida e gelo). A Figura 6.1c mostra a simulação da distribuição espacial de nebulosidade usando o modelo BAM com a nova parametrização de fração de nuvem (BAM\_exp). Na simulação BAM\_exp, nota-se uma representação da nebulosidade global mais próximo do dado de referência (CERES). Na região tropical é possível observar que o experimento (BAM\_exp) apresenta resultados consistentes com os dados do CERES, simula as áreas da maior e menor ocorrência de fração de nuvem em relação a simulação controle (BAM\_ctl, Figura 6.1b), principalmente sobre os continentes. Em altas latitudes, acima de 60° (norte e sul) a nova parametrização de nuvens melhora a superestimativa de fração nuvens em relação ao experimento controle (BAM\_ctl). Entretanto, em altas latitudes a superestimativa ainda persiste, estes resultados indicam os erros na estimativa de fração de nuvens em altas latitudes tem uma dependência da variabilidade do prognóstico de temperatura e umidade específica, água líquida e gelo. Portanto, os erros nos campos destas variáveis



devido a outras interações (dinâmica e física) produzem a superestimativa da fração de nuvens nestas regiões em alta latitudes. Em regiões onde há formação de nuvens baixas e rasas na costa oeste dos continentes (América, África e Europa) estão muito próximas das áreas dos ramos descendentes da célula de Hadley, onde apresenta forte estabilidade estática da atmosfera. Portanto, parametrizar a fração de nuvens através de um modelo global de baixa resolução horizontal e vertical é mais complicado, influenciando na subestimativa de fração de nuvens. Um resultado consistente com os dados de fração de nuvens do CERES é a simulação da fração de nuvens para as áreas desérticas onde apresentam baixa nebulosidade. Apesar da superestimativa e subestimativa em algumas regiões do planeta, a média global (0.52), tropical (0.60) e da América do Sul (0.66) estão mais consistentes com os dados de referência do CERES (0.53, 0.61 e 0.60).

Figura 6.1 - Climatologia Anual da cobertura total de fração de nuvens.



Média anual (2001-2016) da fração de nuvem total obtida com os dados do CERES (a), simulação controle do BAM (b) e experimento do BAM (c). T é a média da região tropical (antes 30°S e 30°N), G é a média para o globo e AS é a média para a região da América do Sul (sem considerar os oceanos adjacentes).

Fonte: Produção do autor.

Uma análise estatística mais detalhada é ilustrada na Figura 6.2, onde estão plotadas espacialmente o BIAS, RMSE e o coeficiente de correlação ( $r$ ) da fração de nuvem integrada verticalmente. Estas métricas estatísticas foram calculadas entre os dados de referência do CERES e as simulações realizadas com o BAM utilizando as duas parametrizações de fração de nuvens (BAM\_ctl e BAM\_exp).

O BIAS é uma boa métrica para identificar as regiões onde há superestimativa e subestimativa de fração de nuvens. A análise do campo do BIAS é possível identificar que na simulação BAM\_ctl (Figura 6.2a) há uma superestimativa de fração de nuvem, na região tropical, em altas latitudes e sobre boa parte dos continentes, em relação ao dado de referência (CERES). Entretanto, sobre as regiões oceânicas de médias latitudes e o

deserto do Saara o BIAS é próximo de zero. Os resultados mostram que a média do BIAS global (0.17), tropical (0.22) e sobre a América do Sul (0.24) são positivas, indicando que a parametrização controle gera maior quantidade de nebulosidade sobre essas regiões em relação ao dado do CERES. Estes resultados de superestimativa já eram esperados com a parametrização de nuvens utilizada no experimento controle.

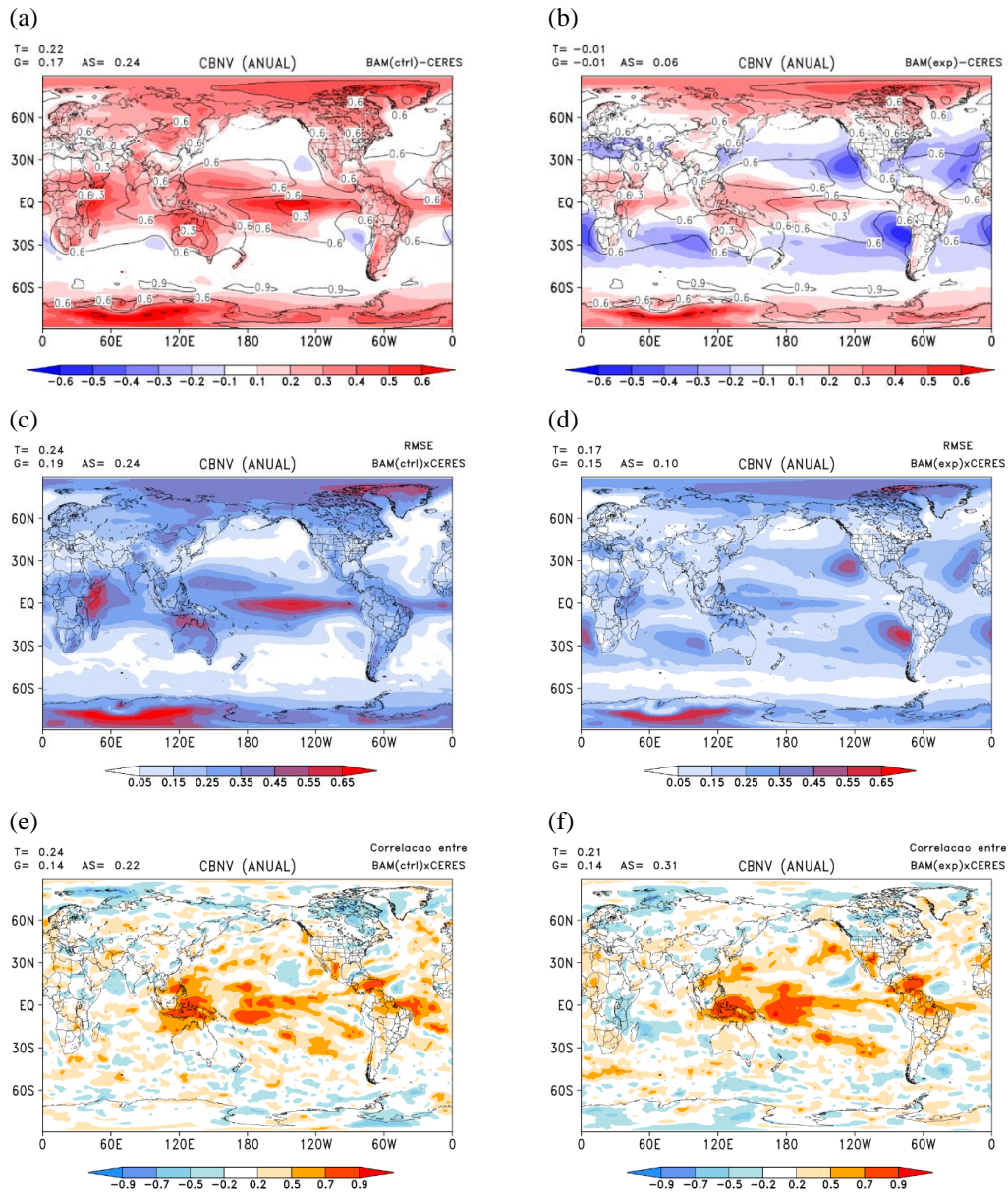
A simulação BAM\_exp (Figura 6.2b) mostrou um BIAS menor em relação ao dado de referência do CERES, quando comparado a simulação com o BAM\_ctl. Entretanto, nota-se uma subestimativa de fração de nuvens sobre as regiões oceânicas de médias latitudes, nas faixas entre de 25-50°N e 25-50°S, o modelo mostra um bom desempenho sobre as regiões continentais entre as faixas de 50-70°S e 50-70°N. É importante mencionar que a nova parametrização de fração de nuvem foi ajustada utilizando os dados observacionais da região amazônica proveniente experimento de campo GoAmazon 2014/15 e é visível uma redução do BIAS, tendendo a zero, nessa região. Porém, a redução do BIAS não ocorre somente na região amazônica, mas em toda a América do Sul, continente africano, e boa parte da Ásia, América do Norte e Oceania. A média global (-0.01), tropical (-0.01) e da América do Sul (0.06) do BIAS também foram menores na simulação com o BAM\_exp. Assim, pode-se afirmar que a nova parametrização de fração de nuvens reduz a superestimativa de fração de nuvens sobre a região tropical, altas latitudes e sobre os continentes mostrando que os ajustes realizados com os dados das campanhas experimentais foram essenciais para as melhoras nestas regiões. Entretanto, em regiões onde ocorrem nuvens baixas com profundidade rasa, a nova parametrização tende a subestimar a fração de nuvens.

O RMSE que é o erro absoluto médio indica as áreas onde há os maiores erros nas simulações da fração de nuvens. Verifica-se na simulação BAM\_ctl (Figura 6.2c) que os erros globalmente, na região tropical e América do Sul são maiores em relação a simulação BAM\_exp (Figura 6.2d), indicando que a nova parametrização contribui para melhorar a simulação climática realizada com o modelo BAM. A comparação das Figuras 6.2c e 6.2d indica que na simulação BAM\_exp o RMSE é menor na região em que a nova parametrização de fração de nuvem foi ajustada (região amazônica), bem como em boa parte da região tropical (30°N e 30°S).

As Figuras 6.2e e 6.2f mostram a distribuição espacial dos coeficientes de correlação. Verifica-se valores altos (acima de 0.7) na faixa tropical, possivelmente relacionado a fração de nuvens devido a presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), nas simulações com o BAM\_ctl e BAM\_exp. No entanto, na simulação com o BAM\_exp nota-se uma melhora no coeficiente de correlação, principalmente sobre a região amazônica e parte do oceano pacífico tropical.

As três métricas estatística (BIAS, RMSE, r) indicam melhora do campo de fração de nuvens nas simulações climáticas realizadas com o modelo BAM e a nova parametrização (BAM\_exp).

Figura 6.2 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação (r) entre as simulações com o modelo BAM e os dados de referência do CERES para a fração de nuvem integrada.



Bias para a simulação controle (a) e experimento (b), RMSE para a simulação controle (c) e experimento (d) e correlação para a simulação controle (e) e experimento (f). T é a média da região tropical (antes 30°S e 30°N), G é a média para o globo e AS é a média para a região da América do Sul (sem considerar os oceanos adjacentes).

Fonte: Produção do autor.

## 6.2 Avaliação do impacto da representação da nebulosidade nas componentes de radiação na superfície terrestre e no topo da atmosfera

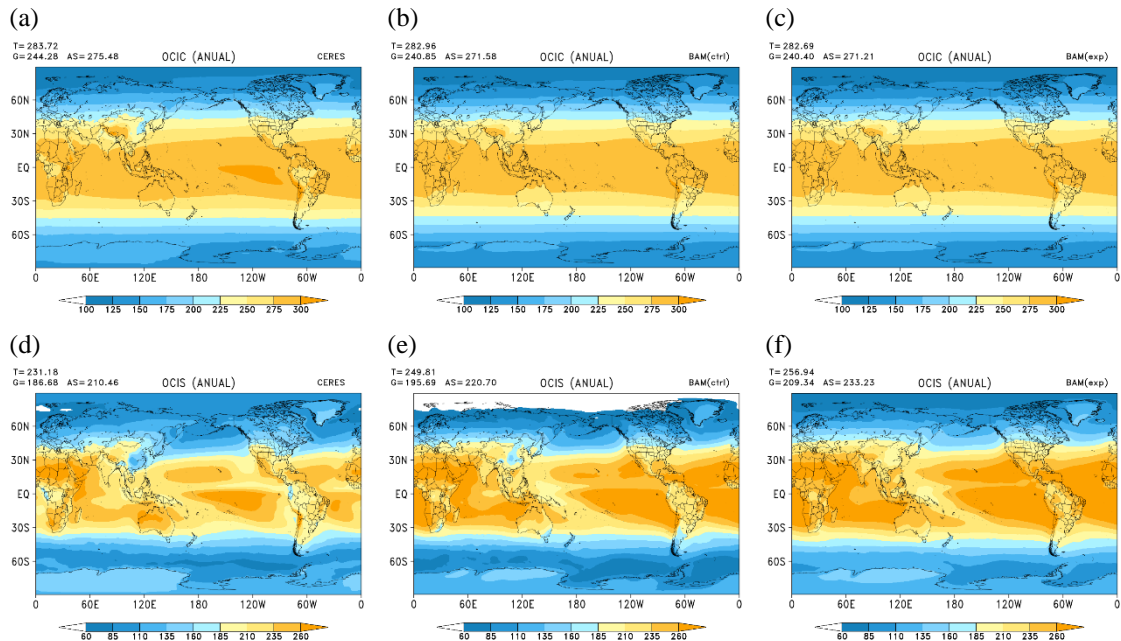
A Figura 6.3 mostra os fluxos de radiação de onda curta incidente à superfície para condições de céu claro (OCIC - Figuras 6.3a, 6.3b e 6.3c) e com presença de nuvens (OCIS - Figuras 6.3d, 6.3e e 6.3f).

A Figura 6.3a mostra a climatologia anual do fluxo de radiação de onda curta incidente a superfície sem a presença de nuvens (OCIC) para o dado de referência (CERES), verifica-se uma distribuição espacial com uma maior quantidade de OCIC nas regiões equatorial/tropical, a qual diminui em direção das latitudes médias e altas, devido ao ângulo de incidência dos raios solares na direção latitudinal. Portanto, há uma maior disponibilidade de radiação de onda curta e energia para os processos atmosféricos na região tropical e menor quantidade em latitudes médias e principalmente em latitudes altas.

Ao comparar a climatologia do CERES (Figura 6.3a) com as simulações do BAM que utiliza a nova parametrização de fração de nuvens (BAM\_exp - Figura 6.3c) e a parametrização controle (BAM\_ctl - Figura 6.3b), ambas as simulações mostram um padrão global semelhante ao dado de referência do CERES. Nota-se uma superestimativa sobre o Norte da América do Sul e região central da África. Na região tropical, no Oceano Pacífico Leste, os dados das duas simulações realizadas subestimam a radiação de onda curta para céu claro. Neste caso, a subestimativa pode estar relacionada às concentrações de aerossóis não representados corretamente pelo modelo BAM. Nestas regiões, as simulações consideram aerossol de *background* com profundidade óptica (AOD) de 0.1 (sobre o Oceano) e 0.2 (sobre o continente) constantes temporalmente e espacialmente. Reid et al., (2006) mostra que a profundidade optica varia de 0.05 a 0.12 sobre a região do Oceano Pacífico. Sobre o Brasil e África as profundidades opticas, principalmente em regiões onde ocorrem queimadas, são superiores a 0.5 (KINNE et al., 2006; ROSÁRIO et al., 2013). Apesar das simplificações sobre os efeitos diretos do aerossol, as simulações globais de céu claro apresentam boa concordância com os dados do CERES. Estes resultados para a radiação de onda curta para condições de céu claro são esperados, pois nessa variável (OCIC) não há influência da nebulosidade nos fluxos de radiação, a qual é a maior incerteza no BAM para a determinação dos fluxos descendentes a superfície.

