



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

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/05.26.17.39-TDI

**UMA NOVA FORMULAÇÃO PARA
PARAMETRIZAÇÃO DE RAÍZES FINAS E SUA
INFLUÊNCIA NAS SIMULAÇÕES DE FENÔMENOS
ATMOSFÉRICOS**

Milena Pereira Dantas

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Meteorologia,
orientada pelos Drs. José Paulo
Bonati, e Paulo Yoshio Kubota,
aprovada em 20 de maio de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46UH53B>>

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/2022/05.26.17.39-TDI

**UMA NOVA FORMULAÇÃO PARA
PARAMETRIZAÇÃO DE RAÍZES FINAS E SUA
INFLUÊNCIA NAS SIMULAÇÕES DE FENÔMENOS
ATMOSFÉRICOS**

Milena Pereira Dantas

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. José Paulo Bonati, e Paulo Yoshio Kubota, aprovada em 20 de maio de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46UH53B>>

INPE
São José dos Campos
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Dantas, Milena Pereira.

D235u Uma nova formulação para parametrização de raízes finas e sua influência nas simulações de fenômenos atmosféricos / Milena Pereira Dantas. – São José dos Campos : INPE, 2022.
xxx + 169 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/05.26.17.39-TDI)

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

Orientadores : Drs. José Paulo Bonati, e Paulo Yoshio Kubota.

1. Enraizamento. 2. Modelos de superfície. 3. Dinâmica de raízes. I.Título.

CDU 556.01:581.43



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 TESE MILENA PEREIRA DANTAS BANCA Nº 150/2022 , REG. 135364/2017

No dia 20 de maio de 2022, 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).

Novo Título: “UMA NOVA FORMULAÇÃO PARA PARAMETRIZAÇÃO DE RAÍZES FINAS E SUA INFLUÊNCIA NAS SIMULAÇÕES DE FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS”

Membros da Banca:

Dr. Luis Gustavo Gonçalves de Gonçalves – Presidente – INPE

Dr. José Paulo Bonatti – Orientador (a) – INPE

Dr. Paulo Yoshio Kubota – Orientador (a) – INPE

Dra. Clênia Rodrigues Alcântara – Membro Externo – UFCG

Dr. Daniel Andrés Rodriguez– Membro Externo – UFRJ



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Yoshio Kubota, Pesquisador**, em 25/05/2022, às 12:03 (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 **José Paulo Bonatti, Pesquisador**, em 25/05/2022, às 13:02 (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 **Luís Gustavo Gonçalves de Gonçalves, Pesquisador**, em 25/05/2022, às 13:49 (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 **daniel andres rodriguez (E), Usuário Externo**, em 26/05/2022, às 08:02 (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 **Clenia Rodrigues Alcantara (E), Usuário Externo**, em 03/06/2022, às 11:03 (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 **9892972** e o código CRC **104898D1**.

Referência: Processo nº 01340.003771/2022-84

SEI nº 9892972

"Não pare até se orgulhar de você".

(AUTOR DESCONHECIDO)

*A meus pais **José Maria e Lourdes**, a meu irmão
Renato e a minha vó **Maria**.*

AGRADECIMENTOS

Ao longo da escrita desta tese, recebi muito apoio e ajuda.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, por ter me dado força e foco para confiar no meu sonho e lutar por alcançar aquilo que acredito.

Agradeço a meus orientadores Dr. José Bonatti e Dr. Paulo Kubota pelos anos de conversas, reuniões presenciais e virtuais para concluirmos esta tese. Quero agradecer pela paciência em me conduzir até aqui, foi ótimo dividir e trocar essas experiências que foram essenciais para o resultado final.

Também digo “muito obrigada” ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a todos os pesquisadores pelo apoio neste projeto. Foram fundamentais para o sucesso. Deixo um agradecimento especial a Dra. Dayana Castilho pelo incentivo e dedicação do seu escasso tempo ao meu projeto de pesquisa.

Muito obrigada a CAPES e CNPq pelo auxílio financeiro durante os anos que este trabalho foi desenvolvido.

Agradeço a todos os amigos que fizeram parte desta jornada, com vocês compartilhei muitas horas da minha vida e enfrentei muitos desafios profissionais. Tenho certeza que voltaremos a nos encontrar, tanto no âmbito profissional como pessoal.

Mainha e Painho, quero expressar o meu agradecimento por fazerem de mim uma pessoa independente e de sucesso que sou hoje. Obrigada por acreditarem em mim e me ajudarem a chegar até aqui.

Sou grata a minha vó, tia, irmão e primos pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida.

RESUMO

As raízes finas são responsáveis pela absorção de água e nutrientes para as plantas, e tendem a se desenvolver onde a umidade do solo e nutrientes se encontram mais disponíveis. Além disso, desempenham um papel fundamental nos estudos das interações entre o solo, vegetação e atmosfera. Os atuais modelos de superfície continental descrevem a distribuição de raízes finas em função apenas do tipo de vegetação, utilizam o parâmetro de raízes finas (β) constante para todos os biomas. Essa pesquisa visa desenvolver e implementar no modelo IBIS-CPTEC um esquema dinâmico de distribuição de raízes, que possa responder a condições climáticas, em função da alocação de carbono de raízes finas, e avaliar sua influência nas simulações de fluxos de superfícies e padrões atmosféricos para América do Sul. A nova parametrização de raízes finas (M21) representou diferentes distribuições com máxima fração de raízes finas (FRF) em camadas mais profundas do solo quando comparada a parametrização proposta por Jackson et al. (1997). A nova parametrização de raízes finas foi implementada no modelo IBIS-CPTEC realizadas diversas simulações para testar a sensibilidade do modelo IBIS-M21 para diferentes tipos de PFTs e condições ambientais. Os resultados mostraram uma melhora nas simulações dos fluxos de superfície, principalmente na estação seca. Em seguida, o modelo BAM integrado com a nova parametrização de raízes finas (BAM-3D-M21) apresentou um ganho nas simulações dos principais padrões atmosféricos sobre a América do Sul. Nas análises sazonais, o modelo BAM-3D-M21 reduziu as superestimativas e as subestimativas do modelo BAM-3D-J97. O modelo BAM-3D-M21 apresentou menores valores de BIAS e RMSE durante o trimestre JJA (inverno na América do Sul) e maiores valores em DJF (verão América do Sul). A resposta da nova parametrização de raízes finas à parâmetros de superfície e padrões atmosféricos foi avaliada durante o verão da América do Sul em eventos de El Niño e La Niña. Além disso, foram verificadas regiões onde a diferença entre as simulações dos modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 possuem significância estatística com nível de confiança de 90%. Os resultados apresentaram regiões mais abrangentes com diferenças significativas nas simulações dos fluxos de calor sensível e latente. A nova parametrização de raízes finas foi sensível às características locais associadas aos eventos de El Niño e La Niña, mostrando uma redução da precipitação em regiões secas e um aumento em regiões úmidas. Por fim, foi investigado o efeito da inicialização da umidade do solo (40%, 60%, 80% e 100%) na precipitação e temperatura (2 metros). Os resultados indicaram que quando houve um aumento da precipitação associado a uma redução da umidade do solo inicial, possivelmente a área em questão teve influência do transporte de umidade de outras regiões mais úmidas (Amazônia ou oceano). A temperatura do ar (2 metros) aumentou quando houve uma redução da umidade do solo e redução da precipitação.

Palavras-chave: enraizamento. modelos de superfície. dinâmica de raízes.

A NEW FORMULATION FOR FINE ROOTS PARAMETERIZATION AND ITS INFLUENCE ON SIMULATIONS OF ATMOSPHERIC PHENOMENA

ABSTRACT

The fine roots are responsible for the absorption of water and nutrients to plants, and they grow where soil moisture and nutrients are more available. Besides, they play a key role in interaction studies between soil, vegetation, and atmosphere. The current continental surface models describe the fine root distribution in function of vegetation type, they used the constant fine root parameter (β) for all biomes. In other words, they don't consider the dynamic responses of roots to different environmental conditions. This research aims to develop and implement a dynamic root distribution parameterization into the IBIS-CPTEC model, which can respond to climatic conditions in function of carbon allocation from fine roots, and to evaluate its influence on surface fluxes simulations and atmospheric patterns for South America. The new fine root parametrization (M21) represented different distributions with maximum fine root fraction (FRF) in deeper soil layers when compared to the parameterization proposed by Jackson et al. 1997. After the implementation of the new fine root parametrization into the IBIS-CPTEC model and sequences of runs to test the sensitivity of the IBIS-M21 model to different types of vegetation and environmental conditions. The results showed an improvement in surface fluxes simulation, mainly in the dry season. Then, the BAM model was integrated with the new fine roots parametrization (BAM-3D-M21) and presented again in the simulation of the main atmospheric patterns over South America. In seasonal analysis, the BAM-3D-M21 model reduced overestimates and underestimates of the BAM-3D-J97 model. The BAM-3D-M21 presented lower values of BIAS and RMSE during the JJA quarter (winter in South America) and higher values of BIAS and RMSE in DJF (summer in South America). Therefore, the response of the new fine root parametrization to atmospheric parameters and patterns during the South American summer in El Niño and La Niña events was evaluated. Besides, the difference between the models BAM-3D-M21 and BAM-3D-J97 simulations was verified with 90% confidence level. The results showed more significant differences in sensible and latent heat simulations. A new parameterization of fine roots was selected on the location and characteristics associated with El Niño and La Niña events, where the occurrences to the regions were implemented in dry regions and increased in humid regions. Finally, the effect of initialization of soil moisture (40%, 60%, 80% and 100%) on temperature and temperature (2 meters) was investigated. The results indicate that the reduction in soil moisture is associated with an increase in soil moisture, possibly due to the intensity of moisture transport from humid regions (Amazon or ocean). The air temperature (2 meters) increased when there was a reduction in soil moisture and a reduction in the reduction.