Nas Figuras 6.3d, 6.3e e 6.3f estão os fluxos de radiação de onda curta incidente à superfície, na presença de nebulosidade (OCIS). Os dois experimentos com o modelo BAM fornecem campos anuais de OCIS (Figura 6.3e e Figura 6.3f) equivalentes aos dados de referência do CERES (Figura 6.3d). Entretanto, verifica-se nas duas simulações (BAM\_ctl e BAM\_exp) que o modelo BAM tende a superestimar o campo de OCIS. Este resultado era esperado somente na simulação BAM\_exp, em que simula menos fração de nuvens (menor espessura optica relacionado a nuvens). Por outro lado, esperava-se uma subestimativa do campo de OCIS na simulação BAM\_ctl devido à superestimativa de fração de nuvens nesta simulação (maior espessura optica relacionado a nuvens). Nas regiões da costa oeste dos continentes (América, África e Europa), onde há formação de nuvens baixas e com profundidade geométrica rasa, a simulação BAM\_exp apresenta uma superestimativa de OCIS. Este resultado está fisicamente consistente, pois o modelo BAM com a nova parametrização de nebulosidade tem deficiência em simular a fração de nuvens nestas regiões. Entretanto, não se esperava que na simulação BAM\_ctl houvesse superestimativa de OCIS, pois a parametrização de fração de nuvens utilizada na simulação BAM\_ctl simulou a fração de nuvens nas regiões da costa oeste dos continentes (América, África e Europa). Sobre os continentes as simulações de OCIS nos dois experimentos estão relativamente consistentes com o dado de OCIS do CERES. No entanto, o BAM\_exp apresenta melhores resultados sobre a Oceania e América do Sul. As análises estatísticas mais detalhadas podem ser verificadas no APENDICE A (ver BIAS na Figura A.1) em relação ao dado de referência (CERES) nas duas simulações (BAM\_ctl e BAM\_exp).

Figura 6.3 - Climatologia dos fluxos de radiação de onda curta incidente à superfície para condições de céu claro e céu com nuvens.



OCIC representa o fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície para condições de céu claro e OCIS o fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície para condições de céu com presença de nuvens. T é a média da região tropical (antes 30°S e 30°N), G é a média para o globo e AS é a média para a região da América do Sul (sem considerar os oceanos adjacentes).

Fonte: Produção do autor.

A análise do impacto das parametrizações de fração de nuvens é plotada na Figura 6.4, onde verifica-se os fluxos de radiação de onda longa emitida em direção à superfície para condições de céu claro (OLIC - Figuras 6.4a, 6.4b e 6.4c) e com presença de nuvens (OLIS - Figuras 6.4d, 6.4e e 6.4f).

O fluxo de radiação de onda longa incidente à superfície para condições de céu claro (OLIC - Figuras 6.4a, 6.4b e 6.4c) também mostra uma maior variação na direção latitudinal (Norte-Sul) na média anual, com maior incidência na região tropical e menor em direção aos polos. Este padrão é definido pela temperatura e pela concentração dos gases de efeito estufa, principalmente do vapor d'água. Grande parte da energia emitida pela superfície é absorvida pelos gases atmosféricos de efeito estufa, e reemitida na direção da superfície, com intensidade proporcional a temperatura do ar elevada à quarta potência. Em relação as simulações BAM\_ctl e BAM\_exp, os resultados mostram padrão espacial da média anual semelhantes aos dados do CERES. Somente na região central da Groelândia que a simulação com o BAM\_ctl difere dos dados do CERES. Entretanto, A simulação com o BAM\_exp mostra um padrão mais semelhante aos dados de referência

(CERES). As médias para o globo, para região tropical e América do Sul também são semelhantes entre o dado de referência e as simulações com o BAM.

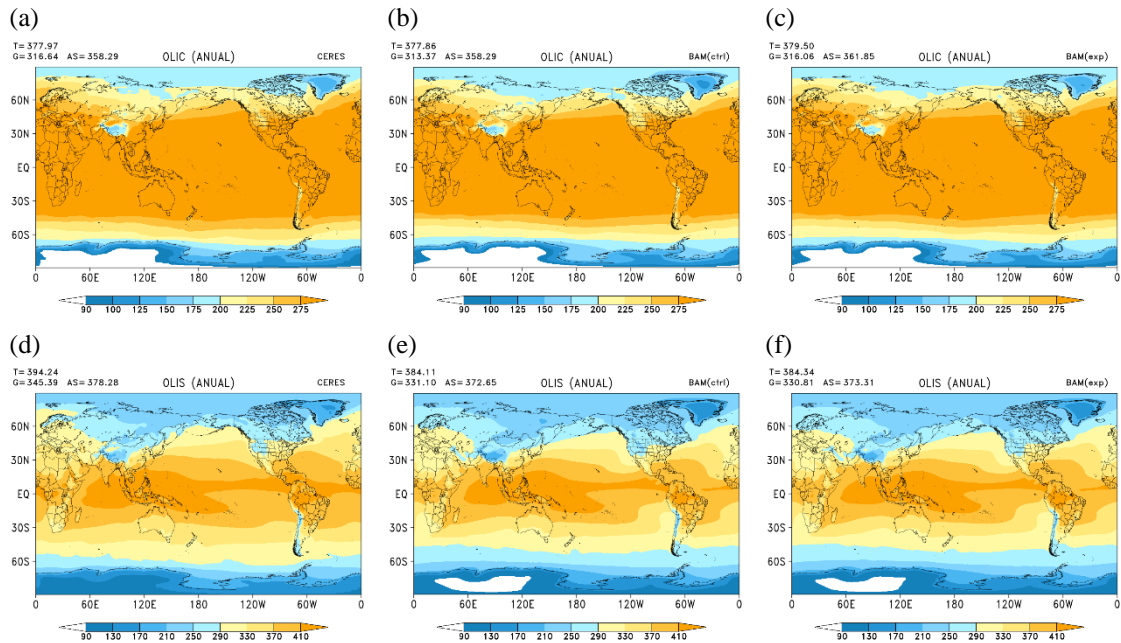
O OLIS é o fluxo de radiação de onda longa incidente à superfície na presença de nuvens (Figuras 6.4d, 6.4e e 6.4f). A maior incidência de OLIS obtida através dos dados do CERES, BAM\_ctl e BAM\_exp está na região tropical/equatorial, principalmente devido a presença da nebulosidade na região de atuação da Zona de Convergência Intertropical, em que apresenta nuvens convectivas profundas. A extensa área de nebulosidade convectiva, absorve significativamente a radiação de onda longa proveniente de camadas atmosféricas inferiores, e emitem essa radiação na direção da superfície, aumentando a intensidade de OLIS.

Na região Amazônica, também é verificado uma grande incidência de OLIS relacionado a presença de alta concentração de umidade específica na atmosfera e a presença de nebulosidade associada a convecção profunda local e atuação de sistemas de larga escala.

As simulações dos experimentos BAM\_ctl (Figura 6.4e) e o BAM\_exp (Figura 6.4f) simularam bem o padrão espacial da média anual de OLIS em relação ao dado do CERES (Figura 6.4d), porém mostram uma diminuição de OLIS com ambas parametrizações, nas costas Leste dos continentes Africano e América do Sul, bem na região da ZCIT localizada no oceano Atlântico. Isto mostra que a estimativa de fração de nuvens produzida pelas duas parametrizações não está diretamente influenciando o campo de OLIS. Verifica-se que apesar do campo de cobertura de nuvens serem distintos nas simulações BAM\_ctl e BAM\_exp, os campos de OLIS são similares em ambos experimentos. Com isso, OLIS pode estar mais relacionado a concentração de umidade (água precipitável) e menos a fração de nuvens. Portanto, o campo de OLIS simulado nos dois experimentos são espacialmente bem diferentes do campo de fração de nuvens.



Figura 6.4 - Climatologia dos fluxos de radiação de onda longa incidente à superfície para condições de céu claro e céu com nuvens.



OLIC representa o fluxo de radiação de onda longa incidente à superfície para condições de céu claro e OLIS o fluxo de radiação de onda longa incidente à superfície para condições de céu com presença de nuvens. T é a média da região tropical (antes 30°S e 30°N), G é a média para o globo e AS é a média para a região da América do Sul (sem considerar os oceanos adjacentes).

Fonte: Produção do autor.

As forçantes radiativas de nuvens para a radiação de onda curta, onda longa e total são parâmetros essenciais para analisar o real impacto da nova parametrização de fração de nuvens nas simulações climáticas. Os resultados dos cálculos das forçantes radiativas de nuvens estão plotados na Figura 6.5, onde mostram o efeito radiativo das nuvens no fluxo de radiação de onda curta no topo da atmosfera (ROCECRF), o efeito radiativo das nuvens no fluxo de onda longa no topo da atmosfera (ROLECRF) e o efeito radiativo líquido no topo da atmosfera (NETCRF). O ROCECRF é calculado pela diferença entre o fluxo de radiação de onda curta refletido pelo topo da atmosfera para condições de céu claro (ROCC) e céu com nebulosidade (ROCE) e o ROLECRF é calculado da mesma forma que o ROCECRF, porém para o fluxo de radiação de onda longa emitido pelo topo da atmosfera. O NETCRF é calculado pela soma entre o ROCECRF e o ROLECRF.

A média anual de ROCECRF do dado de referência do CERES (Figura 6.5a) é negativo, ou seja, na presença de nuvens maior quantidade do fluxo de radiação de onda curta é refletida pelo topo da atmosfera. Portanto, há uma menor quantidade de energia absorvida

pela atmosfera e superfície, proporcionando um resfriamento do sistema terrestre na presença de nuvens.

As simulações dos experimentos com o BAM\_ctl (Figura 6.5b) e BAM\_exp (Figura 6.5c) mostram um padrão espacial semelhante ao dado de referência do CERES. Entretanto, a média sobre as regiões (global, tropical e América do Sul) indicam que o efeito radiativo das nuvens no fluxo de onda curta no topo da atmosfera simulado nos experimentos BAM\_ctl (Figura 6.5b) e BAM\_exp (Figura 6.5c) são menores em relação ao dado do CERES (Figura 6.5a). Este comportamento é mais intensificado no BAM\_exp (Figura 6.5c) que simula uma menor quantidade de fração de nuvens em relação ao BAM\_ctl (Figura 6.5b), gerando um valor de ROCECRF menor. Sobre a região continental ambos experimentos mostram boa performance quando comparados com dados do CERES. Nos campos de ROCECRF (Figuras 6.5a, 6.5b e 6.5c) pode-se observar a importância das nuvens baixas e rasas na costa Oeste dos continentes (América, África e Europa), nestas regiões os experimentos BAM\_ctl (Fig. 6.5b) e BAM\_exp (Fig. 6.5c) mostram que as parametrizações de fração nuvens tem dificuldade em simular a fração de nuvens baixas e rasa, esta deficiência impacta diretamente a radiação de onda curta refletida no topo da atmosfera. Outra característica importante verificada na simulação BAM\_exp é o comportamento de ROCECRF, que está mais próximo da distribuição de fração de nuvens simulada em relação a simulação BAM\_ctl.

O efeito radiativo das nuvens no fluxo de onda longa no topo da atmosfera obtido com o dado do CERES (Fig. 6.5d) é maior em relação a simulações dos experimentos BAM\_ctl (Fig. 6.5e) e BAM\_exp (Fig. 6.5f). Verifica-se que a média anual de ROLECRF do dado de referência (Fig. 6.5d) é positivo, ou seja, quando há nuvens na atmosfera menor quantidade do fluxo de radiação de onda longa que tem origem nas camadas inferiores da atmosfera escapa pelo topo da atmosfera. Isso indica que a presença de nebulosidade aquece a atmosfera devido a absorção e conseqüentemente emissão de radiação de onda longa pelas nuvens. O padrão espacial simulado com o BAM\_ctl (Fig. 6.5e) e BAM\_exp (Fig. 6.5f) são semelhantes aos dados do CERES, porém mostram uma subestimativa. Este resultado era esperado na simulação BAM\_exp (Fig. 6.5f) que possui menor nebulosidade, diferentemente na BAM\_ctl (Fig. 6.5e) que superestima a nebulosidade. Entretanto, as duas simulações com o BAM indicam que o efeito das nuvens no fluxo de

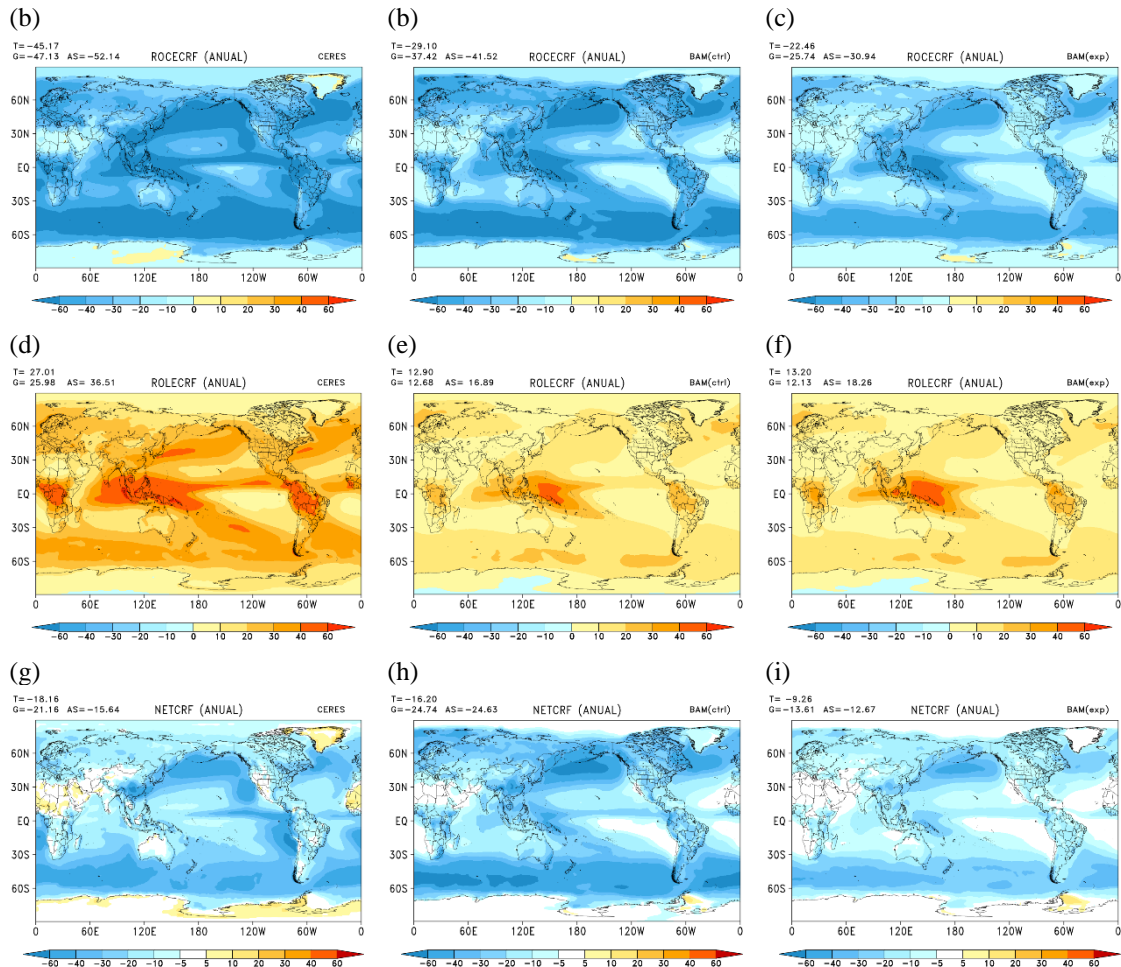
radiação de onda longa no topo da atmosfera é menor em relação ao dado de referência do CERES (Fig. 6.5d).

Para simulações climáticas o mais importante é o efeito radiativo líquido das nuvens, que implica em ganho ou perda de energia na atmosfera, através de absorção ou emissão de radiação. Nesta análise, a média anual de NETCRF do dado de referência do CERES (Fig. 6.5g) mostra o efeito radiativo líquido das nuvens nos fluxos de radiação (onda longa e onda curta) no topo da atmosfera é negativo na maior parte do planeta, com exceção da região do deserto do Saara, Groelândia e parte da Antártida. Estes valores negativos do NETCRF indicam que na presença de nuvens faz a atmosfera esfriar.

As simulações do efeito radiativo líquido das nuvens com o BAM\_ctl (Fig. 6.5h) e BAM\_exp (Fig. 6.5i) mostraram um padrão espacial semelhante aos dados do CERES, exceto nas regiões de nuvens baixas e rasas nas costas oeste dos continentes (América, África e Europa), onde não há formação de nuvens baixas e rasas, portanto, nestas regiões o efeito radiativo das nuvens é menos intenso do que nos dados do CERES (Fig. 6.5g). Porém, verifica-se que o efeito radiativo das nuvens no BAM\_exp (Fig. 6.5i) é menos intenso do que nos dados do CERES (Fig. 6.5g) e mais intenso na simulação BAM\_ctl (Fig. 6.5h).

Esses resultados confirmam o bom desempenho do modelo BAM\_ctl em simulação climática, como já mostrado em Coelho et al., (2021). Também se nota que a simulação utilizando a nova parametrização de fração de nuvens (BAM\_exp) é capaz de reproduzir satisfatoriamente os padrões espaciais dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa na superfície e no topo da atmosfera na presença de nuvens, principalmente na região da América do Sul e sobre a Oceania.

Figura 6.5 - Climatologia das forçantes radiativas de onda curta e onda longa no topo da atmosfera.



Primeira linha do painel é efeito radiativo das nuvens no fluxo de radiação de onda curta no topo da atmosfera, a segunda linha do painel é o efeito radiativo das nuvens no fluxo de radiação de onda longa no topo da atmosfera e a terceira linha do painel é o efeito radiativo líquido no topo da atmosfera. A primeira coluna do painel são os dados de referência (CERES), a segunda coluna do painel é a simulação com o BAM\_ctl e a terceira coluna do painel e a simulação com o BAM\_exp. T é a média da região tropical (antes 30°S e 30°N), G é a média para o globo e AS é a média para a região da América do Sul (sem considerar os oceanos adjacentes).

Fonte: Produção do autor.

### 6.3 Avaliação do impacto e melhoria na simulação da precipitação e temperatura do ar à 2 metros

Importante mencionar que um dos principais desafios de propor novas parametrizações em modelos atmosféricos, é melhorar os processos físicos sem que os campos de precipitação e temperatura próximo a superfície sejam comprometidos. Além das inovações físicas, as parametrizações precisam representar bem as principais variáveis de

modelagem empregadas em diversas aplicações, assim como a temperatura e precipitação.

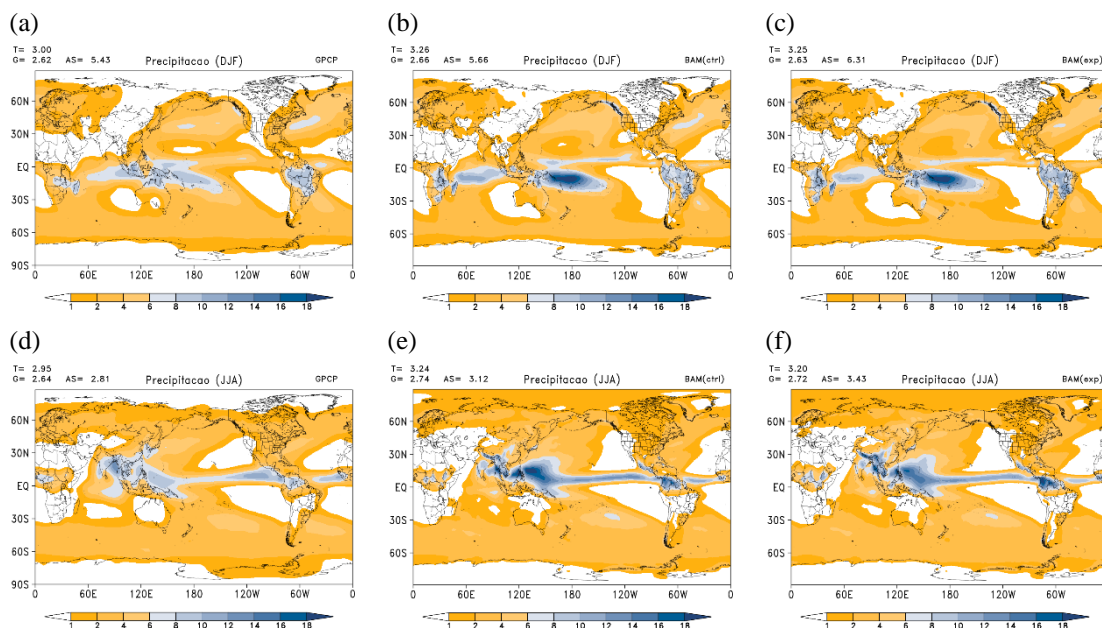
Para avaliar o impacto da representação da nebulosidade simulada utilizando a nova parametrização de fração de nuvens nas variáveis de precipitação e temperatura à 2 metros, foi considerado os períodos de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) e inverno (junho, julho e agosto) austral.

### **6.3.1 Precipitação**

A Figura 6.6 mostra os campos climatológicos globais de precipitação do dado de referência (GPCP) e das simulações do BAM utilizando a parametrização de fração de nuvem controle (BAM\_ctl) e a nova parametrização (BAM\_exp).

Nota-se que as simulações BAM\_ctl (Fig. 6.6b) e BAM\_exp (Fig. 6.6c) realizadas com o modelo BAM tendem a superestimar a climatologia de precipitação em relação ao GPCP, porém, mostraram os padrões dos principais sistemas precipitantes no globo nos períodos de verão e inverno austral, concordando com os dados de referência do GPCP (Fig. 6.6a). No verão austral (Figuras 6.6a, 6.6b e 6.6c) é possível identificar a presença de precipitação nas zonas de convergência do Hemisfério Sul, que são: Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e Zona de Convergência do Índico Sul (ZCIS). Além do mais, é identificada a precipitação associada a forte atividade convectiva na região amazônica e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). No inverno austral (Figuras 6.6d, 6.6e e 6.6f) a faixa de atuação da ZCIT é encontrada mais a Norte como esperado pela sua posição climatológica e é bem definida a atuação dos anticiclones semipermanentes, que inibem a precipitação em suas áreas de atuação. De forma geral, as simulações do BAM representam de forma consistente os sistemas precipitantes mostrados na climatologia dos dados de referência do GPCP, tanto na utilização da parametrização de fração de nuvem controle (BAM\_ctl) quanto na utilização na nova parametrização (BAM\_exp).

Figura 6.6 - Climatologia de precipitação do GPCP e BAM.



A primeira linha do painel é a climatologia de precipitação para o período do verão austral (dezembro, janeiro e fevereiro) e a segunda linha para o inverno austral (junho, julho e agosto). A primeira coluna são os dados de referência (GPCP), segunda coluna é a simulação do BAM utilizando a parametrização de fração de nuvem controle (BAM\_ctl) e a terceira coluna utilizando a nova parametrização de fração de nuvem (BAM\_exp). T é a média da região tropical (antes 30°S e 30°N), G é a média para o globo e AS é a média para a região da América do Sul (sem considerar os oceanos adjacentes).

Fonte: Produção do autor.

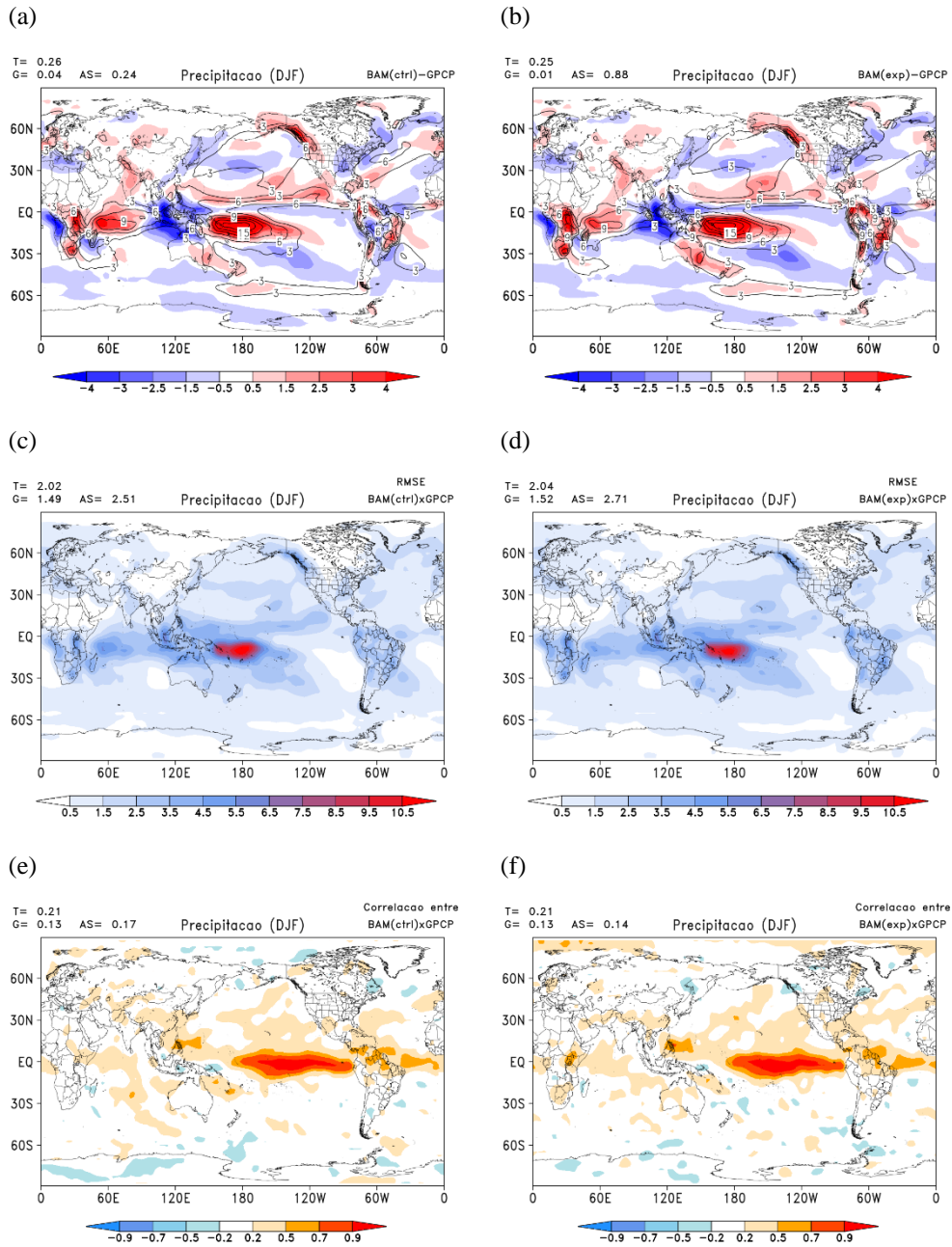
As análises estatísticas mais detalhadas do impacto da parametrização de fração de nuvens podem ser verificadas na Figura 6.7, onde são detalhadas as métricas estatísticas calculadas entre as simulações do BAM (BAM\_ctl e BAM\_exp) e os dados de referência do GPCP para o período de verão austral. A partir do BIAS (Figuras 6.7a e 6.7b) observa-se que as simulações dos experimentos (BAM\_ctl e BAM\_exp) com BAM superestimam a precipitação em grande parte da região tropical, principalmente nas regiões da Zona de Convergência Intertropical, Zona de Convergência do Pacífico Sul, Zona de Convergência do Oceano Índico, no Sul da África e na parte leste da América do Sul. Nota-se também nas simulações com o BAM (BAM\_ctl e BAM\_exp) que há BIAS negativo na região da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), próximo à Cordilheira dos Andes.

As duas simulações (BAM\_ctl e BAM\_exp) mostraram padrões espaciais de BIAS semelhantes indicando que as regiões de superestimativa e subestimativa de precipitação são as mesmas. Portanto, a escolha do tipo de parametrização de nuvens que foi utilizada

nas simulações climáticas (BAM\_ctl e BAM\_exp) não alterou a distribuição espacial de precipitação. A simulação com a parametrização de fração de nuvem controle já havia mostrado um bom desempenho na estimativa da precipitação média (Coelho, et al., 2020). Entretanto é importante ressaltar que a simulação com a nova parametrização de fração de nuvens também simulou satisfatoriamente os padrões de precipitação climatológica, sendo consistentes com a climatologia do GPCP. Este é um resultado importante, pois houve mudanças significativas no campo de nebulosidade o que impacta diretamente nos fluxos de radiação e conseqüentemente no balanço de energia disponível para a geração de precipitação.

Os campos de RMSE da precipitação nas duas simulações (BAM\_ctl e BAM\_exp) mostram as regiões onde ocorrem os maiores erros absolutos médios do campo de precipitação entre as simulações com o BAM e os dados de referência do GPCP (Fig. 6.7c e Fig. 6.7d). Nota-se que os erros no padrão de precipitação estão na faixa de 0.5 a 3.4 (mm/dia) e a área com o maior erro se localiza na região da Zona de Convergência do Pacífico Sul nas duas simulações (BAM\_ctl e BAM\_exp). Estes resultados indicam que a nova parametrização de nebulosidade não introduziu erros na simulação do campo de precipitação nas simulações climáticas. Os mapas de correlação (Figuras 6.7e e 6.7f) mostram uma melhor correlação da precipitação na região da Zona de Convergência Intertropical, em ambas simulações em relação ao dado de referência. Os resultados indicam que o campo de precipitação climatológico não é tão influenciado pela parametrização de fração de nuvens implementado no modelo BAM.

Figura 6.7 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação (r) da climatologia de precipitação para o verão austral.



Bias para a simulação controle (a) e experimento (b), RMSE para a simulação controle (c) e experimento (d) e correlação para a simulação controle (e) e experimento (f). T é a média da região tropical (antes 30°S e 30°N), G é a média para o globo e AS é a média para a região da América do Sul (sem considerar os oceanos adjacentes).

Fonte: Produção do autor.

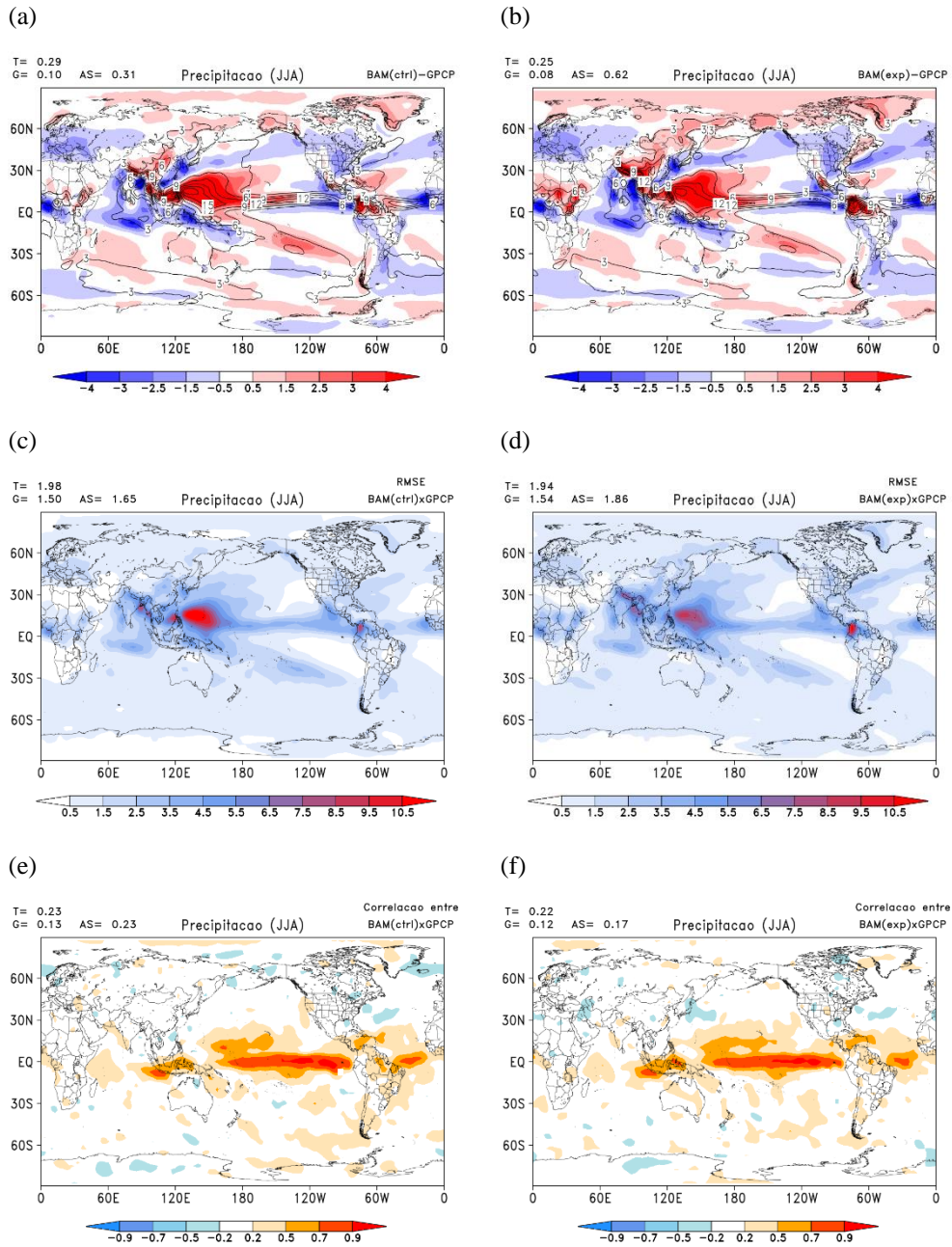


A Figura 6.8 também mostra o BIAS, RMSE e coeficiente de correlação ( $r$ ) entre as simulações do BAM e os dados do GPCP, porém para o período de inverno austral.