Keywords: rooting. surface models. roots dinamyc.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Estrutura básica dos módulos do IBIS e suas características.	20
5.1 Mapa das localizações geográficas das observações de raízes finas e Tipos de Vegetação (PFTs) do modelo IBIS.	25
5.2 Esquema gráfica da interpretação do <i>Boxplot</i>	27
5.3 Impacto dos parâmetros de forma e de escala da função proposta por Weibull (1951).	32
5.4 <i>Boxplot</i> das biomassas de raízes finas (BRF) dos diferentes tipos funcionais de plantas (PFTs) do modelo IBIS. As linhas pretas indicam os valores mediano e os círculos preenchidos indicam as médias.	34
5.5 Círculos de correlações (CC) para os PFTs analisados, exibem as distribuições de cada grupo nas dimensões fatoriais (Dim 1 X Dim 2).	37
5.6 Esquema modular da nova distribuição de raízes finas no solo.	40
5.7 Relação entre os valores observados e estimados para a biomassa de raízes finas (BRF) de cada Tipo Funcional de Planta (PFT).	41
5.8 Efeito da função peso (wgt) no parâmetro da distribuição da fração máxima de raízes finas (β). Os valores de wgt variam de 0,5 - 1,5, a linha contínua representa o wgt=1, as linhas pontilhadas vermelhas descreve os valores de wgt<1, e as pontilhadas azuis apresenta os valores de wgt>1. O eixo x é a fração de raízes finas (FRF) e o eixo y é a profundidade do solo (z; cm).	45
5.9 Distribuições de raízes finas para cada PFTs do modelo IBIS-CPTEC. As linhas pretas representam a atual parametrização de Jackson et al. (1997) (J97) e as linhas vermelhas estão associadas a nova parametrização de raízes finas (M21). Os índices i e s correspondem, respectivamente, dossel inferior (linhas tracejadas) e dossel superior (linhas contínuas). FRF é a fração de raízes finas e z é a profundidade do solo em cm.	47
6.1 Localização dos sítios estudados e distribuição dos biomas conforme o modelo IBIS.	54

6.2	Média mensal da precipitação (PREC; mm.mês ⁻¹ ; barras azuis), temperatura do ar (TA; °C; linha vermelha com triângulos) e saldo de radiação (RN; W.m ⁻² ; linha verde com círculos) para os sítios (a) BR-SA1 , (b) BR-SA3, (c) BR-NPW e (d) BR-CST conforme o período descrito na Tabela 1. A área cinza indica o período chuvoso e a branca está relacionada ao período seco.	57
6.3	Perfil vertical médio da distribuição de raízes finas ao longo das simulações referentes aos sítios. A linha preta representa o perfil de raízes da simulação J97 e as linhas coloridas estão associadas ao experimento M21.	60
6.4	Diferenças entre a simulação com nova parametrização (M21) e a controle (J97) da (a, b, c, d) umidade do solo em % e da (e, f, g, h) temperatura do solo em °C para os quatro sítios em estudo. As linhas pretas tracejadas separam o período chuvoso e seco.	61
6.5	Ciclos anuais das simulações do H e LE, em comparação com as observações (áreas sombreadas indicam a estação chuvosa).	64
6.6	Ciclos diurnos médios do Saldo de Radiação (RN) e albedo da superfície (α), durante o período seco (área branca) e chuvoso (área cinza), referentes aos sítios (a, e) BR-SA1, (b, f) BR-SA3, (c, g) BR-NPW e (d, h) BR-CST.	66
6.7	Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE), durante o período seco, referentes aos sítios (a, e) BR-SA1, (b, f) BR-SA3, (c, g) BR-NPW e (d, h) BR-CST.	68
6.8	Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE), durante o período chuvoso, referentes aos sítios (a, e) BR-SA1, (b, f) BR-SA3, (c, g) BR-NPW e (d, h) BR-CST.	70
7.1	Topografia (m) da América do Sul utilizado pelo modelo BAM-3D. Em destaque os subdomínios utilizados neste estudo.	80
7.2	Diagrama das simulações realizada para o verão em eventos de El Niño e La Niña na América do Sul.	82
7.3	Precipitação média sazonal (mmdia ⁻¹) simulada com o modelo BAM-3D-J87 para o período de 1997 – 2017. A primeira e segunda linha representam os campos médios do conjunto de dados do GPCP e da simulação com do modelo BAM-3D-J97, respectivamente. A terceira linha exhibe bias da precipitação (J97-GPCP). A última linha corresponde ao RMSE (J97-GPCP).	87

7.4	Valor de BIAS e RMSE da precipitação média sazonal (mmdia^{-1}) simulada com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam, respectivamente, BIAS e RMSE (M21-ERA5), em mmdia^{-1}	88
7.5	Temperatura a 2 metros da superfície média sazonal ($^{\circ}\text{C}$) simulada com o modelo BAM-3D-J87 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam os campos médios do conjunto de dados do ERA5 e da simulação com do modelo BAM-3D-J87, respectivamente. A terceira linha exibe bias da precipitação (J97-ERA5). A última linha corresponde ao RMSE (J97-ERA5).	90
7.6	Valor de BIAS e RMSE da temperatura a 2 metros da superfície média sazonal ($^{\circ}\text{C}$) simulada com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam, respectivamente, BIAS e RMSE (M21-ERA5).	92
7.7	Linhas de corrente e escoamento do vento em 850 hPa média sazonal (ms^{-1}) simulada com o modelo BAM-3D-J87 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam os campos médios do conjunto de dados do ERA5 e da simulação com do modelo BAM-3D-J87, respectivamente. A terceira linha exibe bias da precipitação (J97-ERA5). A última linha corresponde ao RMSE (J97-ERA5).	94
7.8	Valor de BIAS e RMSE do Escoamento do vento em 850 hPa média sazonal (ms^{-1}) simulado com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam, respectivamente, BIAS e RMSE (M21-ERA5).	96
7.9	Linhas de corrente e escoamento do vento em 200 hPa média sazonal (ms^{-1}) simulada com o modelo BAM-3D-J87 para o período de 1997 – 2017. A primeira e segunda linha representam os campos médios do conjunto de dados do ERA5 e da simulação com do modelo BAM-3D-J87, respectivamente. A terceira linha exibe bias da precipitação (J97-ERA5). A última linha corresponde ao RMSE (J97-ERA5).	98
7.10	Valor de BIAS e RMSE do Escoamento do vento em 200 hPa média sazonal (ms^{-1}) simulado com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam, respectivamente, BIAS e RMSE (M21-ERA5).	100

7.11	Umidade do solo média sazonal simulada com o modelo BAM-3D-J87 para o período de 1997 – 2017. A primeira e segunda linha representam os campos médios do conjunto de dados do ERA5 e da simulação com do modelo BAM-3D-J87, respectivamente. A terceira linha exhibe bias da precipitação (J97-GLDAS). A última linha corresponde ao RMSE (J97-GLDAS).	102
7.12	Valor de BIAS e RMSE da umidade do solo simulada com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam, respectivamente, BIAS e RMSE (M21-GLDAS).	104
7.13	Diferenças dos campos médios mensais do fluxo de calor sensível (H ; Wm^{-2}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	105
7.14	Diferenças dos campos médios mensais do fluxo de calor latente (LE ; Wm^{-2}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	106
7.15	Diferenças dos campos médios mensais da umidade do solo em superfície (USSL) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	107
7.16	Diferenças dos campos médios mensais da umidade do solo na zona de raízes (UZRS) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014 – 2015.	108
7.17	Diferenças dos campos médios mensais da umidade do solo na zona de drenagem (UZDS) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	108
7.18	Diferenças dos campos médios mensais da temperatura do ar a 2 metros da superfície ($T2MT$; $^{\circ}C$) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	109
7.19	Diferenças dos campos médios mensais da radiação de onda longa (ROL ; Wm^{-2}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	111
7.20	Diferenças dos campos médios mensais da divergência de umidade em 850 hPA ($DIV850$; $*1e6 s^{-1}$) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	112
7.21	Diferenças dos campos médios mensais da divergência de umidade em 200 hPA ($DIV200$; $*1e6s^{-1}$) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	112

7.22	Diferenças dos campos médios mensais da velocidade vertical em 500 hPA (VV500; Pas^{-1}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	113
7.23	Diferenças dos campos médios mensais da umidade específica em 1000 hPA (q ; gkg^{-1}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	114
7.24	Diferenças dos campos médios mensais da cobertura de nuvem (CBNV) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	115
7.25	Diferenças dos campos médios mensais da precipitação (PREC; mmdia^{-1}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	116
7.26	Diferenças dos campos médios mensais do fluxo de calor sensível (H ; Wm^{-2}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.	118
7.27	Diferenças dos campos médios mensais do fluxo de calor latente (LE ; Wm^{-2}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.	118
7.28	Diferenças dos campos médios mensais da umidade do solo em superfície (USSL) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.	119
7.29	Diferenças dos campos médios mensais da umidade do solo na zona de raízes (UZRS) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.	120
7.30	Diferenças dos campos médios mensais da umidade do solo na zona de drenagem (UZDS) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.	120
7.31	Diferenças dos campos médios mensais da temperatura do ar a 2 metros da superfície (T2MT; $^{\circ}\text{C}$) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.	121
7.32	Diferenças dos campos médios mensais da radiação de onda longa (ROL; Wm^{-2}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.	123
7.33	Diferenças dos campos médios mensais da divergência de umidade em 850 hPA (DIV850; $*1\text{e}6\text{s}^{-1}$) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.	123