Os campos de BIAS mostram que há uma superestimativa de precipitação principalmente na região tropical, sobre o Oceano Pacífico. Esse padrão é encontrado tanto na simulação com a parametrização de nuvem controle (BAM\_ctl) quanto com a nova parametrização (BAM\_exp). Os campos de RMSE mostram um padrão semelhante comparando as duas simulações, porém nota-se uma redução do erro absoluto médio na região oeste do Oceano Pacífico Tropical na simulação com o BAM utilizando a nova parametrização de fração de nuvem (Fig. 6.8d). Os campos de correlação não diferem muito quando se compara as duas simulações com BAM, inclusive é possível notar a boa correlação entre as simulações e os dados do GPCP na região da Zona de Convergência Intertropical.

De forma geral, no inverno austral os campos de precipitação simulados com o BAM\_ctl e o BAM\_exp não apresentam diferenças significativas. Isto indica que o modelo BAM com a nova parametrização de fração de nuvem também tem um bom desempenho em simular o campo climatológico de precipitação.

Figura 6.8 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação da climatologia de precipitação para o inverno austral.



Bias para a simulação controle (a) e experimento (b), RMSE para a simulação controle (c) e experimento (d) e correlação para a simulação controle (e) e experimento (f). T é a média da região tropical (antes 30°S e 30°N), G é a média para o globo e AS é a média para a região da América do Sul (sem considerar os oceanos adjacentes).

Fonte: Produção do autor.

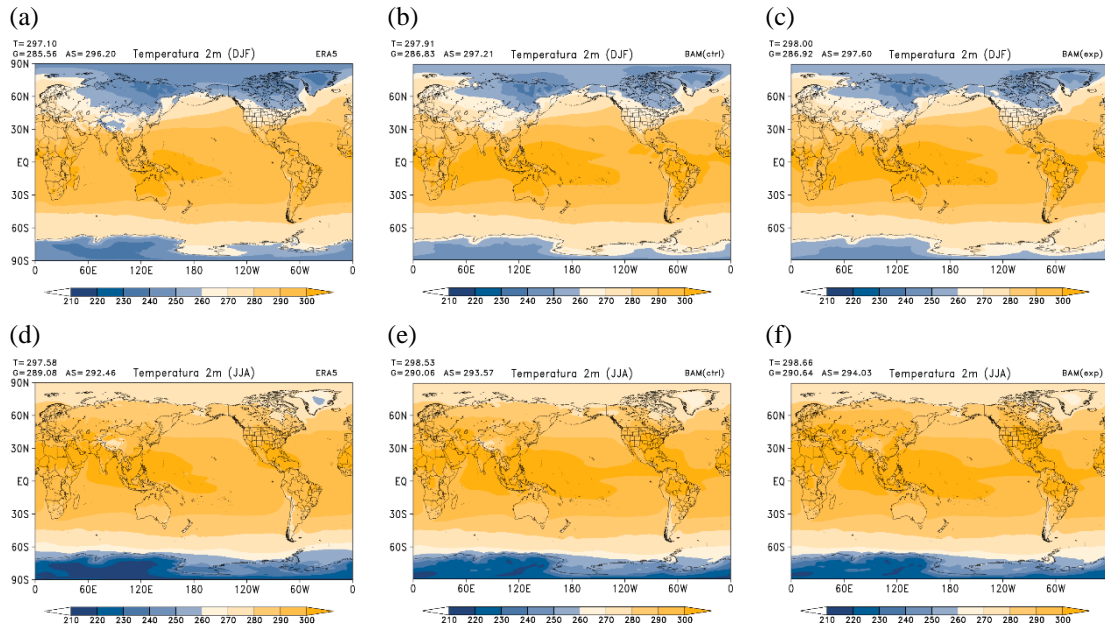
### 6.3.2 Temperatura à 2 metros

O impacto das simulações com as duas parametrizações de fração de nuvens (BAM\_ctl e BAM\_exp) são apresentadas na Figura 6.9, que mostra os mapas globais climatológicos da temperatura do ar à 2 metros da superfície para os períodos de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) e inverno (junho, julho e agosto) austral. Os gráficos são provenientes dos dados do ERA5 (Figuras 6.9a e 6.9d), simulação com BAM\_ctl (Figuras 6.9b e 6.9e) e simulação com o BAM\_exp (Figuras 6.9c e 6.9f).

O impacto das parametrizações de fração de nuvens nos resultados da temperatura do ar à 2 metros para os períodos (DJF e JJA), obtidas através das simulações dos experimentos BAM\_ctl e BAM\_exp apresentam intensidades semelhantes e são espacialmente muito similares. Entretanto, verifica-se que ambas as simulações (BAM\_ctl e BAM\_exp) possuem uma intensidade maior em relação ao dado de referência do ERA5 (Figuras 6.9a e 6.9d), principalmente na região tropical. Os mapas de temperatura mostram um comportamento relativamente simétrico na direção zonal e um gradiente de temperatura mais forte na direção meridional. Isto deve-se a distribuição diferenciada de radiação solar incidente na direção Norte-Sul, como no caso da região tropical/equatorial que recebe a maior parte de radiação solar ao longo do ano, a temperatura climatológica é em torno de 300K, enquanto que na direção de latitudes médias e altas os valores de temperatura vão diminuindo, devido essas regiões receber menos quantidade radiação solar.

Todos esses padrões descritos acima foram observados nos dados de referência do ERA5 e nas duas simulações do modelo BAM utilizando a parametrização de fração de nuvem controle e a nova parametrização.

Figura 6.9 - Climatologia da temperatura do ar a 2 metros ERA5 e BAM.



A primeira linha do painel é a climatologia de temperatura do ar a 2 metros para o período do verão austral (dezembro, janeiro e fevereiro) e a segunda linha para o inverno austral (junho, julho e agosto). A primeira coluna são os dados de referência (ERA5), segunda coluna é a simulação do BAM utilizando a parametrização de fração de nuvem controle (BAM\_ctl) e a terceira coluna utilizando a nova parametrização de fração de nuvem (BAM\_exp). T é a média da região tropical (antes 30°S e 30°N), G é a média para o globo e AS é a média para a região da América do Sul (sem considerar os oceanos adjacentes).

Fonte: Produção do autor.

Uma análise estatística mais detalhada da temperatura do ar à 2 metros referente ao período de verão austral (DJF) é apresentada na Figura 6.10, onde são plotadas as métricas estatísticas que são calculadas entre as simulações com o modelo BAM e os dados de referência do ERA5.

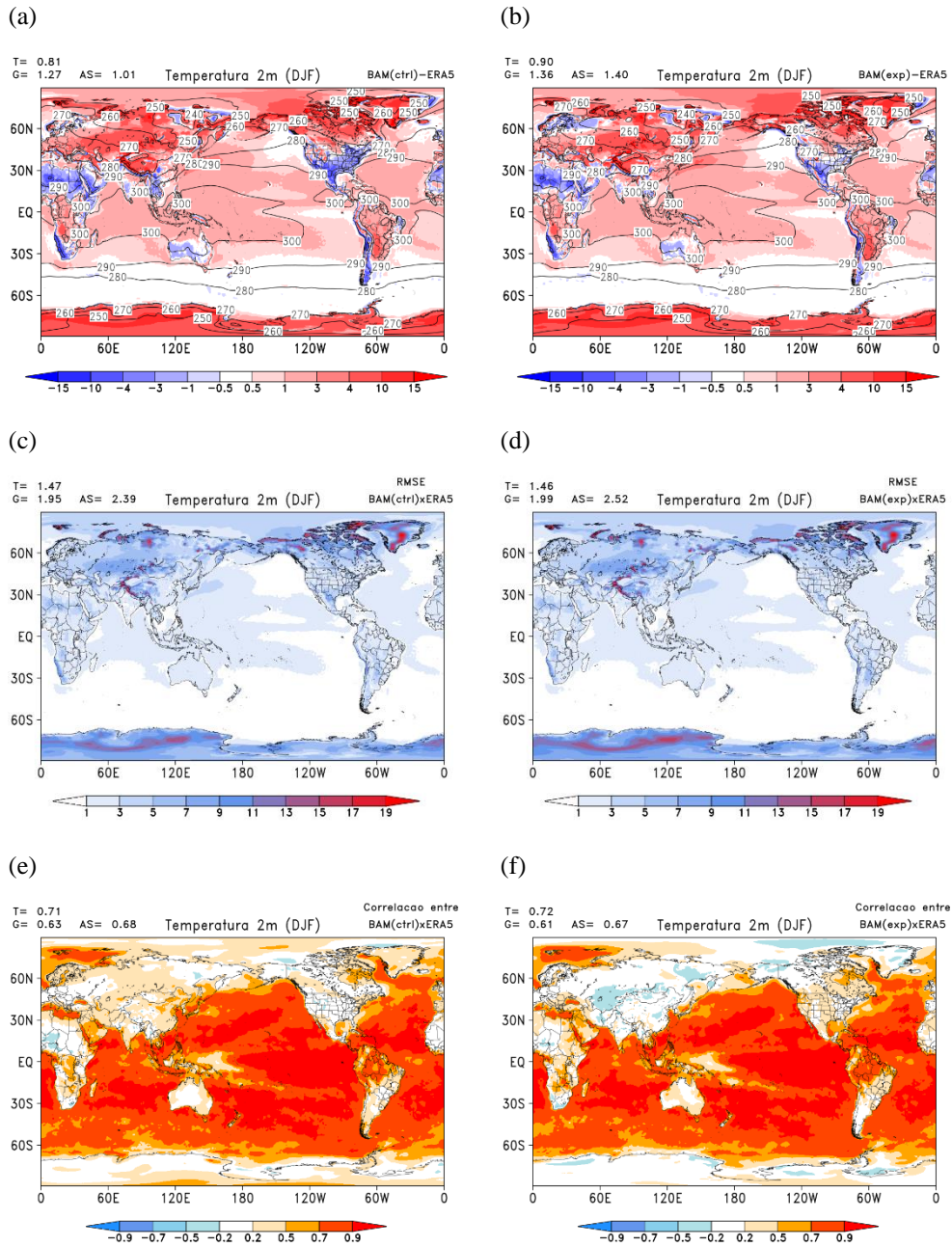
Os campos de BIAS das duas simulações (BAM\_ctl e BAM\_exp) realizadas com o modelo BAM em relação ao dado de referência do ERA5, mostram similaridade entre si. No verão austral (Figuras 6.10a e 6.10b) são observados maiores valores de BIAS nas regiões continentais do Hemisfério Norte e na região do Polo Sul. Estas superestimativas e subestimativas dos valores de temperatura do ar à 2 metros está relacionado a variabilidade do posicionamento dos sistemas climáticos ao longo de 30 anos em relação ao dado de referência sobre estas regiões. Verifica-se também um BIAS negativo nas regiões desérticas do planeta, indicando uma subestimativa de temperatura do ar à 2 metros nessas regiões, provavelmente relacionado ao déficit de umidade nestas regiões. Na região oceânica tropical, o BIAS fica entre 0.5K e 1K, o que era esperado devido a

utilização de temperatura da superfície do mar (TSM) prescrita (observada) como condição de contorno nos experimentos de simulação climática (BAM\_ctl e BAM\_exp).

Analisando o campo de RMSE da temperatura do ar à 2 metros nas duas simulações (BAM\_ctl e BAM\_exp), verifica-se que são similares entre a simulação BAM\_ctl (Fig. 6.10c) e BAM\_exp (Fig. 6.10d). O erro absoluto médio entre as simulações e o dado de referência ficam em torno de 1K na região oceânica tropical, em torno de até 3k sobre os continentes do Hemisfério Sul e chegando até 19K em partes dos continentes Asiático, América do Norte, Groelândia e Antártida. Entretanto, os maiores erros encontram-se na Antártida, Groelândia e na Cordilheira do Himalaia. Estes resultados podem estar relacionados a cobertura de gelo permanente que influencia os fluxos de radiação, calor sensível e latente, levando a introdução de erros na estimativa de temperatura do ar à 2 metros. Também é importante mencionar que nas simulações com o BAM o fluxo de radiação solar incidente à superfície é maior do que nos dados do CERES, o que pode causar parte da superestimativa de temperatura do ar a 2 metros.

Os campos de correlação entre as duas simulações (BAM\_ctl e BAM\_exp) e o dado do ERA5 mostram altos valores sobre as regiões oceânicas de todo o globo. Isto ocorre devido a temperatura da superfície do mar utilizada como condição de contorno inferior nas simulações com os BAM ser prescrita (observado) nas simulações dos experimentos (BAM\_ctl e BAM\_exp) usando diferentes parametrizações de fração de nuvem. Sendo importante mencionar que há melhora na correlação entre os dados de referência do ERA5 e a simulação com o BAM\_exp sobre o leste do continente africano, sobre os Estados Unidos da América e sobre a região Amazônica.

Figura 6.10 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação da climatologia de temperatura a 2 metros para o verão austral.



Bias para a simulação controle (a) e experimento (b), RMSE para a simulação controle (c) e experimento (d) e correlação para a simulação controle (e) e experimento (f). T é a média da região tropical (antes 30°S e 30°N), G é a média para o globo e AS é a média para a região da América do Sul (sem considerar os oceanos adjacentes).

Fonte: Produção do autor.

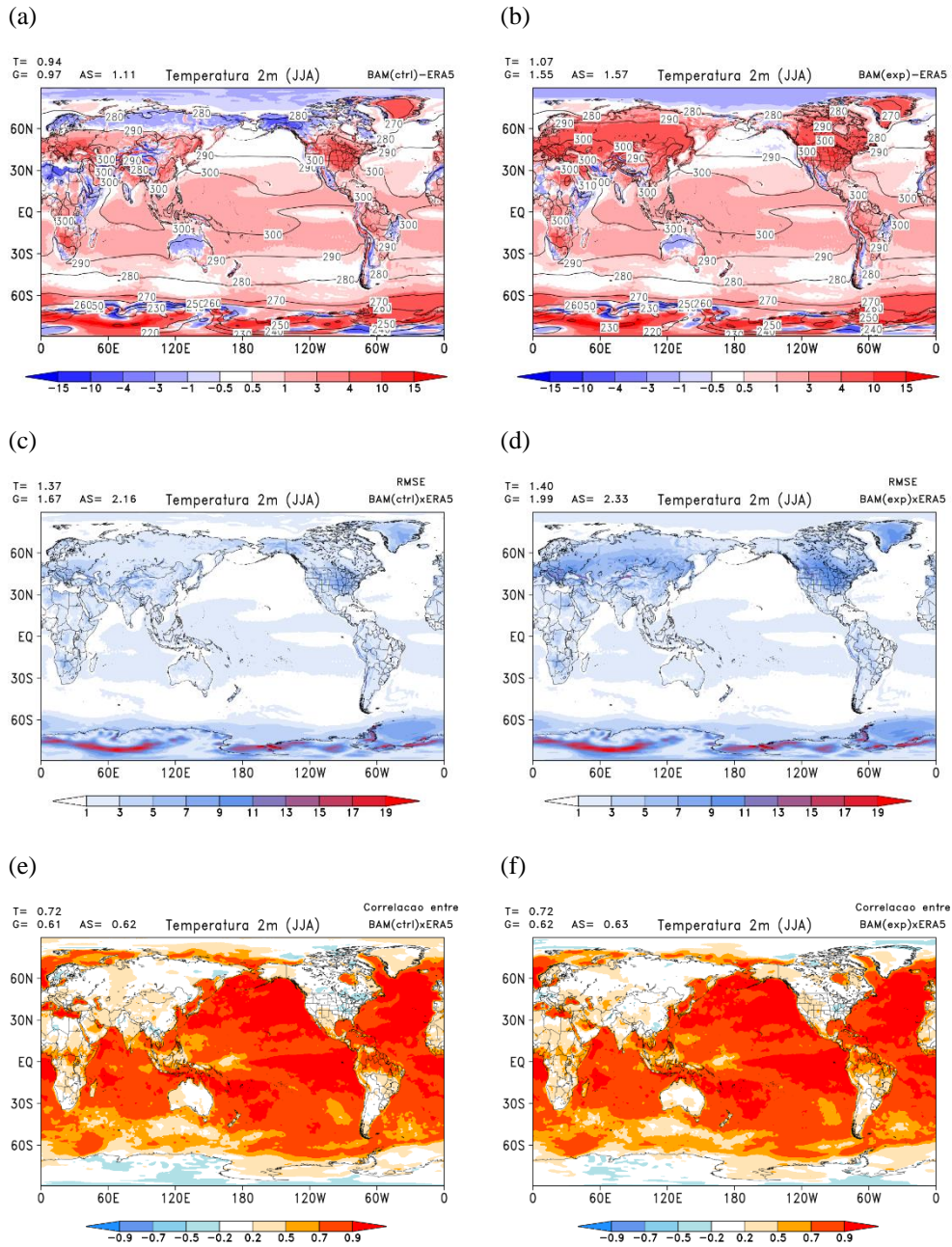
Para o período JJA a Figura 6.11 mostra o BIAS, RMSE e coeficiente de correlação entre as simulações com o BAM e os dados do ERA5 para a climatologia de temperatura do ar à 2 metros no período de inverno austral.

No inverno austral (JJA), os campos de BIAS das simulações com o modelo BAM mostram uma superestimativa da temperatura do ar à 2 metros na América do Sul e parte do continente africano e subestimativa na Oceania. Porém, os campos de BIAS das simulações em relação ao dado do ERA5 não mostram diferenças acentuadas entre as duas simulações (BAM\_ctl e BAM\_exp), na região tropical. As diferenças mais acentuadas são encontradas na Ásia e América do Norte, que mostram uma superestimativa maior na simulação BAM\_exp. Essa superestimativa do BAM\_exp também é notada no campo do RMSE (Fig. 6.11d). Estes resultados são em função da subestimativa de fração de nuvens nestas regiões.

Os mapas de correlação do BAM\_exp comparado com o BAM\_ctl mostram valores mais altos no leste dos Estados Unidos e no Sul e Norte da África. Sobre todas as regiões oceânicas os valores de correlação são altos, mas como mencionado anteriormente, isso deve-se a utilização da temperatura da superfície do mar prescrita como condição de contorno na simulação climática.



Figura 6.11 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação da climatologia de temperatura a 2 metros para o inverno austral.



Bias para a simulação controle (a) e experimento (b), RMSE para a simulação controle (c) e experimento (d) e correlação para a simulação controle (e) e experimento (f). T é a média da região tropical (antes 30°S e 30°N), G é a média para o globo e AS é a média para a região da América do Sul (sem considerar os oceanos adjacentes).

Fonte: Produção do autor.



## 6.4 Conclusão

O objetivo principal desse Capítulo foi avaliar o desempenho da nova parametrização de fração de nuvem em um modelo atmosférico global em simulação climática, nesse caso foi utilizado Modelo Atmosférico Global Brasileiro na versão 2.2.1 (BAM-2.2.1). Portanto, foram analisados os campos de nebulosidade, fluxos de radiação de onda longa e onda curta na superfície e no topo da atmosfera, precipitação e temperatura do ar à 2 metros. Os dados de referência utilizados foram provenientes de satélites, observações e reanálises (CERES, GPCP e ERA5).

O Capítulo foi dividido em três partes: (i) avaliar a representação da nebulosidade, (ii) avaliar o impacto da nebulosidade nos fluxos de radiação na superfície e topo da atmosfera e (iii) avaliar o impacto da nebulosidade na precipitação e temperatura do ar à 2 metros.

O campo de nebulosidade simulado com o BAM utilizando a nova parametrização de fração de nuvens mostrou um padrão mais próximo ao dado de referência do CERES, assim como as médias global, tropical e do continente Sul Americano. Esse resultado indica o bom desempenho da parametrização de nuvens proposta nesse trabalho, uma vez que mostrou uma melhora na representação da nebulosidade em simulação climática quando comparada a utilização da parametrização de fração de nuvem controle que é atualmente utilizada no modelo BAM.

Os fluxos de radiação de onda longa e onda curta incidente à superfície terrestre simulados com o BAM utilizando as duas parametrizações de fração de nuvens (BAM\_ctl e BAM\_exp) foram simulados satisfatoriamente. No entanto, na simulação com o BAM\_exp nota-se uma superestimativa, pelo campo de BIAS e RMSE, do fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície, indicando uma atmosfera mais transparente em relação a atmosfera da simulação com o BAM\_ctl. No caso do fluxo de radiação de onda longa, tanto o padrão da distribuição espacial, quanto as médias global, tropical e da América do Sul não mostram grande diferença da simulação com o BAM\_ctl. Os campos de correlação tanto para OCIS quanto para OLIS indicam que essas variáveis simuladas com o BAM\_exp estão melhor correlacionadas com o CERES.

A avaliação dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa no topo da atmosfera foi realizado em função da forçante radiativa das nuvens. Em geral, as simulações com o

BAM representaram bem os padrões de ROCE e ROLE quando comparado aos dados de referência. No entanto, no BAM o efeito das nuvens nos fluxos de radiação é menor, indicando uma atmosfera mais transparente à radiação.

Nos campos de precipitação das simulações do BAM\_ctl e BAM\_exp observa-se, sem diferenças significativas entre as simulações, a representação adequada dos principais sistemas precipitantes dos períodos de verão e inverno austral distribuídos no globo, apesar de mostrar uma superestimativa quando comparado ao dado do GPCP. O campo de temperatura do ar à 2 metros também foi simulado adequadamente com o BAM utilizando a nova parametrização de fração de nuvens e utilizando a parametrização controle. Os campos não mostram diferenças importantes quando compara as duas simulações com os dados de referência do ERA5

De forma geral, os resultados desse Capítulo indicam que a nova parametrização de fração de nuvens apresentou um bom desempenho quando implementada no modelo BAM, principalmente na representação do campo de nebulosidade. As demais variáveis analisadas também tiveram um comportamento consistente com os dados de referência com a utilização da nova parametrização, indicando que o campo de nebulosidade gerado por ela e que interage com o esquema de radiação tende a contribuir para melhores resultados em simulações climáticas globais.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 Considerações finais

Esta tese teve como objetivo principal estudar e entender a interação entre as variáveis dinâmicas, termodinâmicas e radiativas com a nebulosidade, visando o desenvolvimento de uma parametrização de fração de nuvem para melhor representar a nebulosidade e sua interação com outras variáveis em um modelo atmosférico global.

Para isso foram apresentadas três seções de resultados. Na primeira Seção, foi utilizado dados observacionais da campanha de campo do GoAmazon 2014/15 e adicionalmente modelagem numérica de alta resolução (CRM-SAM), com o objetivo de entender as relações entre a nuvem-radiação, variáveis de larga escala (temperatura, omega e umidade relativa) e conteúdo de água líquida e gelo para o desenvolvimento de uma parametrização de fração de nuvem. Na segunda Seção, foi desenvolvida uma nova parametrização de fração de nuvem baseada nas relações entre as anomalias das variáveis de larga escala e conteúdo de água líquida e gelo com a fração de nuvem encontradas na primeira Seção de resultados. Esta parametrização foi testada e avaliada em um modelo simplificado de interação nuvem-radiação (CFRM) para várias regiões do planeta (Amazona, Darwin, Manus, Nauru e porção Leste do Oceano Pacífico Tropical) sob diferentes condições atmosféricas (período úmido, período seco, condições de El Niño e La Niña). Por fim, na terceira e última Seção de resultados, a nova parametrização foi implementada e testada em um modelo atmosférico global (BAM). Foi avaliada a representação da nebulosidade em simulação climática, bem como o seu impacto nos fluxos de radiação de onda curta e onda longa na superfície e no topo da atmosfera, na climatologia de precipitação e na temperatura do ar a 2 metros da superfície.

As análises dos resultados na primeira parte do trabalho forneceram uma base para concluir algumas ideias sobre as questões científicas levantadas neste trabalho. Por exemplo: (1) **Qual a real sensibilidade da fração de nuvens a variação das variáveis ambientais?** Neste caso, as análises indicam como ocorrem os impactos das variáveis ambientais e fração de nuvens nos fluxos de radiação devido aos diferentes tipos de nuvens, este comportamento foi verificado nos dados observados e nas simulações com o SAM. As anomalias, em relação à média do dia anterior, das variáveis de larga escala, se mostraram variáveis importantes na compreensão e definição da formação, evolução e

dissipação da nebulosidade. Pois estas anomalias, são produzidas pelos processos físicos relacionados a diferentes tipos de nuvens formadas a partir dos processos físicos relacionadas a convecção profunda, convecção rasa, inversão de temperatura nas camadas atmosféricas, supersaturação, processos de instabilidade turbulenta, etc., produzem as mudanças nas condições ambientais da atmosfera. (2) **Qual a influência da distribuição vertical de fração de nuvens nos campos radiativos da atmosfera?** A estimativa da distribuição da fração de nuvens é importante para modular os fluxos radiativos da atmosfera, entretanto, principalmente para a radiação de onda longa a distribuição de fração de nuvens não mostra grande influência nos fluxos de radiação de onda longa próximos a superfícies. Isto é atribuído ao fato que as camadas da atmosfera mais próximas à superfície são responsáveis pela maior parte dos fluxos de radiação de onda longa emitidos para a superfície, as emissões de fluxo de radiação de onda longa das camadas atmosféricas mais acima podem não atingir a superfície dependendo das camadas atmosféricas mais abaixo. (3) **Qual o melhor método para estimar a fração de nuvens (uso de CRMs ou parametrização)?** A utilização de CRMs para estimar a fração de nuvens mostrou-se eficaz, entretanto, existe um custo computacional alto. Os resultados mostram que a parametrização de nuvens baseada nas anomalias de variáveis de larga escala (ômega, temperatura e umidade relativa) e da função de distribuição de probabilidade para a concentração de água líquida e gelo pode fornecer uma estimativa razoável de fração de nuvens. Assim, conclui-se que, as anomalias destas variáveis sejam importantes e podem ser utilizadas na estimativa da fração de nuvem em modelos atmosféricos de tempo e clima.

Através do desenvolvimento de uma parametrização de nuvens baseado nas anomalias de (ômega, temperatura e umidade relativa) e da função de distribuição de probabilidade para a concentração de água líquida e gelo pode-se analisar na segunda parte do trabalho a influência da nebulosidade nos fluxos de radiação de onda longa e onda curta incidente à superfície terrestre, bem como as taxas de aquecimento e resfriamento da atmosfera. Portanto, sobre a questão: (2) **Qual a influência da distribuição vertical de fração de nuvens nos campos radiativos da atmosfera?** Os resultados mostraram que a nova parametrização de fração de nuvem simulou com acurácia o efeito da nebulosidade nos fluxos de radiação de onda longa e onda curta incidente à superfície terrestre, bem como as taxas de aquecimento e resfriamento da atmosfera. Outro resultado importante

da nova parametrização é com relação ao uso de diferentes forçantes (ER5 e SAM), verificou-se que utilizando os dados do ERA5 como forçantes os resultados da nova parametrização se aproximam mais do SAM e não da referência do ERA5. Isto indica a robustez da nova parametrização. Outra dúvida que tínhamos no início do trabalho relacionado à questão: (4) **Qual o comportamento da fração de nuvens em diferentes regiões do planeta (continente e oceano)?** Esta nova parametrização também se mostrou sensível a diferentes condições atmosféricas, em diferentes regiões do planeta, como no caso da consistência em simular o comportamento nebulosidade e o impacto nos fluxos de radiação nos períodos úmido e seco da região amazônica e em Darwin (TWP) e nos períodos de El Niño e La Niña nas regiões oceânica de Nauru e Manus.

Para compreender as dúvidas sobre a questão: (5) **Como diferentes formas de parametrizar a fração de nuvens impactam nas simulações climáticas?** Na terceira parte dos resultados mostrou uma melhora significativa na simulação climática, do campo de nebulosidade, do Modelo Atmosférico Global Brasileiro (BAM) utilizando a nova parametrização de fração de nuvem desenvolvida neste trabalho. Os fluxos de radiação simulados com o BAM utilizando a parametrização controle e a nova parametrização mostram consistência quando comparado com os dados do CERES. Entretanto, a simulação com a nova parametrização indica uma atmosfera com menor fração de nuvens e mais transparente à radiação. O motivo desse comportamento está associado ao fato de a nova parametrização gerar o campo de nebulosidade com variação na vertical, enquanto que a parametrização controle geram o campo de nebulosidade homogêneo nas camadas atmosféricas e mesmo superestimando a fração de nuvem, apresenta uma atmosfera muito transparente para o fluxo de radiação de onda curta. Os campos climatológicos de precipitação e de temperatura do ar a 2 metros também foram simulados com consistência com o BAM utilizando a nova parametrização de fração de nuvem.

De forma geral, as relações encontradas entre as variáveis ambientais e a fração de nuvem foram de grande importância no desenvolvimento da nova parametrização de fração de nuvem. Os testes dessa nova parametrização mostraram resultados consistentes com dados de referência. Apesar da simulação do BAM com a nova parametrização mostrar bons resultados, outros fatores que produzem erros, como os esquemas de superfície, camada limite, microfísica e radiação, precisam ser levados em consideração para uma melhor representação dos fluxos de radiação, precipitação e temperatura do ar.

Para compreender os mecanismos de retroalimentação de nuvens seriam necessários diferentes tipos de experimentos numéricos, portanto, as questões relacionadas à pergunta: (6) **Quais são os mecanismos de retroalimentação mais importantes nas simulações climáticas?** Continuam em aberto como sugestão para trabalhos futuros.