7.34	Diferenças dos campos médios mensais da divergência de umidade em 200 hPa (DIV_{200} ; s^{-1}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012..	124
7.35	Diferenças dos campos médios mensais da velocidade vertical em 500 hPa (VV_{500} Pa/s) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.	125
7.36	Diferenças dos campos médios mensais da umidade específica em 1000 hPa (q ; gkg^{-1}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.	126
7.37	Diferenças dos campos médios mensais da cobertura de nuvem (CBNV) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.	127
7.38	Diferenças dos campos médios mensais da precipitação (PREC; mmdia^{-1}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.	127
7.39	Médias mensais da precipitação (primeira linha) e temperatura do ar em 2 metros (segunda linha) das simulações com o modelo BAM-3D-M21 sob diferentes condições iniciais de umidade do solo, referentes ao evento de El Niño (CASO 1). As inicializações de umidade do solo foram de 40%, 60%, 80% e 100%, foram representadas por barras azuis, verdes, vermelhas e amarelas, respectivamente.	132
7.40	Médias mensais da precipitação (primeira linha) e temperatura do ar em 2 metros (segunda linha) das simulações com o modelo BAM-3D-M21 sob diferentes condições iniciais de umidade do solo, referentes ao evento de La Niña (CASO 2). As inicializações de umidade do solo foram de 40%, 60%, 80% e 100%, foram representadas por barras azuis, verdes, vermelhas e amarelas,	133
A.1	Precipitação média sazonal (mmdia^{-1}) simulada com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017.	167
A.2	Temperatura a 2 metros da superfície média sazonal ($^{\circ}\text{C}$) simulada com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017.	167
A.3	Escoamento do vento em 850 hPa médio sazonal (ms^{-1}) simulado com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017.	168
A.4	Escoamento do vento em 200 hPa médio sazonal (ms^{-1}) simulado com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017.	168
A.5	Umidade do solo média sazonal simulada com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017.	169

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1	Resumo da influência do El Niño no Brasil. 10
2.2	Resumo da influência da La Niña no Brasil. 10
5.1	Tipos Funcionais de Plantas (PFTs) do modelo IBIS e seus códigos e siglas. 26
5.2	Combinações de testes realizados para investigar simultaneamente os efeitos sobre BRF, de duas ou mais variáveis preditoras. 30
5.3	Conjunto de equações para o cálculo da biomassa de raízes finas (BRF; kgm^{-2}) em função da umidade do solo (US; kgm^{-2}), produtividade primária líquida (NPP; $\text{kg}^\circ\text{Cm}^{-2}\text{dia}^{-1}$) e temperatura da superfície (TEMP; $^\circ\text{C}$). 42
5.4	Conjunto de equações lineares para o cálculo da Função Peso (wgt) referente a cada PFTs. 43
5.5	Valores associados aos parâmetros β e θ para as camadas inferior e superior de vegetação do modelo IBIS, conforme os PFTs. 44
6.1	Principais características dos sítios e período de estudo. 55
6.2	Conjunto de equações para o cálculo da biomassa de raízes finas (BRF) e função peso (wgt) de acordo com as Tabelas 5.3 e 5.4. 58
6.3	Valores de β , θ e profundidade máxima do solo (dmax) para cada PFTs referentes às duas camadas de vegetação do modelo de superfície IBIS semelhantes à Tabela 5.5. Em que, s representa a camada de vegetação superior e i é referente a camada de vegetação inferior. 58
6.4	Avaliação dos experimentos do fluxo de calor sensível (H) através de Índices estatísticos básicos: Erro Médio (ME), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e Índice de concordância (d). 72
6.5	Avaliação dos experimentos do fluxo de calor latente (LE) através de Índices estatísticos básicos: Erro Médio (ME), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e Índice de concordância (d). 73
7.1	Localização dos subdomínios selecionados sobre o continente da América do Sul (AS). 80
7.2	Configuração do modelo BAM utilizada para realizações das simulações. 81
7.3	Sumário das variáveis simuladas e dados observados usados para comparações das simulações. 83

7.4	Diferenças médias das variáveis de superfície referentes ao verão de 2014-2015 para às quatro regiões da América do Sul.	110
7.5	Diferenças médias dos padrões atmosféricos referentes ao verão de 2014 – 2015 para às quatro regiões da América do Sul.	117
7.6	Diferenças médias das variáveis de superfície referentes ao verão de 2011 – 2012 para às quatro regiões da América do Sul.	122
7.7	Diferenças médias dos padrões atmosféricos referentes ao verão de 2011 – 2012 para às quatro regiões da América do Sul.	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAS	–	Alta do Atlântico Sul
AB	–	Alta da Bolívia
ACP	–	Análise de Componentes Principais
Ara	–	Arbusto aberto
Ard	–	Arbusto denso
AS	–	América do Sul
APS	–	Alta do Pacífico Sul
BAM	–	Modelo Atmosférico Global Brasileiro
BRF	–	Biomassa de raízes finas
C	–	Carbono
CAM3	–	<i>Community Atmosphere Model</i>
CBNV	–	cobertura de nuvem
Ce	–	Cerrado
CC	–	Círculo de correlação
CLP	–	Camada limite planetária
CPC	–	<i>Climate Prediction Center</i>
CPTEC	–	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
De	–	Deserto
DEZ	–	Dezembro
DISC	–	<i>Data and information Services Center</i>
DTB	–	Profundidade superficial até o leito rochoso
DIV850	–	Divergência de umidade em 850 hPA
DIV200	–	Divergência de umidade em 200 hPA
DJF	–	Dezembro-janeiro-fevereiro
ECMWF	–	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENOS	–	El Niño Oscilação Sul
ESRL	–	<i>Earth System Research Laboratory</i>
FRED	–	<i>Fine Root Ecology Database</i>
FDBo	–	Floresta decídua boreal
FDTe	–	Floresta decídua temperada
FDTr	–	Floresta decídua tropical
FEV	–	Fevereiro
Fm	–	Floresta mista
FRF	–	Fração de raízes finas
FSVBo	–	Floresta sempre verde boreal
FSVTea	–	Floresta sempre verde temperada/folhas agulhas
FSVTel	–	Floresta sempre verde temperada/folhas largas
FSVTr	–	Floresta sempre verde tropical
G	–	Fluxo de calor no solo
Ge	–	Deserto polar/Gelo

GES	–	<i>Goddard Earth Sciences</i>
GLDAS	–	<i>Global Data Assimilation System</i>
GloSea5	–	<i>Global Seasonal Forecast System</i>
GPCP	–	<i>Global Precipitation Climatology Project</i>
GPP	–	Produtividade Primária Bruta
H	–	Fluxo de calor sensível
IBIS	–	<i>Integrated Biosphere Simulator</i>
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISRIC	–	<i>World Soil Information</i>
J97	–	Parametrização de raízes finas proposta por Jackson et al. (1997)
JBN	–	Jato de baixos níveis
JJA	–	Junho-julho-agosto
LE	–	Fluxo de calor latente
LAI	–	Índice de Área Foliar
M21	–	Nova parametrização de raízes finas
MAR	–	Março
MAM	–	Março-abril-maio
MMQ	–	Método de Mínimos Quadrados
NASA	–	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NEB	–	Nordeste brasileiro
NCEP	–	<i>National Centers for Environmental Predictions</i>
NOAA	–	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NPP	–	Produtividade Primária Líquida
ORNL	–	<i>Oak Ridge National</i>
Pa/Es	–	Pastagem/Estepe
PFT	–	Tipo Funcionais de Plantas
PREC	–	Precipitação
PSL	–	<i>Physical Sciences Laboratory</i>
q	–	Umidade específica
RMSE	–	Erro Quadrático Médio
RN	–	Saldo de radiação
ROL	–	Radiação de Onda Longa
SAGE	–	<i>Center for Sustainability and the Global Environment</i>
SON	–	Setembro-outubro-novembro
T2MT	–	Temperatura a 2 metros
TS	–	Temperatura da superfície
TSM	–	Temperatura da Superfície do Mar
Tu	–	Tundra
US	–	Umidade do solo
USSL	–	Umidade do solo na camada de superfície
UZDS	–	Umidade do solo na zona de drenagem
UZRS	–	Umidade do solo na zona das raízes

USGS	–	<i>US Geological Survey</i>
V850	–	Escoamento do vento em 850 hPA
V200	–	Escoamento do vento em 200 hPA
VV500	–	Velocidade vertical em 500 hPA
VCAN	–	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
wgt	–	função peso
WRF	–	<i>Weather Research and Forecasting</i>
ZCAS	–	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	–	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura da tese	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 Parametrizações das distribuições de raízes no solo	7
2.2 Características dos eventos El Niño e La Niña	9
2.3 Impacto da inicialização da umidade do solo na modelagem solo-atmosfera	11
3 DESCRIÇÃO DOS DADOS	15
3.1 <i>Climate Prediction Center</i> (CPC)	15
3.2 Dados do satélite MODIS/Terra	15
3.3 FLUXNET	16
3.4 Profundidade do solo	16
3.5 <i>Global Data Assimilation System</i> (GLDAS)	16
3.6 <i>Global Precipitation Climatology Project</i> (GPCP)	17
3.7 ERA5	17
3.8 Temperatura da Superfície do Mar (TSM)	17
4 DESCRIÇÃO DO MODELO IBIS (<i>Integrated Biosphere Simulator</i>)	19
4.1 Parametrização de raízes finas do modelo IBIS	21
5 UM NOVO MÉTODO PARA ESTIMATIVA DO PERFIL DE RAÍZES FINAS	23
5.1 Metodologia	23
5.1.1 Conjunto de dados de biomassa de raízes finas (BRF)	23
5.1.2 Boxplot	26
5.1.3 Análise de Componentes Principais (ACP): Círculo de correlação (CC)	27
5.1.4 Regressão linear múltipla	28
5.1.5 Análise de regressão linear	31
5.1.6 Distribuição de <i>Weibull</i>	31

5.2	Resultados	33
5.2.1	Variabilidade dos dados de biomassa de raízes finas (BRF)	33
5.2.2	Análise da contribuição de fatores ambientais na biomassa de raízes finas	35
5.2.3	Desenvolvimento da nova parametrização de raízes finas	39
5.2.3.1	1ª Etapa: Estimativa da biomassa de raízes finas (BRF)	40
5.2.3.2	2ª Etapa: Cálculo da função peso	43
5.2.3.3	3ª Etapa: Fração de raízes finas em cada camada de solo	43
5.3	Discussão	48
5.4	Conclusão	50
6	IMPLEMENTAÇÃO DA NOVA PARAMETRIZAÇÃO DE RAÍZES FINAS NO MODELO IBIS-CPTEC	53
6.1	Metodologia	53
6.1.1	Área de estudo	53
6.1.2	Descrição dos experimentos	57
6.1.3	Avaliação da nova parametrização	59
6.2	Resultados	60
6.2.1	Simulações das distribuições de raízes finas	60
6.2.2	Efeitos da nova parametrização de raízes finas nos ciclos anuais dos fluxos de superfície	64
6.2.3	Efeito da nova parametrização de raízes finas nos ciclos diurnos de RN, α , H e LE	66
6.2.4	Avaliação dos índices estatísticos dos experimentos	70
6.3	Conclusão	73
7	EFEITO DA NOVA PARAMETRIZAÇÃO DE RAÍZES FINAS NOS PADRÕES ATMOSFÉRICOS DA AMÉRICA DO SUL	77
7.1	Metodologia	77
7.1.1	Descrição do Modelo Atmosférico Global Brasileiro (BAM)	77
7.1.2	Implementação realizada no modelo BAM	79
7.1.3	Área de estudo	79
7.1.4	Descrição dos experimentos	80
7.1.5	Validação das simulações	82
7.1.6	Teste estatístico: t-Student	83
7.2	Resultados	85
7.2.1	Avaliação do impacto da nova parametrização de raízes finas em simulações climáticas e sazonais	85
7.2.1.1	Precipitação (PREC)	85