## **7.2 Sugestões para trabalhos futuros**

- Sobre as simplificações associadas a profundidade óptica dos aerossóis, sugere-se que estudos futuros avaliem os efeitos dos aerossóis sobre os fluxos radiativos, mais especificamente nos campos sazonais. Adicionalmente, analisar sobre as regiões onde ocorre maiores emissões.
- Estudar os mecanismos de retroalimentação em simulações climáticas, mais especificamente, relacionado as nuvens.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER, R. F.; HUFFMAN, G. J.; CHANG, A.; FERRARO, R.; XIE, P.-P.; JANOWIAK, J.; RUDOLF, B.; SCHNEIDER, U.; CURTIS, S.; BOLVIN, D.; GRUBER, A.; SUSSKIND, J.; ARKIN, P.; NELKIN, E. The version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–Present). **Journal of Hydrometeorology**, v. 4, n. 6, p. 1147–1167, dez. 2003.
- AGUIRRE, C.; FLORES-AQUEVEQUE, V.; VILCHES, P.; VÁSQUEZ, A.; RUTLLANT, J. A.; GARREAUD, R. Recent changes in the low-level jet along the subtropical west coast of South America. **Atmosphere**, v. 12, n. 4, p. 465, abr. 2021.
- ALLAN, R. P. Combining satellite data and models to estimate cloud radiative effect at the surface and in the atmosphere. **Meteorological Applications**, v. 18, n. 3, p. 324–333, set. 2011.
- BAYR, T.; LATIF, M.; DOMMENGET, D.; WENGEL, C.; HARLASS, J.; PARK, W. Mean-state dependence of ENSO atmospheric feedbacks in climate models. **Climate Dynamics**, v. 50, n. 9–10, p. 3171–3194, maio 2018.
- BENGTSSON, L.; HODGES, K. I.; ROECKNER, E. Storm tracks and climate change. **Journal of Climate**, v. 19, n. 15, p. 3518–3543, ago. 2006.
- BJERKNES, J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. **Monthly Weather Review**, v. 97, n. 3, p. 163–172, mar. 1969.
- BLOSSEY, P. N.; BRETHERTON, C. S.; CETRONE, J.; KHAROUTDINOV, M. Cloud-resolving model simulations of KWAJEX: model sensitivities and comparisons with satellite and radar observations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 64, n. 5, p. 1488–1508, maio 2007.
- BODAS-SALCEDO, A.; WILLIAMS, K. D.; RINGER, M. A.; BEAU, I.; COLE, J. N. S.; DUFRESNE, J.-L.; KOSHIRO, T.; STEVENS, B.; WANG, Z.; YOKOHATA, T. Origins of the solar radiation biases over the southern Ocean in CFMIP2 Models. **Journal of Climate**, v. 27, n. 1, p. 41–56, jan. 2014.
- BONY, S.; COLMAN, R.; KATTSOV, V. M.; ALLAN, R. P.; BRETHERTON, C. S.; DUFRESNE, J.-L.; HALL, A.; HALLEGATTE, S.; HOLLAND, M. M.; INGRAM, W.; RANDALL, D. A.; SODEN, B. J.; TSELIODIS, G.; WEBB, M. J. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? **Journal of Climate**, v. 19, n. 15, p. 3445–3482, ago. 2006.
- BONY, S.; STEVENS, B.; FRIERSON, D. M. W.; JAKOB, C.; KAGEYAMA, M.; PINCUS, R.; SHEPHERD, T. G.; SHERWOOD, S. C.; SIEBESMA, A. P.; SOBEL, A. H.; WATANABE, M.; WEBB, M. J. Clouds, circulation and climate sensitivity. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 4, p. 261–268, abr. 2015.

BRETHERTON, C. S. Insights into low-latitude cloud feedbacks from high-resolution models. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 373, n. 2054, p. 20140415, nov. 2015.

BRETHERTON, C. S.; BLOSSEY, P. N. Understanding mesoscale aggregation of shallow cumulus convection using large-eddy simulation. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 9, n. 8, p. 2798–2821, dez. 2017.

BRETHERTON, C. S.; PARK, S. A new moist turbulence parameterization in the community atmosphere model. **Journal of Climate**, v. 22, n. 12, p. 3422–3448, jun. 2009.

BRIENT, F.; BONY, S. Interpretation of the positive low-cloud feedback predicted by a climate model under global warming. **Climate Dynamics**, v. 40, n. 9–10, p. 2415–2431, maio 2013.

BURLEYSON, C. D.; LONG, C. N.; COMSTOCK, J. M. Quantifying diurnal cloud radiative effects by cloud type in the tropical western pacific. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 54, n. 6, p. 1297–1312, jun. 2015.

BYRNE, B.; GOLDBLATT, C. Radiative forcing at high concentrations of well-mixed greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 1, p. 152–160, jan. 2014.

CALISTO, M.; FOLINI, D.; WILD, M.; BENGTSSON, L. Cloud radiative forcing intercomparison between fully coupled CMIP5 models and CERES satellite data. **Annales Geophysicae**, v. 32, n. 7, p. 793–807, jul. 2014.

CARNEIRO, R. G.; FISCH, G. Observational analysis of the daily cycle of the planetary boundary layer in the central Amazon during a non-El Niño year and El Niño year (GoAmazon project 2014/5). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 20, n. 9, p. 5547–5558, 12 maio 2020. CEPP, P.; BRIENT, F.; ZELINKA, M. D.; HARTMANN, D. L. Cloud feedback mechanisms and their representation in global climate models. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 8, n. 4, p. e465, jul. 2017.

CESS, R. D.; POTTER, G. L.; BLANCHET, J. P.; BOER, G. J.; DEL GENIO, A. D.; DÉQUÉ, M.; DYMNIKOV, V.; GALIN, V.; GATES, W. L.; GHAN, S. J.; KIEHL, J. T.; LACIS, A. A.; LE TREUT, H.; LI, Z.-X.; LIANG, X.-Z.; MCAVANEY, B. J.; MELESHKO, V. P.; MITCHELL, J. F. B.; MORCRETE, J.-J.; RANDALL, D. A.; RIKUS, L.; ROECKNER, E.; ROYER, J. F.; SCHLESE, U.; SHEININ, D. A.; SLINGO, A.; SOKOLOV, A. P.; TAYLOR, K. E.; WASHINGTON, W. M.; WETHERALD, R. T.; YAGAI, I.; ZHANG, M.-H. Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D10, e 16601, 1990.

CHAMECKI, M.; FREIRE, L. S.; DIAS, N. L.; CHEN, B.; DIAS-JUNIOR, C. Q.; TOLEDO MACHADO, L. A.; SÖRGEL, M.; TSOKANKUNKU, A.; ARAÚJO, A. C. DE. Effects of vegetation and topography on the boundary layer structure above the Amazon forest. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 77, n. 8, p. 2941–2957, ago. 2020.



CHEN, T.; ROSSOW, W. B.; ZHANG, Y. Radiative effects of cloud-type variations. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 264–286, jan. 2000.

CHOU, M.-D.; SUAREZ, M. J. **A solar radiation parameterization for atmospheric studies**. [S.l.: s.n.], 1999.

CHOU, M.-D.; SUAREZ, M. J.; LIANG, X.-Z.; YAN, M. M.-H. **Technical report series on global modeling and data assimilation**. 2001. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/citations/20010072848>>.

CIESIELSKI, P. E.; JOHNSON, R. H.; JIANG, X.; ZHANG, Y.; XIE, S. Relationships between radiation, clouds, and convection during DYNAMO. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 5, p. 2529–2548, mar. 2017.

COELHO, C. A. S.; DE SOUZA, D. C.; KUBOTA, P. Y.; COSTA, S. M. S.; MENEZES, L.; GUIMARÃES, B. S.; FIGUEROA, S. N.; BONATTI, J. P.; CAVALCANTI, I. F. A.; SAMPAIO, G.; KLINGAMAN, N. P.; BAKER, J. C. A. Evaluation of climate simulations produced with the Brazilian global atmospheric model version 1.2. **Climate Dynamics**, v. 56, n. 3–4, p. 873–898, fev. 2021.

COLLINS, W. D.; RASCH, P. J.; BOVILLE, B. A.; HACK, J. J.; MCCA, J. R.; WILLIAMSON, D. L.; BRIEGLEB, B. P.; BITZ, C. M.; LIN, S.-J.; ZHANG, M. The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3). **Journal of Climate**, v. 19, n. 11, p. 2144–2161, jun. 2006.

DEL GENIO, A. D. Representing the sensitivity of convective cloud systems to tropospheric humidity in general circulation models. **Surveys in Geophysics**, v. 33, n. 3–4, p. 637–656, jul. 2012.

DIAS-JUNIOR, C. Q.; MARQUES FILHO, E. P.; SÁ, L. D. A. A large eddy simulation model applied to analyze the turbulent flow above Amazon forest. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 147, p. 143–153, dez. 2015.

DÜRR, B. Automatic cloud amount detection by surface longwave downward radiation measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. D5, e D05201, 2004.

FENG, Z.; HAGOS, S.; ROWE, A. K.; BURLEYSON, C. D.; MARTINI, M. N.; SZOEKE, S. P. Mechanisms of convective cloud organization by cold pools over tropical warm ocean during the <scp>AMIE/DYNAMO</scp> field campaign. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 7, n. 2, p. 357–381, jun. 2015.

FENG, Z.; MCFARLANE, S. A.; SCHUMACHER, C.; ELLIS, S.; COMSTOCK, J.; BHARADWAJ, N. Constructing a merged cloud–precipitation radar dataset for tropical convective clouds during the DYNAMO/AMIE experiment at Addu Atoll. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 31, n. 5, p. 1021–1042, maio 2014.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 28, n. 2, p. 101–101, jun. 1998.

FLIEGEL, J. M.; SCHUMACHER, C. **Quality control and census of SMART-R**

**observations from the DYNAMO/CINCY2011 field campaign.** 2012. 84 p. Tese (Doutorado) - Texas A&M University, 2012.

FRASSONI, A.; CASTILHO, D.; RIXEN, M.; RAMIREZ, E.; DE MATTOS, J. G. Z.; KUBOTA, P.; PEIXOTO CALHEIROS, A. J.; REED, K. A.; DA SILVA DIAS, M. A. F.; DA SILVA DIAS, P. L.; DE CAMPOS VELHO, H. F.; DE ROODE, S. R.; DOBLAS-REYES, F.; EIRAS, D.; EK, M.; FIGUEROA, S. N.; FORBES, R.; FREITAS, S. R.; GRELL, G. A.; HERDIES, D. L.; LAURITZEN, P. H.; MACHADO, L. A. T.; MANZI, A. O.; MARTINS, G.; OLIVEIRA, G. S.; ROSÁRIO, N. E.; SALES, D. C.; WEDI, N.; YAMADA, B. Building the next generation of climate modelers: scale-aware physics parameterization and the “Grey Zone” challenge. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 99, n. 11, p. ES185–ES189, nov. 2018.

GEOFFROY, O.; SHERWOOD, S. C.; FUCHS, D. On the role of the stratiform cloud scheme in the inter-model spread of cloud feedback. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 9, n. 1, p. 423–437, mar. 2017.

GIANGRANDE, S. E.; FENG, Z.; JENSEN, M. P.; COMSTOCK, J. M.; JOHNSON, K. L.; TOTO, T.; WANG, M.; BURLEYSON, C.; BHARADWAJ, N.; MEI, F.; MACHADO, L. A. T.; MANZI, A. O.; XIE, S.; TANG, S.; ASSUNCAO SILVA DIAS, M. F.; DE SOUZA, R. A. F.; SCHUMACHER, C.; MARTIN, S. T. Cloud characteristics, thermodynamic controls and radiative impacts during the Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon (GoAmazon2014/5) experiment. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, n. 23, p. 14519–14541, 2017.

GUICHARD, F.; COUVREUX, F. A short review of numerical cloud-resolving models. **Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 69, n. 1, p. 1–36, 2017.

GUICHARD, F.; PETCH, J. C.; REDELSPERGER, J.-L.; BECHTOLD, P.; CHABOUREAU, J.-P.; CHEINET, S.; GRABOWSKI, W.; GRENIER, H.; JONES, C. G.; KÖHLER, M.; PIRIOU, J.-M.; TAILLEUX, R.; TOMASINI, M. Modelling the diurnal cycle of deep precipitating convection over land with cloud-resolving models and single-column models. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 130, n. 604, p. 3139–3172, out. 2004.

HAGOS, S. M.; ZHANG, C.; FENG, Z.; BURLEYSON, C. D.; DE MOTT, C.; KERNS, B.; BENEDICT, J. J.; MARTINI, M. N. The impact of the diurnal cycle on the propagation of oscillation convection across the continent. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 8, n. 4, p. 1552–1564, dez. 2016.

HAN, J.; PAN, H.-L. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP global forecast system. **Weather and Forecasting**, v. 26, n. 4, p. 520–533, ago. 2011.

HARROP, B. E.; HARTMANN, D. L. The role of cloud radiative heating within the atmosphere on the high cloud amount and top-of-atmosphere cloud radiative effect. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 8, n. 3, p. 1391–1410, set. 2016.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; ABDALLA, S.; ABELLAN, X.; BALSAMO, G.; BECHTOLD, P.; BIAVATI, G.; BIDLOT, J.; BONAVITA, M.; CHIARA, G.; DAHLGREN, P.; DEE, D.; DIAMANTAKIS, M.; DRAGANI, R.; FLEMMING, J.; FORBES, R.; FUENTES, M.; GEER, A.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S.; HOGAN, R. J.; HÓLM, E.; JANISKOVÁ, M.; KEELEY, S.; LALOYAUX, P.; LOPEZ, P.; LUPU, C.; RADNOTI, G.; ROSNAY, P.; ROZUM, I.; VAMBORG, F.; VILLAUME, S.; THÉPAUT, J. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, jul. 2020.

HOSSEIN MARDI, A.; DADASHAZAR, H.; MACDONALD, A. B.; CROSBIE, E.; COGGON, M. M.; AZADI AGHDAM, M.; WOODS, R. K.; JONSSON, H. H.; FLAGAN, R. C.; SEINFELD, J. H.; SOROOSHIAN, A. Effects of biomass burning on stratocumulus droplet characteristics, drizzle rate, and composition. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 22, p. 12301–12318, nov. 2019.

IACONO, M. J. **Application of improved radiation modeling to general circulation models**. [S.l.: s.n.], 2011.

IACONO, M. J.; DELAMERE, J. S.; MLAWER, E. J.; SHEPHARD, M. W.; CLOUGH, S. A.; COLLINS, W. D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. D13, e D13103, jul. 2008.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Summary for policymakers. In: \_\_\_\_\_ (Ed.). **Climate change 2013 - the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 1–30.

JAHANGIR, E.; LIBOIS, Q.; COUVREUX, F.; VIÉ, B.; SAINT-MARTIN, D. Uncertainty of SW cloud radiative effect in atmospheric models due to the parameterization of liquid cloud optical properties. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 13, n. 12, dez. 2021.

JEEVANJEE, N.; HASSANZADEH, P.; HILL, S.; SHESHADRI, A. A perspective on climate model hierarchies. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 9, n. 4, p. 1760–1771, ago. 2017.

KANG, H.; CHOI, Y.-S.; HWANG, J.; KIM, H.-S. On the cloud radiative effect for tropical high clouds overlying low clouds. **Geoscience Letters**, v. 7, n. 1, p. 7, dez. 2020.

KHAIN, A. P.; BEHENG, K. D.; HEYMSFIELD, A.; KOROLEV, A.; KRICHAK, S. O.; LEVIN, Z.; PINSKY, M.; PHILLIPS, V.; PRABHAKARAN, T.; TELLER, A.; VAN DEN HEEVER, S. C.; YANO, J.-I. Representation of microphysical processes in cloud-resolving models: spectral (bin) microphysics versus bulk parameterization. **Reviews of Geophysics**, v. 53, n. 2, p. 247–322, jun. 2015.

KHAIROUTDINOV, M. F.; RANDALL, D. A. A cloud resolving model as a cloud

parameterization in the NCAR Community Climate System Model: preliminary results. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 18, p. 3617–3620, set. 2001.

KHAIROUTDINOV, M. F.; RANDALL, D. A. Similarity of deep continental cumulus convection as revealed by a three-dimensional cloud-resolving Model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 59, n. 17, p. 2550–2566, set. 2002.

KHAIROUTDINOV, M. F.; RANDALL, D. A. Cloud resolving modeling of the ARM summer 1997 IOP: model formulation, results, uncertainties, and sensitivities. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 60, n. 4, p. 607–625, fev. 2003.

KHAIROUTDINOV, M.; RANDALL, D. High-resolution simulation of shallow-to-deep convection transition over land. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 63, n. 12, p. 3421–3436, dez. 2006.

KINNE, S.; SCHULZ, M.; TEXTOR, C.; GUIBERT, S.; BALKANSKI, Y.; BAUER, S. E.; BERNTSEN, T.; BERGLEN, T. F.; BOUCHER, O.; CHIN, M.; COLLINS, W.; DENTENER, F.; DIEHL, T.; EASTER, R.; FEICHTER, J.; FILLMORE, D.; GHAN, S.; GINOUX, P.; GONG, S.; GRINI, A.; HENDRICKS, J.; HERZOG, M.; HOROWITZ, L.; ISAKSEN, I.; IVERSEN, T.; KIRKEVÅG, A.; KLOSTER, S.; KOCH, D.; KRISTJANSSON, J. E.; KROL, M.; LAUER, A.; LAMARQUE, J. F.; LESINS, G.; LIU, X.; LOHMANN, U.; MONTANARO, V.; MYHRE, G.; PENNER, J.; PITARI, G.; REDDY, S.; SELAND, O.; STIER, P.; TAKEMURA, T.; TIE, X. An AeroCom initial assessment – optical properties in aerosol component modules of global models. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, n. 7, p. 1815–1834, maio 2006.

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

L'ECUYER, T. S.; HANG, Y.; MATUS, A. V.; WANG, Z. Reassessing the effect of cloud type on Earth's energy balance in the age of active spaceborne observations. Part I: tp of atmosphere and surface. **Journal of Climate**, v. 32, n. 19, p. 6197–6217, out. 2019.

LEE, J. M.; KHAIROUTDINOV, M. A Simplified Land Model (SLM) for use in cloud-resolving models: formulation and evaluation. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 7, n. 3, p. 1368–1392, set. 2015.

LI, Y.; THOMPSON, D. W. J.; BONY, S. The influence of atmospheric cloud radiative effects on the large-scale atmospheric circulation. **Journal of Climate**, v. 28, n. 18, p. 7263–7278, set. 2015.

LIMA, I. T. **O início da estação chuvosa na América do Sul e processos atmosféricos e de superfície associados**. 2021. 207 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44478D2>.

LIU, K. N. **An introduction to atmospheric radiation**. [S.l.]: Elsevier, 2002. 1–583 p. ISBN(978-0-12-451451-5).

LOEB, N. G.; DOELLING, D. R.; WANG, H.; SU, W.; NGUYEN, C.; CORBETT, J. G.; LIANG, L.; MITRESCU, C.; ROSE, F. G.; KATO, S. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Energy Balanced and Filled (EBAF) Top-of-Atmosphere (TOA) edition-4.0 data product. **Journal of Climate**, v. 31, n. 2, p. 895–918, jan. 2018.

LONG, C. N.; MATHER, J. H.; ACKERMAN, T. P. The ARM Tropical Western Pacific (TWP) Sites. **Meteorological Monographs**, v. 57, p. 7.1-7.14, abr. 2016.

MACEDO, A. DOS S.; FISCH, G. Variabilidade temporal da radiação solar durante o experimento GOAmazon 2014/15. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 2, p. 353–365, jun. 2018.

MACHADO, L. A. T.; CALHEIROS, A. J. P.; BISCARO, T.; GIANGRANDE, S.; SILVA DIAS, M. A. F.; CECCHINI, M. A.; ALBRECHT, R.; ANDREAE, M. O.; ARAUJO, W. F.; ARTAXO, P.; BORRMANN, S.; BRAGA, R.; BURLEYSON, C.; EICHHOLZ, C. W.; FAN, J.; FENG, Z.; FISCH, G. F.; JENSEN, M. P.; MARTIN, S. T.; PÖSCHL, U.; PÖHLKER, C.; PÖHLKER, M. L.; RIBAUD, J.-F.; ROSENFELD, D.; SARAIVA, J. M. B.; SCHUMACHER, C.; THALMAN, R.; WALTER, D.; WENDISCH, M. Overview: precipitation characteristics and sensitivities to environmental conditions during GoAmazon2014/5 and ACRIDICON-CHUVA. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, n. 9, p. 6461–6482, maio 2018.

MAGHRABI, A. H.; ALMUTAYRI, M. M.; ALDOSARY, A. F.; ALLEHYANI, B. I.; ALDAKHIL, A. A.; ALJARBA, G. A.; ALTILASI, M. I. The influence of atmospheric water content, temperature, and aerosol optical depth on downward longwave radiation in arid conditions. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 138, n. 3–4, p. 1375–1394, nov. 2019.

MARENGO, J. A.; SOUZA, C. M.; THONICKE, K.; BURTON, C.; HALLADAY, K.; BETTS, R. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, n. 21, dez. 2018.

MARQUARDT COLLOW, A. B.; MILLER, M. A. The seasonal cycle of the radiation budget and cloud radiative effect in the Amazon rain forest of Brazil. **Journal of Climate**, v. 29, n. 21, p. 7703–7722, nov. 2016.

MARTIN, S. T.; ARTAXO, P.; MACHADO, L. A. T.; MANZI, A. O.; SOUZA, R. A. F.; SCHUMACHER, C.; WANG, J.; ANDREAE, M. O.; BARBOSA, H. M. J.; FAN, J.; FISCH, G.; GOLDSTEIN, A. H.; GUENTHER, A.; JIMENEZ, J. L.; PÖSCHL, U.; SILVA DIAS, M. A.; SMITH, J. N.; WENDISCH, M. Introduction: observations and modeling of the Green Ocean Amazon (GoAmazon2014/5). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 8, p. 4785–4797, abr. 2016.

- MATHER, J. H. Seasonal variability in clouds and radiation at the Manus ARM site. **Journal of Climate**, v. 18, n. 13, p. 2417–2428, jul. 2005.
- MATSUNO, T. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. **Journal of the Meteorological Society of Japan Serie II**, v. 44, n. 1, p. 25–43, 1966.
- MCFARLANE, S. A.; LONG, C. N.; FLAHERTY, J. A climatology of surface cloud radiative effects at the ARM Tropical Western Pacific sites. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 52, n. 4, p. 996–1013, abr. 2013.
- MECHEM, D. B.; GIANGRANDE, S. E. The challenge of identifying controls on cloud properties and precipitation onset for cumulus congestus sampled during MC3E. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 123, n. 6, p. 3126–3144, mar. 2018.
- MORRISON, H.; CURRY, J. A.; KHVOROSTYANOV, V. I. A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. Part I: description. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 62, n. 6, p. 1665–1677, jun. 2005.
- MOULIN, A. J.; MOUM, J. N.; SHROYER, E. L. Evolution of turbulence in the diurnal warm layer. **Journal of Physical Oceanography**, v. 48, n. 2, p. 383–396, fev. 2018.
- MÜLMENSTÄDT, J.; SALZMANN, M.; KAY, J. E.; ZELINKA, M. D.; MA, P.-L.; NAM, C.; KRETZSCHMAR, J.; HÖRNIG, S.; QUAAS, J. An underestimated negative cloud feedback from cloud lifetime changes. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 6, p. 508–513, jun. 2021.
- NEVES, T.; FISCH, G.; RAASCH, S. Local convection and turbulence in the Amazonia using large Eddy simulation model. **Atmosphere**, v. 9, n. 10, p. 399, out. 2018.
- NUNES, A. M. P.; SILVA DIAS, M. A. F.; ANSELMO, E. M.; MORALES, C. A. Severe convection features in the Amazon basin: a TRMM-based 15-year evaluation. **Frontiers in Earth Science**, v. 4, abr. 2016.
- PAINEMAL, D.; CORRAL, A. F.; SOROOSHIAN, A.; BRUNKE, M. A.; CHELLAPPAN, S.; AFZALI GOROOH, V.; HAM, S.; O’NEILL, L.; SMITH, W. L.; TSELIODIS, G.; WANG, H.; ZENG, X.; ZUIDEMA, P. An overview of atmospheric features over the western North Atlantic Ocean and North American East Coast—Part 2: circulation, boundary layer, and clouds. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 126, n. 6, mar. 2021.
- PARK, R.-S.; CHAE, J.-H.; HONG, S.-Y. A revised prognostic cloud fraction scheme in a global forecasting system. **Monthly Weather Review**, v. 144, n. 3, p. 1219–1229, mar. 2016.
- PATHAK, R.; SAHANY, S.; MISHRA, S. K. Uncertainty quantification based cloud parameterization sensitivity analysis in the NCAR community atmosphere model.

**Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 17499, dez. 2020.

PATNAUDE, R.; DIAO, M. Aerosol indirect effects on cirrus clouds based on global aircraft observations. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 10, maio 2020.

PEIXOTO, J. P.; OORT, A. H. **Physics of climate**. New York: American Institute of Physics, 1992. 520 p. ISBN(978-0-88318-712-8).

PETTY, G. W. **A first Course in Atmospheric Radiation**. [S.l.: s.n., s.d.]. 459 p.

PUJIANA, K.; MOUM, J. N.; SMYTH, W. D. The role of turbulence in redistributing upper-ocean heat, freshwater, and momentum in response to the MJO in the Equatorial Indian Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v. 48, n. 1, p. 197–220, jan. 2018.

RAMANATHAN, V.; CESS, R. D.; HARRISON, E. F.; MINNIS, P.; BARKSTROM, B. R.; AHMAD, E.; HARTMANN, D. Cloud-radiative forcing and climate: results from the Earth radiation budget experiment. **Science**, v. 243, n. 4887, p. 57–63, jan. 1989.

REID, J. S.; BROOKS, B.; CRAHAN, K. K.; HEGG, D. A.; ECK, T. F.; O'NEILL, N.; DE LEEUW, G.; REID, E. A.; ANDERSON, K. D. Reconciliation of coarse mode sea-salt aerosol particle size measurements and parameterizations at a subtropical ocean receptor site. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. D2, e D02202, 2006.

RIIHIMAKI, L. D.; GAUSTAD, K. L.; LONG, C. N. **Radiative Flux Analysis (RADFLUXANAL) value-added product**: retrieval of clear-sky broadband radiative fluxes and other derived values. Oak Ridge, Tn: Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2019. Disponível em: <<http://www.osti.gov/servlets/purl/1569477/>>.

ROSÁRIO, N. E.; LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; YAMASOE, M. A.; FONSECA, R. M. Modeling the South American regional smoke plume: aerosol optical depth variability and surface shortwave flux perturbation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, n. 6, p. 2923–2938, mar. 2013.

ROWE, A. K.; HOUZE, R. A.; BRODZIK, S.; ZULUAGA, M. D. The diurnal and microphysical characteristics of MJO rain events during DYNAMO. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 2019, n. 1, p. 67–80, 1 jul. 2019.

SATYAMURTY, P.; DA COSTA, C. P. W.; MANZI, A. O. Moisture source for the Amazon Basin: a study of contrasting years. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 111, n. 1–2, p. 195–209, jan. 2013.

SLINGO, A.; SLINGO, J. M. The response of a general circulation model to cloud longwave radiative forcing. I: introduction and initial experiments. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 114, n. 482, p. 1027–1062, jul. 1988.

SLINGO, J. M. A cloud parametrization scheme derived from GATE data for use with a numerical model. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 106, n. 450, p. 747–770, out. 1980.

SLINGO, J. M. The development and verification of a cloud prediction scheme for the

Ecmwf model. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 113, n. 477, p. 899–927, jul. 1987.

SOLOMON, S., D.; QIN, M.; MANNING, Z.; CHEN, M.; MARQUIS, K. B.; AVERYT, M. T.; MILLER HL; SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. Summary for policymakers. In: QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K./ TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (Ed.). **Climate change 2007: the physical science basis**. New York: Cambridge University Press, 2007.

SOUZA, E. B.; AMBRIZZI, T. ENSO impacts on the South American rainfall during 1980s: Hadley and Walker circulation. **Atmósfera**, v. 15, p. 105–120, 2002.

STEPHEN A. K.; DEL GENIO, A. **ARM's support for GCM improvement: a white paper**. [S.l.: s.n.], 2006.

STEPHENS, G. L. Cloud feedbacks in the climate system: a critical review. **Journal of Climate**, v. 18, n. 2, p. 237–273, jan. 2005.

SU, W.; BODAS-SALCEDO, A.; XU, K.-M.; CHARLOCK, T. P. Comparison of the tropical radiative flux and cloud radiative effect profiles in a climate model with Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) data. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. D1, e D01105, jan. 2010.

SUNDQVIST, H.; BERGE, E.; KRISTJÁNSSON, J. E. Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 8, p. 1641–1657, ago. 1989.

TANG, S.; XIE, S.; ZHANG, Y.; ZHANG, M.; SCHUMACHER, C.; UPTON, H.; JENSEN, M. P.; JOHNSON, K. L.; WANG, M.; AHLGRIMM, M.; FENG, Z.; MINNIS, P.; THIEMAN, M. Large-scale vertical velocity, diabatic heating and drying profiles associated with seasonal and diurnal variations of convective systems observed in the GoAmazon2014/5 experiment. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 22, p. 14249–14264, nov. 2016.

TAO, W.-K.; MONCRIEFF, M. W. Multiscale cloud system modeling. **Reviews of Geophysics**, v. 47, n. 4, eRG4002, nov. 2009.

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

THOMPSON, G.; FIELD, P. R.; RASMUSSEN, R. M.; HALL, W. D. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization. **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 12, p. 5095–5115, dez. 2008.

TIEDTKE, M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 8, p. 1779–1800, ago. 1989.