7.2.1.2	Temperatura do ar a 2 metros da superfície (T2MT)	89
7.2.1.3	Escoamento do vento em 850 hPa (V850)	92
7.2.1.4	Escoamento do vento em 200 hPa (V200)	96
7.2.1.5	Umidade do solo (US)	100
7.2.2	Análise de variáveis de superfície e padrões atmosféricos sobre a América do Sul durante o verão de eventos de El Niño e La Niña	104
7.2.3	Caso 1: Ano de El Niño no verão da América do Sul (2014/2015) . . .	105
7.2.3.1	Resposta da superfície continental à nova parametrização de raízes finas	105
7.2.3.2	Resposta dos padrões atmosféricos à nova parametrização de raízes finas	110
7.2.4	Caso 2: Ano de La Niña no verão da América do Sul (2011/2012) . . .	117
7.2.4.1	Resposta da superfície continental à nova parametrização de raízes finas	117
7.2.4.2	Resposta dos padrões atmosféricos à nova parametrização de raízes finas	122
7.2.5	Discussão	128
7.2.6	Impacto da inicialização da umidade do solo na precipitação e temperatura do ar (2 metros)	130
7.3	Conclusão	133
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
	APÊNDICE A - CAMPOS MÉDIOS SAZONAIS SIMULADOS COM O MODELO BAM-3D-M21.	167

1 INTRODUÇÃO

As raízes finas (<2 mm) realizam importante papel nos estudos das interações entre solo-vegetação-atmosfera, visto que o sistema radicular conecta a superfície do solo à atmosfera por meio das trocas de umidade e energia entre vegetação-atmosfera. Elas possuem a função de absorver água e nutrientes do solo e, desta forma, influenciam nos ciclos de carbono (C) e água (WANG et al., 2016).

A distribuição de raízes dos diversos tipos de plantas, podem ter uma grande influência nas simulações das trocas de umidade e energia entre a superfície-atmosfera (WARREN et al., 2015). Esta influência está relacionada à evapotranspiração e quantidade de água armazenada no solo, que como resultado, pode limitar a previsibilidade de modelos atmosféricos (SÖRENSSON; BERBERY, 2015).

Várias parametrizações de raízes finas foram desenvolvidas com diferentes suposições, complexidade e parâmetros (JACKSON et al., 1996; JACKSON et al., 1997; VRETTAS; FUNG, 2015; WANG et al., 2016; VRETTAS; FUNG, 2017). No entanto, a real distribuição de raízes no solo continua sendo um desafio para a modelagem numérica. A falta de registros de dados de raízes finas para diferentes regiões do globo é o maior desafio enfrentado pela comunidade científica para uma melhor representação dos processos físicos. Devido à complexidade de medir a distribuição de raízes ao longo das camadas do solo, os modelos de superfície utilizam parametrizações simplificadas invariantes no espaço e no tempo, essas simplificações resultam em um fracionamento constante de raízes em cada camada do solo (JACKSON et al., 1996; ZENG, 2001; WANG et al., 2016).

A carência de informações e o número de variáveis medidas relacionadas ao enraizamento das raízes finas dificultam a formulação de equações e modelos matemáticos para representar a dinâmica de raízes finas. Os primeiros modelos de superfície não possuem um detalhamento realista do comportamento das raízes finas (PITMAN, 2003). Conforme a literatura os atuais modelos de superfície, representam a parametrização de raízes finas através de uma distribuição estatística e fixa para todos os biomas (JACKSON et al., 1997; SCHENK; JACKSON, 2002b; HARTMANN; WILPERT, 2014).

A hipótese de que o perfil vertical da distribuição e a profundidade de raízes não alteram com o tempo, pode ser apropriada para simulações da dinâmica dos balanços de água e energia durante um curto período (CHEN et al., 2017). Estas limitações na parametrização da distribuição de raízes, dependem apenas dos tipos de vegetações e,

consequentemente, limitam a aplicação de ambientes futuros e mudanças ambientais, a validação do modelo, a determinação da transpiração das plantas e outras variáveis (WARREN et al., 2015).

De acordo com Canadell et al. (1996) e Liu et al. (2011) as raízes de cada tipo de bioma difere na biomassa, na distribuição vertical, no diâmetro e na profundidade máxima. Para representar os impactos dessas diferenças na distribuição de raízes na absorção de água, é necessário utilizar parâmetros específicos de distribuição de raízes para cada tipos funcionais de plantas (PFTs, sigla em inglês) representada pelo modelo. Sendo assim, um bom entendimento do comportamento desses parâmetros é essencial para modelar o fluxo de água e energia, produtividade e desenvolvimento da planta.

Os modelos de superfície continental foram projetados para serem acoplados com modelos atmosféricos ou hidrológicos, e são ferramentas importantes para analisar, monitorar e prever a evolução dos balanços hídricos e de energia em várias escalas de tempo (BOONE et al., 2004; GARRIGUES et al., 2015). Com os avanços tecnológicos e da ciência na área da meteorologia, o aperfeiçoamento dos modelos de superfície levou a estimativas mais precisas de fluxos de energia e umidade (DUNBABIN et al., 2013). Entretanto, as representações das propriedades físicas do solo e do sistema de raízes são simplificadas, o que podem gerar grande parte das discrepâncias desses modelos e explicar a maioria dos erros entre modelos acoplados de superfície-atmosfera (WANG et al., 2016).

Atualmente, apesar do bom desempenho dos modelos matemáticos na representação das trocas de energia entre a superfície e a atmosfera, o comportamento das raízes finas pode provocar mudanças nas simulações dos fluxos de energia, devido esse comportamento não ser representado nos modelos de superfície (DUNBABIN et al., 2013). Assim, investigar como o enraizamento de raízes finas influenciará os sistemas atmosféricos é uma questão científica ainda em aberto.

Diversos estudos têm sido realizados com modelo de superfície acoplado à modelo atmosférico para melhor representar os processos físicos (GARUMA, 2018; VOGEL et al., 2018; DECHARME et al., 2019; ZHOU et al., 2019). Entretanto, as imprecisões dos modelos geram dúvidas que necessitam ser respondidas e melhor exploradas. Entre elas, surgem questionamentos sobre as representações das propriedades físicas do solo e o processo de enraizamento das raízes finas. Interações entre superfície e atmosfera tem sido estudadas através da umidade do solo (SCHWINGSHACKL et al., 2018; LINDEN et al., 2019; GREEN et al., 2019; ZHOU et al., 2021; DIRO et al., 2021).

A umidade do solo controla principalmente as trocas de energia e umidade entre o sistema solo-vegetação-atmosfera através da sua influência direta na temperatura e fluxo de calor no solo (difusão de calor) (PURDY et al., 2018). Diante disso, é importante avaliar se uma representação realista da distribuição de raízes finas melhora a estimativa da umidade do solo.

Assim, diversas questões científicas necessitam de respostas, por exemplo: quais os efeitos diretos e indiretos de variáveis climáticas e parâmetros físicos do solo na dinâmica de raízes finas? Como e até que ponto uma boa representação da distribuição de raízes finas contribui para um melhor entendimento da umidade do solo? E como a variabilidade das trocas de energia entre superfície atmosfera, induzida pela dinâmica de enraizamento, pode influenciar os fenômenos meteorológicos, principalmente os sistemas convectivos?

1.1 Justificativa

Existem várias questões científicas levantadas que justificam a elaboração deste trabalho. Uma delas, é a necessidade de testar hipóteses que precisam ser avaliadas com observação de novos processos físicos relacionados à dinâmica das raízes finas, devido à importância das raízes nos estudos das interações solo-vegetação-atmosfera. Assim, gera a urgência de desenvolver e implementar uma nova parametrização da distribuição de raízes finas em modelos de superfície, que consiga representar a dinâmica das raízes finas às condições ambientais e, a disponibilidade de água e nutrientes. Com isso, algumas questões científicas que associem o comportamento da dinâmica de enraizamento com fenologia, biogeoquímica do solo, vegetação e variáveis climáticas possam ser respondidas.

Assim, se aprofundar em novos métodos para melhorar a representação do perfil de raízes nos modelos de superfície ainda é um desafio para a comunidade científica. Portanto, é de extrema importância pesquisar novas metodologias que sejam flexíveis a parâmetros que tenham influência direta e indireta no desenvolvimento de raízes finas, para melhorar a representação do perfil de raízes nos modelos de superfície.

Uma descrição mais realística da distribuição de raízes finas pode melhorar a simulação do estresse de umidade do solo para a transpiração e, conseqüentemente, a previsibilidade de sistemas meteorológicos com influência direta do teor de água no solo. Assim, pode-se analisar o impacto de memória das trocas de energia entre a superfície e a atmosfera devido à umidade do solo. Por fim, responder à questão científica de como a variabilidade dos fluxos de superfície induzido pela dinâmica de

enraizamento irá influenciar na caracterização dos sistemas convectivos.

Em meio a esta contextualização, este estudo possui um caráter prático, visto que serão utilizadas ferramentas que permitirão a representação e análise de condições hipotéticas que não podem ser medidas ou reproduzidas em experimentos de campo de diversas regiões do planeta.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma nova parametrização dinâmica de raízes finas em função de fatores ambientais, fenologia da vegetação e profundidade do solo. Visando melhorar as simulações dos fluxos de energia no modelo de superfície IBIS-CPTEC e analisar os impactos nos padrões atmosféricos da América do Sul.

Para que este objetivo principal seja alcançado, alguns objetivos específicos se fazem necessários:

- Identificar os efeitos diretos e indiretos dos parâmetros da fenologia das plantas e das variáveis climáticas na simulação do comportamento da biomassa de raízes finas sob diferentes biomas;
- Obter uma representação matemática de raízes finas, que seja capaz de se adaptar às condições ambientais, em função da alocação de carbono de raízes finas, e consiga simular os processos que ocorrem entre a superfície e a atmosfera (microescala) de forma consistente com dados observados;
- Determinar o desempenho da nova parametrização de raízes finas implementada no modelo BAM-IBIS, baseando-se em análises sazonais, padrões de superfície e atmosféricos da América do Sul;
- Investigar o efeito das inicializações da umidade do solo com a nova parametrização de raízes finas nas simulações da precipitação e temperatura do ar.

1.3 Estrutura da tese

Esta tese está organizada em 8 capítulos, da seguinte maneira:

- **Capítulo 1:** apresentou uma introdução acerca das parametrizações de raízes finas e suas limitações, modelos de superfície continental, como as

raízes finas influenciam na modelagem dos fluxos de superfície e o desafio da comunidade científica para representar as distribuições de raízes finas no solo, justificativa e objetivo deste estudo.

- **Capítulo 2:** aborda os temas mais relevantes para este estudo, como: as principais parametrizações e bancos de dados de raízes finas; as principais informações sobre os eventos El Niño e La Niña e suas aplicações; estudos sobre o impacto da inicialização da umidade do solo.
- **Capítulo 3:** mostra a descrição dos dados utilizados em todo o trabalho. É apresentado o período de disponibilidade dos dados, plataforma para *download* e resoluções.
- **Capítulo 4:** apresenta uma descrição detalhada do modelo de superfície IBIS (*Integrated Biosphere Simulator*) e seus principais módulos de operação. Além disso, é apresentada a estrutura da atual parametrização de raízes finas (JACKSON et al., 1997) utilizada pelo IBIS. São abordados as limitações do ponto de vista numérico, associadas ao uso desta parametrização.
- **Capítulos 5, 6 e 7:** referem-se aos capítulos de resultados. O Capítulo 5 apresenta todo o desenvolvimento da nova parametrização de raízes finas. O Capítulo 6 é referente a implementação da nova parametrização de raízes finas no modelo IBIS (*off-line*) e testes de sensibilidade. No Capítulo 7, a nova parametrização de raízes finas é incorporada a estrutura de modelagem do modelo BAM-IBIS e avaliado seus efeitos nos padrões atmosféricos e de superfície. Cada capítulo apresenta metodologias, resultados, discussões e conclusões.
- **Capítulo 8:** mostra as considerações finais desta tese, trazendo um resumo e tentando responder às perguntas científicas através dos resultados obtidos neste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado um pouco do conhecimento sobre parametrizações de distribuição de raízes, descrição dos efeitos dos fenômenos de El Niño e La Niña, e o impacto da umidade do solo na previsão numérica.

2.1 Parametrizações das distribuições de raízes no solo

A dinâmica da distribuição de raízes é de fundamental importância para a modelagem hidrológica, ecológica e climática. Visto que é uma variável prevista ou forçada na maioria dos modelos de superfície terrestre (MATAMALA; STOVER, 2013; IVERSEN, 2014). Gale e Grigal (1987) organizaram a partir de 19 artigos publicados um banco de dados de medidas de biomassa de raízes, número, comprimento e diâmetro da profundidade do solo para espécies de árvores do Hemisfério Norte. Implantaram uma função não-linear para o ajuste dos dados baseados na profundidade do solo. O coeficiente de profundidade (β) foi considerado uma medida do perfil de distribuição vertical de raízes e usado como uma variável de resposta para testar se diferenças significativas nas distribuições verticais de raízes existiam entre as classes de vegetação estudadas.

Dando continuidade ao estudo das distribuições de enraizamento das plantas, Jackson et al. (1996) afirmaram que para compreender e analisar o funcionamento do ecossistema (fluxos de carbono e água) e a função dos solos no armazenamento de carbono, é necessária uma avaliação precisa das distribuições de raízes no solo de acordo com cada tipo de bioma. Portanto, foi realizada uma revisão de literatura, onde analisaram padrões de raízes para vários grupos funcionais de plantas. Selecionaram 115 perfis de raízes, divididos em 11 biomas e ajustaram o coeficiente de profundidade (β) para cada bioma, baseado na equação proposta por Gale e Grigal (1987).

Diferente da pesquisa anterior, Jackson et al. (1997) através de um conjunto de dados de 253 estudos de campos, calcularam a distribuição de raízes finas. Estimaram a biomassa das raízes, comprimento, área de superfície e teor de nutrientes. Por fim, propuseram uma formulação para estimar a distribuição de raízes finas por profundidade.

Após alguns anos, Zeng (2001) afirmou que distintas parametrizações da distribuição total de raízes são utilizados em diferentes modelos e que a profundidade máxima de enraizamento nos modelos não concorda com as observações, devido a cada modelo

apresentar quantidades diferentes de camadas de solo. Portanto, foi desenvolvida uma única parametrização para ser utilizada nos modelos: *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* (BATS), *International Geosphere-Biosphere Program* (IGBP) e *Simple Biosphere Model* (SiB2). Schenk e Jackson (2002a) ampliaram o banco de dados de 115 para 575 perfis verticais de raízes, distribuídos em 209 regiões do globo e ajustado a uma curva logística sensível a perturbações (*dose-response curve*). Ainda foi analisado como fatores climáticos, do solo e propriedades das plantas afetam as distribuições verticais de raízes no solo.

Recentemente, Hartmann e Wilpert (2014) identificaram como os padrões de raízes finas de algumas espécies de árvores decíduas e coníferas (específicas da Alemanha) são influenciados pelas propriedades da região e físicas do solo. Sugeriram uma parametrização de distribuição de raízes e compararam sua proposta com a de Gale e Grigal (1987). Esta nova parametrização é em função da profundidade do solo generalizada para cada espécie de planta. Os resultados mostraram que as parametrizações representam as raízes finas semelhantemente, sendo uma resposta de como as árvores se adaptam às condições físicas da região e hidrológicas do solo.

Fan et al. (2016) compilaram um banco de dados de 96 perfis de raízes referentes a 11 culturas de regiões temperadas e ajustaram o padrão de distribuição de raízes. Para a estimativa do perfil de raízes, utilizaram a equação utilizada por Schenk e Jackson (2002a). Ainda neste ano, Wang et al. (2016) implementaram uma nova parametrização da distribuição de raízes no modelo CLM4.5, que descreve o crescimento da raiz em função da disponibilidade hídrica e de nitrogênio (N) no solo. Foram investigados os impactos da distribuição dinâmica de raízes na modelagem eco-hidrológica na Amazônia. Os resultados mostraram que as respostas da vegetação a seca sazonal foram melhoradas com a nova parametrização.

Iversen et al. (2017) compilaram um banco de dados com mais de 105.000 observações de mais de 300 características de raiz, denominado FRED (*Fine Root Ecology Database*). Esse conjunto de dados facilitou a quantificação de variação de raízes finas em espécies, biomas, gradientes ambientais, dentre outros.

Vrettas e Fung (2017) desenvolveram um modelo baseado em uma parametrização de condutividade hidráulica a partir de Vrettas e Fung (2015), para explorar a sensibilidade da transpiração das plantas ao armazenamento de água no solo, em função da profundidade e funcionamento das raízes. Entretanto, utilizaram a profundidade do solo constante. A parametrização é em função da condutividade hidráulica, eficiência de absorção de água da raiz e redistribuição hidráulica pelas raízes das plantas.

Os resultados das simulações mostraram que a redistribuição hidráulica pelas raízes das plantas é impactante na estação seca.

Recentemente, [Neumann et al. \(2020\)](#) atualizaram o banco de dados de biomassa de raízes finas e mortas para florestas europeias. Realizaram comparações da produção e biomassa de raízes finas com estimativas de 19 modelos diferentes. As variáveis de entradas dos modelos foram: produtividade primária líquida (NPP), folhagem, biomassa acima do solo, índice de área foliar (IAF), latitude e tipo de cobertura do solo. Por fim, foi analisado se o desempenho poderia ser melhorado ajustando novos modelos de regressão linear múltipla. Concluíram que os novos modelos podem ser utilizados para estimar parâmetros de raízes finas na Europa, como também são úteis para selecionar modelos de biomassa de raízes finas em biomas de florestas semelhantes em outras regiões.

2.2 Características dos eventos El Niño e La Niña

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) é categorizado como um fenômeno de grande escala que acontece no Oceano Pacífico Equatorial. É formado pelos eventos de El Niño e La Niña. O ENOS relaciona-se às ocorrências onde o oceano Pacífico Equatorial está mais quente (El Niño) ou mais frio (La Niña) do que a normal climatológica ([TIMMERMANN et al., 2018](#)). O fenômeno ENOS ocorre devido uma alteração na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) que influencia a umidade do ar, pressão e direção dos ventos, conseqüentemente, causa uma modificação nos padrões atmosféricos resultando em diferentes efeitos ao redor do globo ([CAI et al., 2021](#)).

Em anos de evento de El Niño os ventos alísios se enfraquecem e com isso ocorre um aquecimento anômalo das águas superficiais do oceano Pacífico Equatorial ([LIN; QIAN, 2019](#)). No Brasil, os efeitos durante a ocorrência de El Niño são bastante variados, pois algumas regiões ocorrem secas extremas, em outras elevadas temperaturas ou chuvas intensas (Tabela 2.1).

A La Niña se caracteriza por um resfriamento das águas e um aumento da pressão atmosférica na região leste do Oceano Pacífico. Em anos de eventos de La Niña os ventos de superfície do oceano Pacífico Equatorial são mais intensos, provocando o resfriamento da maior parte dessa região. Assim como o El Niño, o fenômeno La Niña afeta os padrões de circulação atmosférica, alterando a temperatura e a precipitação em diversas regiões do mundo ([ZHONGMING et al., 2021](#)). Deste modo, os movimentos descendentes do ar na região centro-leste do Oceano Pacífico inibem

a formação de nuvens (ANDREOLI et al., 2019). A Tabela 2.2 resume os efeitos do fenômeno La Niña no Brasil.