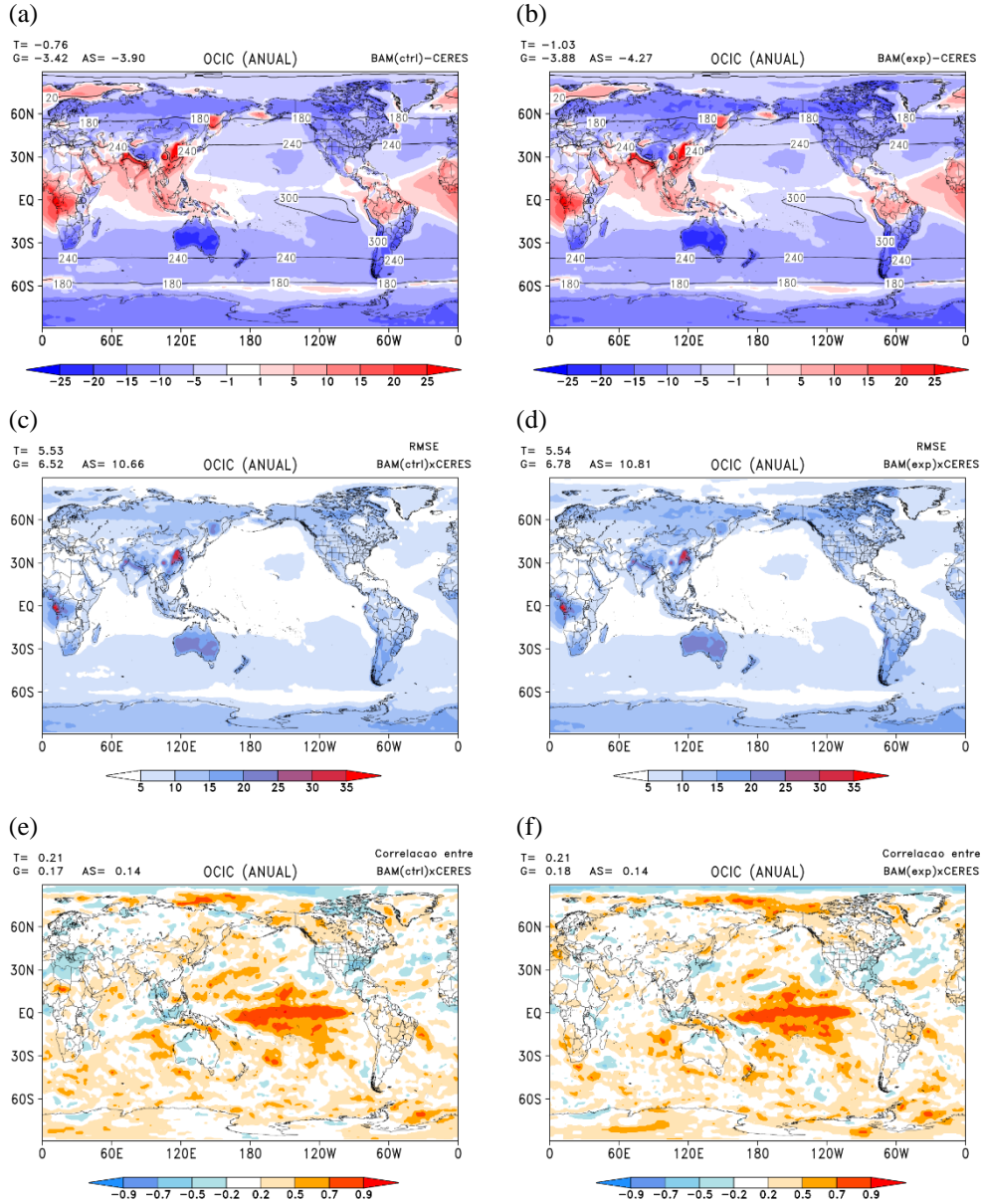
- VOIGT, A.; ALBERN, N.; CEPPI, P.; GRISE, K.; LI, Y.; MEDEIROS, B. Clouds, radiation, and atmospheric circulation in the present-day climate and under climate change. **WIREs Climate Change**, v. 12, n. 2, mar. 2021.
- WALISER, D. E.; GAUTIER, C. A satellite-derived climatology of the ITCZ. **Journal of Climate**, v. 6, n. 11, p. 2162–2174, nov. 1993.
- WANG, Y.; YANG, P.; HIOKI, S.; KING, M. D.; BAUM, B. A.; DI GIROLAMO, L.; FU, D. Ice cloud optical thickness, effective radius, and ice water path inferred from fused MISR and MODIS measurements based on a pixel-level optimal ice particle roughness model. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 22, p. 12126–12140, nov. 2019.
- WEBB, M. J.; ANDREWS, T.; BODAS-SALCEDO, A.; BONY, S.; BRETHERTON, C. S.; CHADWICK, R.; CHEPFER, H.; DOUVILLE, H.; GOOD, P.; KAY, J. E.; KLEIN, S. A.; MARCHAND, R.; MEDEIROS, B.; PIER SIEBESMA, A.; SKINNER, C. B.; STEVENS, B.; TSELIODIS, G.; TSUSHIMA, Y.; WATANABE, M. The Cloud Feedback Model Intercomparison Project (CFMIP) contribution to CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 10, n. 1, p. 359–384, 2017.
- WEIBULL, W.; SWEDEN, S. A statistical distribution function of wide applicability. **Journal of Applied Mechanics**, p. 293–297, 1951.
- WIELICKI, B. A.; HARRISON, E. F.; CESS, R. D.; KING, M. D.; RANDALL, D. A. Mission to planet Earth: role of clouds and radiation in climate. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 76, n. 11, p. 2125–2153, nov. 1995.
- WIELICKI, B. A.; BARKSTROM, B. R.; HARRISON, E. F.; LEE, R. B.; LOUIS SMITH, G.; COOPER, J. E. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An Earth Observing System Experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 5, p. 853–868, maio 1996.
- WILD, M. The global energy balance as represented in CMIP6 climate models. **Climate Dynamics**, v. 55, n. 3–4, p. 553–577, ago. 2020.
- WU, X.; LI, X. A review of cloud-resolving model studies of convective processes. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 25, n. 2, p. 202–212, mar. 2008.
- YANAI, M.; TOMITA, T. Seasonal and interannual variability of atmospheric heat sources and moisture sinks as determined from NCEP–NCAR reanalysis. **Journal of Climate**, v. 11, n. 3, p. 463–482, mar. 1998.
- YANG, G.-Y.; SLINGO, J. The diurnal cycle in the tropics. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 4, p. 784–801, abr. 2001.
- ZELINKA, M. D.; MYERS, T. A.; MCCOY, D. T.; PO-CHEDLEY, S.; CALDWELL, P. M.; CEPPI, P.; KLEIN, S. A.; TAYLOR, K. E. Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 1, jan. 2020.
- ZHANG, M. H. Comparing clouds and their seasonal variations in 10 atmospheric

general circulation models with satellite measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D15, p. D15S02, 2005.

ZHOU, T.; CHEN, X. Uncertainty in the 2°C warming threshold related to climate sensitivity and climate feedback. **Journal of Meteorological Research**, v. 29, n. 6, p. 884–895, 2015.

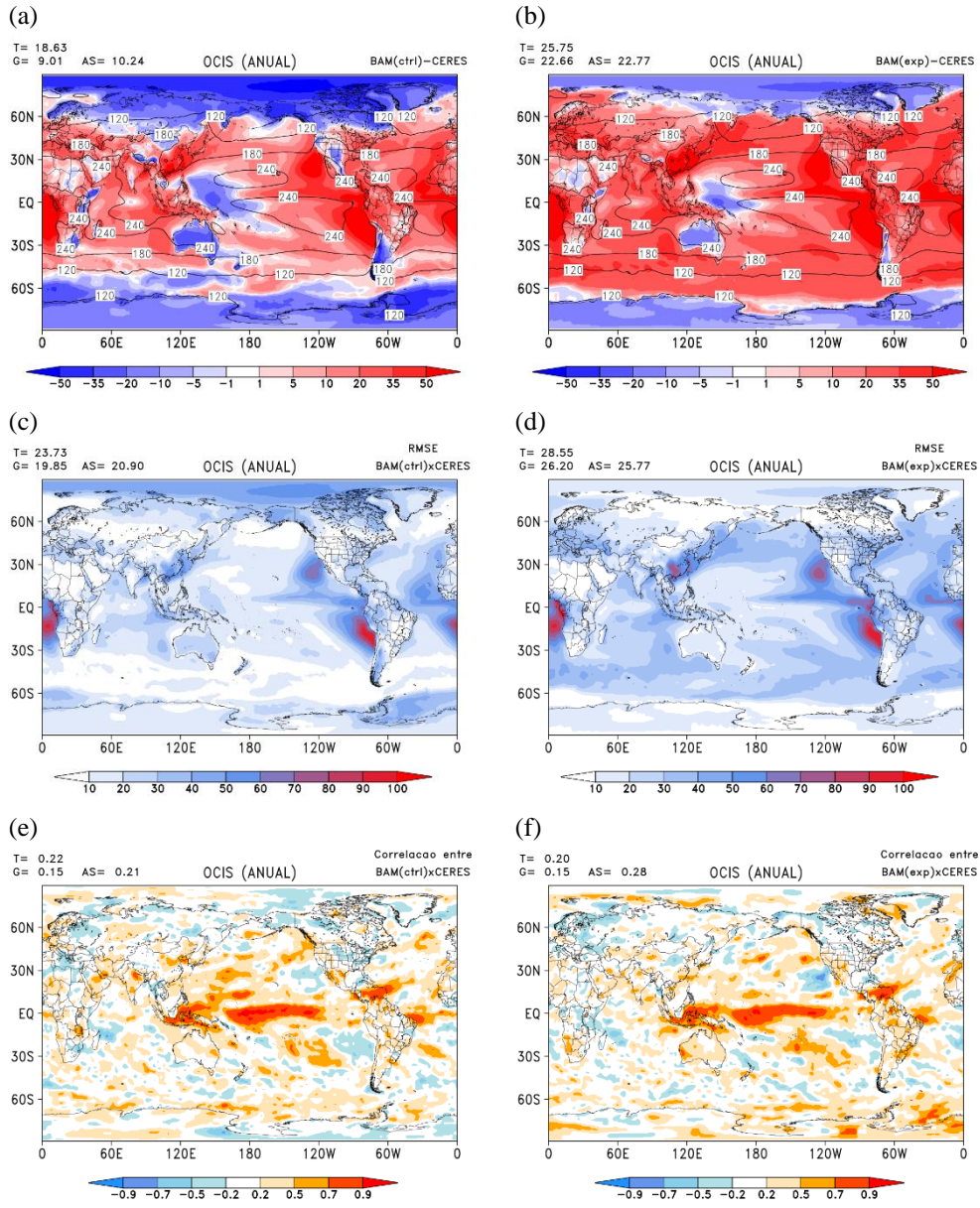
## APENDICE A - FIGURAS COMPLEMENTARES

Figura A.1 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação para OCIC entre as simulações com o BAM e os dados de referência.



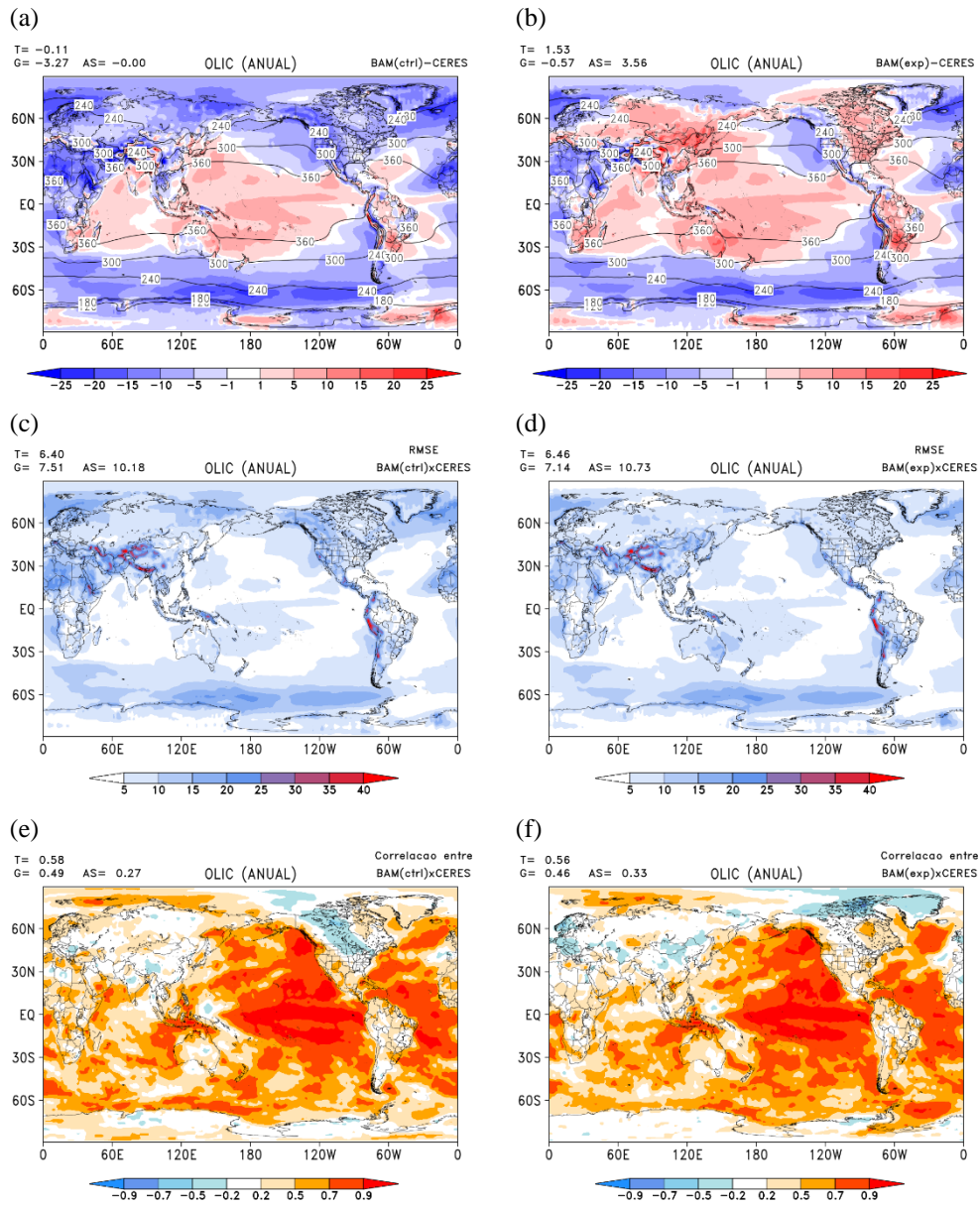
Fonte: Produção do autor.

Figura A.2 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação para OCIS entre as simulações com o BAM e os dados de referência.



Fonte: Produção do autor.

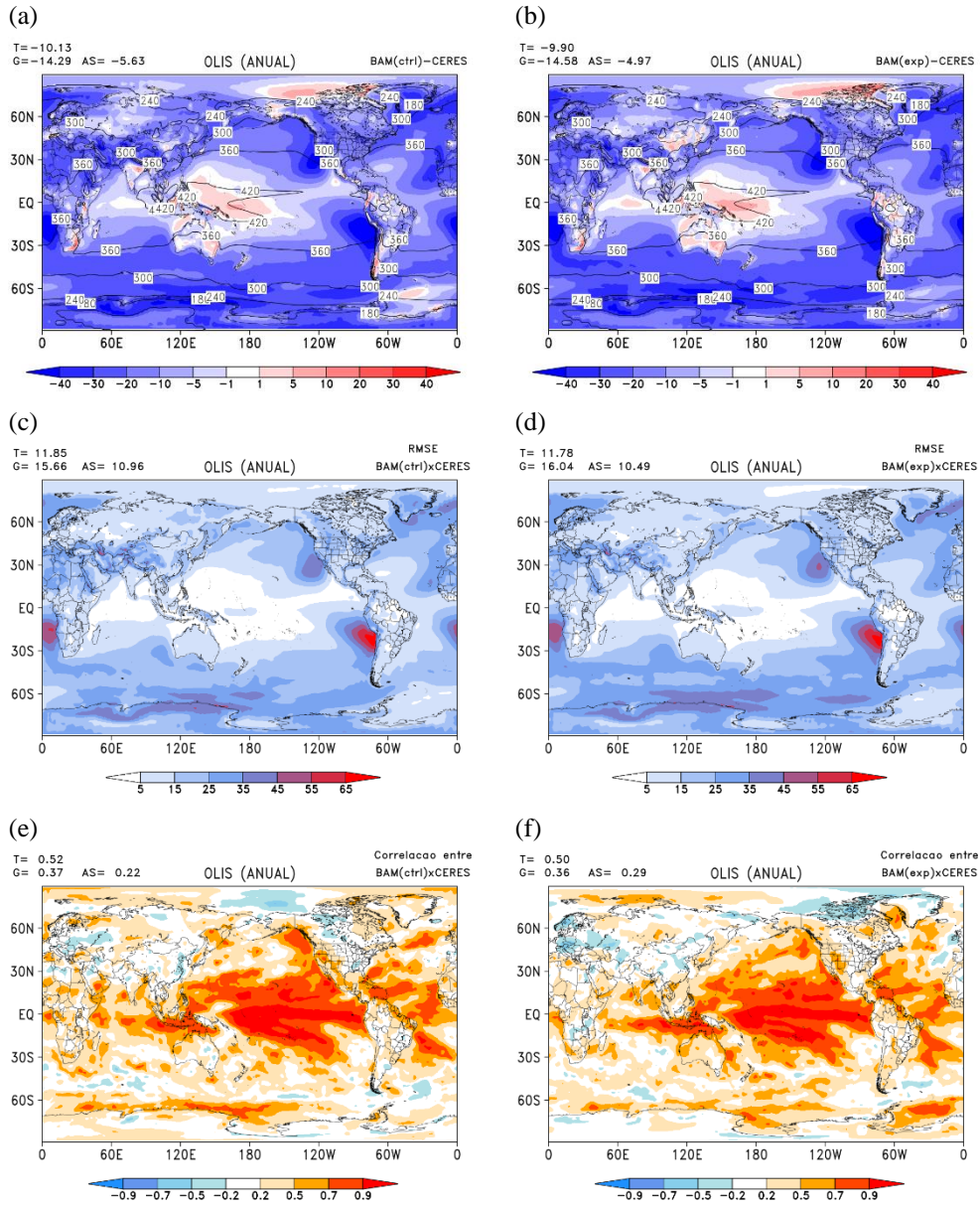
Figura A.3 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação para OLIC entre as simulações com o BAM e os dados de referência.



Fonte: Produção do autor.



Figura A.4 - BIAS, RMSE e coeficiente de correlação para OLIS entre as simulações com o BAM e os dados de referência.



Fonte: Produção do autor.