Tabela 2.1 - Resumo da influência do El Niño no Brasil.

Região	El Niño
Norte	Leste e norte da Amazônia: Redução da precipitação
Nordeste	Central e norte: secas de diversas intensidades Sul e oeste: não são significativamente afetados
Centro-Oeste	Sul do Mato Grosso do Sul: possibilidade de chuvas acima da média e temperatura elevadas
Sudeste	Aumento moderado das temperaturas médias
Sul	Aumento da temperatura média e aumenta da precipitação

FONTE: Cai et al. (2020).

Tabela 2.2 - Resumo da influência da La Niña no Brasil.

Região	La Niña
Norte	Amazônia: Aumento da precipitação
Nordeste	Aumento da precipitação
Centro-Oeste	Tendência de estiagem
Sudeste	Não há mudança significativa
Sul	Estiagem em toda região (principalmente no inverno)

FONTE: Andreoli et al. (2019).

Lima e Nunes (2018) analisaram como às três fases de El Niño, La Niña e Neutra alteram o balanço do vento térmico na América do Sul (AS). Utilizaram dados de reanálise II do *National Centers for Environmental Predictions* (NCEP) (1981 – 2010). Os resultados mostram que em períodos de La Niña, o jato apresenta-se mais intenso no inverno. Em ano de El Niño, o jato é mais intenso no verão e na primavera sobre latitudes médias do oceano Pacífico e na costa oeste da AS.

Moura et al. (2019) verificaram o comportamento da precipitação, temperatura e evapotranspiração na bacia do rio Amazonas em anos de eventos de El Niño e La Niña, para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2016. Os resultados mostraram que houveram alterações nas variáveis estudadas devido ao efeito dos fenômenos,

sendo a evapotranspiração a mais afetada. Em anos de La Niña houve um aumento da precipitação e em anos de El Niño ocorreu uma redução.

Medeiros et al. (2020) investigaram a relação entre os índices pluviométricos em anos de El Niño e La Niña no município de São Bento do Una. Utilizaram séries mensais e anuais de precipitação referentes a anos isolados de El Niño e La Niña. Os resultados mostraram que durante o El Niño, a precipitação aumentou 60% (2009) e 58,3% (2010) do que a normal climatológica da região. Nos anos de La Niña, houve um aumento da precipitação de 28,5% (2000) e 27,2% (2008). Concluíram que a atuação dos fenômenos não influenciou nos índices pluviométricos da região.

Santos et al. (2021) analisaram a variabilidade espaço-temporal de períodos secos e chuvosos na Bacia do Rio Paraná e sua relação com o evento El Niño. Utilizaram dados de precipitação de 1982 – 2016. Em resumo, na Bacia do Rio Paraná, em eventos de El Niño houve um aumento da precipitação e uma redução em anos de La Niña.

2.3 Impacto da inicialização da umidade do solo na modelagem solo-atmosfera

O impacto da umidade do solo na superfície terrestre e nos processos atmosféricos tem recebido grande atenção nos estudos hidrológicos e climáticos de grande escala. Sörensson e Berbery (2015) argumentam que a umidade do solo afeta a atmosfera através da evapotranspiração, tendo um papel importante no ciclo hidrológico. Esse processo envolve a evaporação do solo (continentes, rios, lagoas, oceanos, etc) e da água interceptada pela vegetação, e a transpiração das plantas.

Segundo Zaitchik et al. (2013) e Husain et al. (2014) a taxa de umidade do solo afeta a partição de energia total disponível na superfície do solo, disponível para o fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (LE), afetando as condições atmosféricas próximas à superfície. Santanello et al. (2011) afirmam que variações na temperatura do solo e no vapor de água, provocadas pela umidade do solo, também podem afetar a estrutura da camada limite planetária (CLP), a formação de nuvens rasas, volumes de precipitação e os campos de vento.

Dessa forma, a umidade do solo é um preditor do clima, sendo a resposta da evapotranspiração à umidade do solo uma condição necessária para uma boa previsibilidade de curto a médio prazo. Como resultado, a variável da umidade do solo foi incorporada em alguns modelos de superfície-atmosfera, e com isso explorado a

importância da persistência da umidade do solo entre o solo e atmosfera, e o impacto nos sistemas atmosféricos para a previsão numérica (LEUNG et al., 2011; ZAMPIERI et al., 2012).

A umidade do solo que influencia a conexão entre o sistema solo-atmosfera. A memória de umidade do solo é o tempo em que a anomalia de umidade é detectável e durante a qual ela pode afetar a atmosfera, com variação temporal, espacial e de profundidade. Em outras palavras, a memória de umidade do solo se refere a quanto tempo leva para a umidade do solo influenciar o tempo e o clima (SONG et al., 2019).

Rahman et al. (2015) explicam como a memória da umidade do solo influencia na evapotranspiração. Em uma região/estação com forte acoplamento entre a umidade do solo e a evapotranspiração, anomalia na umidade do solo irá causar uma grande anomalia de evapotranspiração. Quando não ocorre precipitação, a taxa de evapotranspiração elevada fará com que ocorra uma diminuição da umidade do solo rapidamente e, conseqüentemente, a memória da umidade do solo será mais curta. Em contrapartida, uma menor taxa de evapotranspiração e um acoplamento mais fraco provoca uma memória mais longa.

Segundo Yang et al. (2011), em modelos climáticos e hidrológicos são necessários perfis de umidade do solo confiáveis e de alta resolução, para isso os modelos de superfície devem ser inicializados com condições de superfície de valores observados e executados sob forçamento externo. O modelo precisa passar por um período de ajuste, denominado *spin-up*, para alcançar um estado de equilíbrio entre os fluxos de superfície simulados e forçamento externo. Ainda, afirmam que o tempo de *spin-up* depende da capacidade total de retenção de umidade, dos valores iniciais de umidade, intensidade da precipitação, radiação solar, cobertura vegetal e resistência estomática, profundidade do solo, etc.

Estudos mostram que os processos de superfície terrestre, em regiões de forte interação entre solo-atmosfera e memória da umidade do solo, podem contribuir para uma melhor previsão numérica (KOSTER et al., 2010; RESENDE, 2014). Candido (2002) avaliou a influência da condição inicial de água no solo na simulação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), utilizando o modelo acoplado ETA-SSiB. Foram realizados vários experimentos com diferentes condições iniciais de água no solo, os resultados mostraram alterações nos perfis termodinâmicos, regime de precipitação, escoamento e balanço de radiação na superfície.

Meng e Quiring (2010) estudaram como as anomalias de umidade do solo da prima-

vera influenciam na precipitação de verão, usando o *Community Atmosphere Model* (CAM3). Os resultados apresentaram que existem diferenças consideráveis na resposta da precipitação dependendo do momento, sinal e magnitude das anomalias de umidade do solo de primavera.

Roundy et al. (2013) apresentaram a importância das condições de umidade do solo e do acoplamento superfície-atmosfera no acompanhamento e previsão de secas (estudo feito no sudeste dos Estados Unidos). Resende (2014) apresentou a atuação da umidade do solo e tipo de solo na previsão sazonal de extremos climáticos, utilizando o modelo regional ETA. MacLeod et al. (2016) mostrou a importância da inicialização da umidade do solo para a previsão climática. Além disso, a influência de parâmetros hidráulicos na geração da memória da umidade do solo, utilizando o modelo de superfície H-TESEL (*off-line*).

Seo et al. (2019) avaliaram como a inicialização da umidade do solo poderia melhorar o desempenho da previsão do modelo *Global Seasonal Forecast System* versão 5 (GloSea5) em simular a temperatura do ar em superfície durante o verão da América do Norte. As simulações foram realizadas para o período de 1996 – 2010. Os resultados mostraram que o modelo pode apresentar uma melhora significativa ao utilizar condições iniciais realistas da superfície terrestre.

Zhang et al. (2020) investigaram os impactos da inicialização da umidade do solo nas previsões do modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) em Xinjiang, China. Foram realizadas duas simulações, a primeira das 12:00 UTC de 15 a 18 de agosto de 2019, em Urumchi, Xinjiang (43,78° N, 87,6° E); e outra simulação em Xinjiang de 0000 UTC de 15 de agosto a 1200 UTC de 18 de agosto de 2019. Os resultados mostraram que quando ocorre um aumento da umidade do solo, a umidade específica também aumenta e a temperatura potencial diminui.

3 DESCRIÇÃO DOS DADOS

Neste capítulo são apresentadas as descrições de todos os dados utilizados nesta pesquisa. São detalhadas as resoluções, o período de dados disponíveis e a plataforma onde foram adquiridos. Ao longo do trabalho é mostrado como foi utilizado cada conjunto de dados.

3.1 *Climate Prediction Center (CPC)*

O banco de dados de precipitação global unificada do *Climate Prediction Center (CPC)* fornecidos pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) / Earth System Research Laboratory (ESRL) / Physical Sciences Laboratory PSL*, Boulder, Colorado, EUA, é um conjunto de produtos de precipitação (PREC) com alta quantidade e qualidade de dados, obtida através de uma combinação de todas as fontes de informações disponíveis, onde se aplica a técnica de análise objetiva de interpolação ótima (CHEN et al., 2008). Os dados globais de umidade do solo (US) são estimados por um modelo hidrológico de uma camada (*Leaky Bucket*) (HUANG et al., 1996), pertencente ao CPC. Este modelo utiliza os produtos de precipitação gerada pelo CPC e temperatura observadas como forçantes para calcular a umidade do solo, escoamento, evaporação e neve. Estes dados globais de umidade do solo possuem resolução de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, e os dados estão disponíveis de 1948 até o presente. A vantagem desse conjunto de dados é que todos os campos possuem atualizações diárias e mensais, possibilitando a sua utilização para a geração de produtos quase em tempo real. Os dados de US e PREC estão disponíveis na plataforma <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>.

3.2 Dados do satélite MODIS/Terra

Os dados de temperatura da superfície (TS), produtividade primária líquida (NPP) e índice de área foliar (LAI) foram obtidos a partir do sensor do satélite MODIS/Terra. Este satélite consegue obter imagens globais da superfície da Terra entre 1 e 2 dias. As imagens global são disponibilizadas em uma base de dados, utilizados na elaboração de produtos sobre as interações terra-atmosfera-oceano. Esta base de dados contendo as imagens globais da superfície da Terra também é utilizada na medição de propriedades das nuvens, fluxo de energia, propriedades dos aerossóis, mudanças no uso e cobertura de solo, queimadas, atividades vulcânicas, etc (WAN et al.,).

Os produtos MOD11C3 (TS), MOD17A2 (NPP) e MOD15A2 (LAI) foram extraídos

do banco de dados em uma frequência temporal mensal em uma resolução espacial para uma grade de 0,05 graus. Os produtos pertencem ao *The Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC), que tem parceria com o *US Geological Survey* (USGS) e *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), e estão disponíveis no site <https://www.usgs.gov/>.

3.3 FLUXNET

A rede de dados observados da FLUXNET foi produzida no *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) nos Estados Unidos. Os dados foram adquiridos na plataforma <http://fluxnet.fluxdata.org/>. Esse conjunto de observações FLUXNET inclui várias melhorias de controle de qualidade e processamento dos dados, como novos métodos para quantificação de incertezas e uso de dados de reanálise para preencher lacunas de registro de variáveis micrometeorológicas. Dentre os dados disponíveis, encontram-se fluxos de energia (calor sensível e latente) e medições contínuas de variáveis climáticas auxiliares (precipitação, temperatura do ar, radiação, etc) (PASTORELLO et al., 2020).

3.4 Profundidade do solo

Na maioria dos modelos de superfície, a profundidade do solo é constante para todos os tipos de solo, em razão da falta de dados observados. Para representar a profundidade do solo foi utilizado a base de dados da profundidade da superfície até o leito rochoso (em cm), disponível na plataforma *World Soil Information* (ISRIC) em <https://www.isric.org/>. Esse conjunto de dados foi estimado com base em observações extraídas de uma compilação global de dados de perfil do solo, registros de perfuração de poços e derivados de sensoriamento remoto. Uma descrição detalhada de como foi estimado esse dado é fornecida em Shangguan et al. (2017). Estudos mostram que a profundidade superficial até o leito rochoso (DTB) afeta o ciclo de energia, água e carbono e se apresenta como uma boa alternativa para representar a profundidade do solo em modelos de superfície. Peterman et al. (2014) apontam que DTB afeta o carbono e água simulados em modelos de vegetação dinâmica. Brunke et al. (2016) observou impactos significativos nas simulações de água e energia no modelo CLM4.5 após implementar dados de DTB.

3.5 *Global Data Assimilation System* (GLDAS)

Os dados do *Global Data Assimilation System* (GLDAS) foi gerado para representar campos ótimos de estados e fluxos de superfície, com base em dados observacio-

nais, sensoriamento remoto, modelagem de superfície e técnicas de assimilação de dados (RODELL et al., 2004). O GLDAS integra uma imensa quantidade de informações observacionais sendo executado globalmente em múltiplas resoluções. Parâmetros do solo são originários de conjuntos de dados globais de alta resolução. Para simular a variabilidade da escada da sub-grade, como sua base emprega-se um conjunto de dados de vegetação global de 1km. Os dados de precipitação são baseados em observações. Para forçar o modelo são empregados as melhores análises disponíveis de sistema de assimilação de dados atmosféricos. Os dados GLDAS são armazenados no site do *Goddard Earth Sciences* (GES) e *Data and Information Services Center* (DISC), com resolução de 1° e 0,25°, estão disponíveis em <https://disc.gsfc.nasa.gov/>.

3.6 *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP)

O *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) foi determinado para quantificar a distribuição espacial da precipitação em todo o globo. O conjunto de dados disponibiliza uma análise consistente de precipitação a partir da integração de vários conjuntos de dados de satélites e observados. O produto GPCP mensal abrange o período de janeiro de 1979 até o dias atuais e permite estimativas de precipitação em uma grade de latitude-longitude de 2,5° x 2,5° (ADLER et al., 2016). Os dados podem ser adquiridos no site <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.gpcp.html>.

3.7 ERA5

O conjunto de dados atmosféricos do ERA5 foi produzido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), sendo uma organização não governamental que desenvolve e explora modelos globais e sistemas de assimilação de dados. Os dados de reanálise ERA5 possuem estimativas a cada 1h, com resolução horizontal de 31 km, e em 137 níveis da superfície até uma altura de 80 km, referentes ao período de 2010 até o presente (BRÖNNIMANN, 2017). Disponíveis para download em <http://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>.

3.8 Temperatura da Superfície do Mar (TSM)

Os dados da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) obtidos da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (REYNOLDS et al., 2002; REYNOLDS et al., 2007), são produzidos a cada semana em uma grade de 1°, com cobertura global contínua referentes ao período de 1981 em diante, disponíveis para *download* em <http://www.esrl.noaa.gov/>.

4 DESCRIÇÃO DO MODELO IBIS (*Integrated Biosphere Simulator*)

O IBIS (*Integrated Biosphere Simulator*) faz parte da 4ª geração de modelos de biosfera global, foi desenvolvido por pesquisadores do *Center for Sustainability and the Global Environment* (SAGE) e aprimorado para ligar a superfície terrestre, processos hidrológicos, os ciclos biogeoquímicos terrestres a dinâmica da vegetação dentro de um único modelo numérico (FOLEY et al., 1996; FOLEY et al., 2005; KUCHARIK et al., 2000). Este modelo simula os processos da superfície terrestre (trocas de energia, água e *momentum* entre o sistema solo-vegetação-atmosfera), fisiologia do dossel (fotossíntese e condutância do dossel), fenologia da vegetação (produção de folhas e senescência), vegetação dinâmica (distribuição, reciclagem e competição entre os tipos de vegetação) e balanço de carbono terrestre (produção primária líquida, reciclagem do tecido vegetal, carbono no solo e decomposição da matéria orgânica) (KUCHARIK et al., 2000).

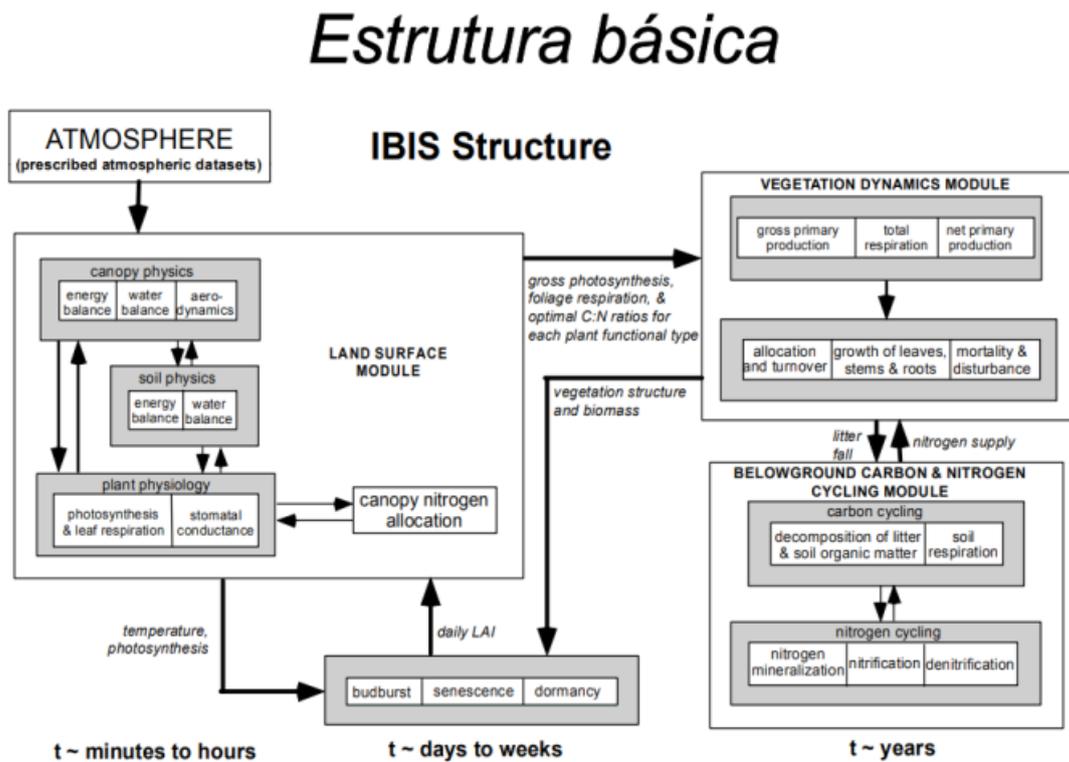
O IBIS segue uma hierarquia conceitual dividida em módulos (Figura 4.1), que operam em diferentes *time steps*. Utiliza a parametrização dos fluxos radiativos e turbulentos por meio do esquema de vegetação de duas camadas, representadas por diferentes tipos de cobertura vegetal agrupadas em tipos funcionais de plantas (PFTs, sigla em inglês), que compartilham características ecológicas importantes: árvores ou gramíneas, folhas verdes e decíduas, fotossíntese C3 e C4, e folhas largas ou agudas. Um esquema de múltiplas camadas do solo (8 camadas) para simular as variações diurnas e sazonais de calor e umidade do solo. Com profundidade total do solo de 12 metros, e espessuras das camadas aumentando com a profundidade, podendo ser modificadas. Também possui três camadas de neve usada para cobertura de neve no solo e gelo marinho (POLLARD; THOMPSON, 1995; FOLEY et al., 1996).

A precipitação pode ser interceptada pela vegetação e em seguida escorrer até o solo. A evapotranspiração é estimada como a soma da evaporação da superfície do solo, evaporação de água interceptada pela vegetação e transpiração do dossel. Características da vegetação, como índice de área foliar (LAI, sigla em inglês), fração de cobertura, albedo da folha, e outros, são obtidos do conjunto de dados de Dorman e Sellers (1989).

A taxa de transpiração é calculada individualmente para cada PFTs e depende da condutância estomática. Além disso, a taxa de transpiração depende da remoção da umidade do solo de cada camada que contém as raízes das plantas (FOLEY et al., 1996). A assimilação de CO_2 e a respiração na escala da folha são simuladas através das equações descritas por Farquhar et al. (1980). O modelo parametriza

a condutância estomática como uma função do CO_2 bruto, concentração de CO_2 na camada-limite foliar e da umidade relativa do ar (LEUNING, 1995). Já a resistência estomática é simulada em função dos PFTs, temperatura da folha, radiação solar visível incidente nas folhas e o *deficit* de pressão de vapor (FOLEY et al., 1996; KUCHARIK et al., 2000).

Figura 4.1 - Estrutura básica dos módulos do IBIS e suas características.



FONTE: Foley et al. (1996).

A radiação solar é simulada usando uma aproximação de dois fluxos dentro de cada camada de vegetação, com cálculos separados para radiação direta e difusa. O vento é modelado usando perfis logarítmicos de comprimento de mistura (em regiões livres de ar) e modelo difusivo simples (dentro das camadas de vegetação) (FOLEY et al., 1996; FOLEY et al., 2005).

Além disso, o IBIS também possui um módulo biogeoquímico do solo que considera o escoamento de nitrogênio e carbono por meio da vegetação, detritos e matéria orgânica no solo. Este módulo adota as configurações dos modelos CENTURY (PARTON

et al., 1993) e o modelo biogeoquímico proposto por Verberne et al. (1990). Kubota (2012) acoplou o modelo de superfície IBIS no MCGA–CPTEC implementando uma parametrização de camada limite baseada no modelo proposto por Holtslag e Boville (1993). As simulações de curto e longo prazo mostraram um melhor desempenho sobre a América do Sul.

4.1 Parametrização de raízes finas do modelo IBIS

A profundidade das raízes e o perfil vertical de raízes são fundamentais para calcular o ciclo da água no sistema solo-planta-atmosfera. A profundidade radicular tem uma maior influência no período seco, por está relacionada com a quantidade máxima de água disponível no solo e desempenhar um importante controle na evapotranspiração. A distribuição vertical de raízes finas é responsável pela alocação e absorção de água entre as camadas do solo em diversas profundidades (ZHENG; WANG, 2007). Portanto, a profundidade e a distribuição vertical de raízes exerce uma grande influência nas simulações dos fluxos de superfície, visto que estas propriedades das raízes afetam significativamente a umidade do solo, o escoamento e o fluxo subterrâneo de água e calor, influenciando no estresse hídrico (CAO et al., 2018). Atualmente, o modelo IBIS descreve a distribuição de raízes finas como um parâmetro estático, em função da profundidade do solo e dos tipos funcionais de plantas (PFTs). A representação do perfil de raízes no modelo IBIS foi proposta por Jackson et al. (1997), segundo a Equação 4.1.

$$Y(d) = \frac{1 - \beta^d}{1 - \beta^{d_{max}}} \quad (4.1)$$

Em que, $Y(d)$ é a fração de raízes finas em função da profundidade do solo (d) em cm; d_{max} é a profundidade máxima do solo; β é um parâmetro de distribuição de raízes finas. No entanto, estes valores são fixos para todas as classes de vegetação. Assim, uma gramínea com pouca quantidade de biomassa radicular, e uma árvore de grande porte velha com grande quantidade de biomassa radicular, são consideradas tendo a mesma fração de raízes em cada camada de solo. Na simulação J97 a profundidade do solo total foi de 12 m e os β foram 0,98 (dossel superior) e 0,97 (dossel inferior).

5 UM NOVO MÉTODO PARA ESTIMATIVA DO PERFIL DE RAÍZES FINAS

Na interação entre a atmosfera e a superfície, a dinâmica de raízes finas é geralmente definida como constante com o tempo. Entretanto, fatores físicos tais como o tipo de vegetação, solo, profundidade da camada de rochas (*bed rock*), condições ambientais, a umidade e temperatura do solo modificam a biomassa de raízes finas alterando a fração de enraizamento da vegetação. Segundo a literatura, as raízes grossas são responsáveis pela sustentação da vegetação e as raízes finas são responsáveis pela maior quantidade de água usada na transpiração das plantas (LÜTTSCHWAGER; JOCHHEIM, 2020).

Neste capítulo é apresentado uma nova parametrização de raízes finas variável no tempo e no espaço, em função da biomassa de raízes finas, profundidade do solo e condições ambientais. Diferente da atual parametrização (JACKSON et al., 1997) que possui uma única fração de raízes finas para todos os tipos de vegetação, esta nova abordagem da distribuição de raízes finas possui parâmetros específicos que modulam a fração de raízes finas para cada tipo de vegetação.

5.1 Metodologia

Neste capítulo é mostrada a metodologia utilizada para o desenvolvimento da nova parametrização de raízes finas. Desta forma, é explicado como foi gerado o banco de dados de biomassa de raízes finas observadas (BRF) e análise destes dados, e todo cálculo efetuado para a obtenção da nova parametrização.

5.1.1 Conjunto de dados de biomassa de raízes finas (BRF)

O banco de dados FRED (Fine Root Ecology Database) inclui diversas características e processos de raízes finas (IVERSEN et al., 2017), entretanto, possuem poucos dados específicos para a biomassa de raízes finas. Por este motivo, foi compilado da literatura um banco de dados de 333 espécies de árvores e arbustos, classificadas em 13 tipos de classes de vegetação do modelo IBIS (Figura 5.4 e Tabela 5.1). Os sítios apresentam diferentes características climáticas, por exemplo, a precipitação varia entre 350 mm a 4000 mm, e a temperatura varia entre -10 °C a 30 °C.

Estes dados de referências foram encontradas em artigos científicos, periódicos, capítulos de livros, relatórios e teses/dissertações, e incluem dados de todos os continentes, exceto na Antártica. Estes dados presentes nos trabalhos científicos foram pesquisados por meio da *Web of Science* e *Google Scholar*, onde foi utilizada uma

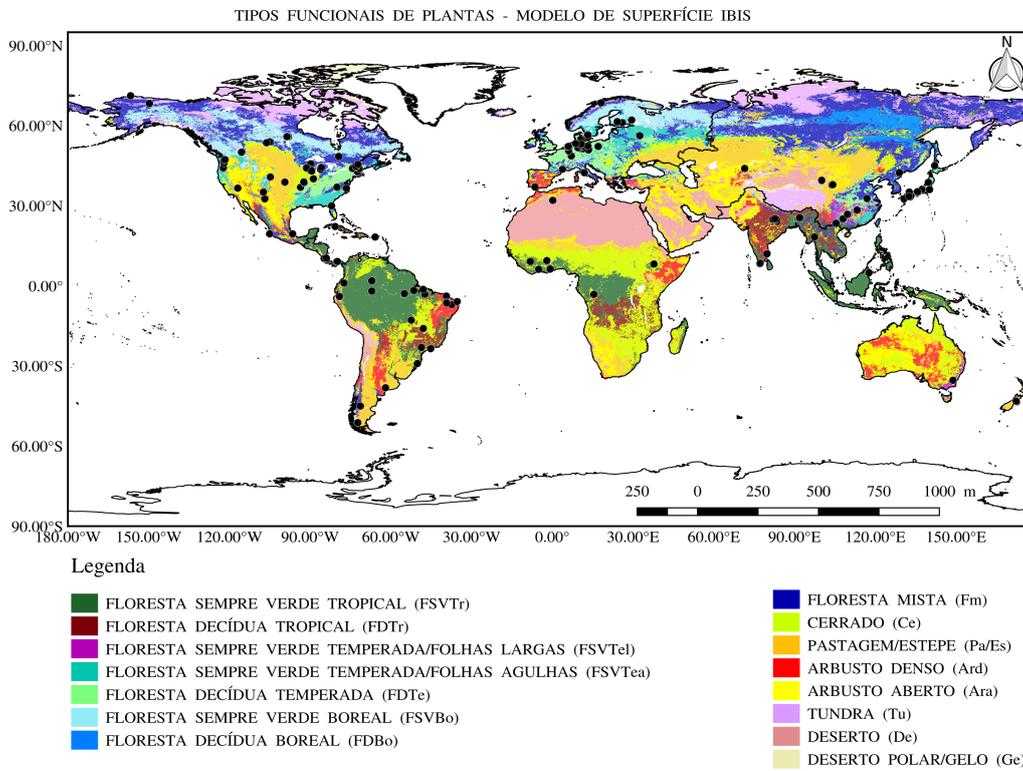
combinação de palavras-chave (inglês e português), tais como: “biomassa de raízes finas”, “raízes finas”, “produção de raízes finas”, “distribuição de raízes finas”, “perfil de raízes finas”, “morfologia de raízes finas”, “rotatividade de raízes finas”, etc.

Foram adotados critérios na seleção das publicações para evitar valores discrepantes:

- a) se a coleta de dados de biomassa de raízes finas foi realizada várias vezes no mesmo estande, utiliza-se o valor médio;
- b) alguns estudos relatam vários sítios na mesma área, nesse caso os dados foram tratados separadamente;
- c) todos os dados compilados foram retirados de artigos originais, e os dados não citados não foram utilizados para garantir a originalidade dos estudos;
- d) não foram incluídos no banco de dados de BRF valores obtidos por irrigação, corte ou fertilização.

Os dados de biomassa de raízes finas (BRF) foram convertidos em representações geográficas válidas (georreferenciadas) assim, foi possível criar *shapefile* com informações a cada ponto de grande disponível. Através do georreferenciamento foi possível analisar os efeitos diretos e indiretos dos parâmetros físicos que, segundo a literatura, exercem influência na distribuição de raízes (SEE et al., 2019; GUO et al., 2021; FU et al., 2022).

Figura 5.1 - Mapa das localizações geográficas das observações de raízes finas e Tipos de Vegetação (PFTs) do modelo IBIS.



FONTE: Elaboração da autora.

Tabela 5.1 - Tipos Funcionais de Plantas (PFTs) do modelo IBIS e seus códigos e siglas.

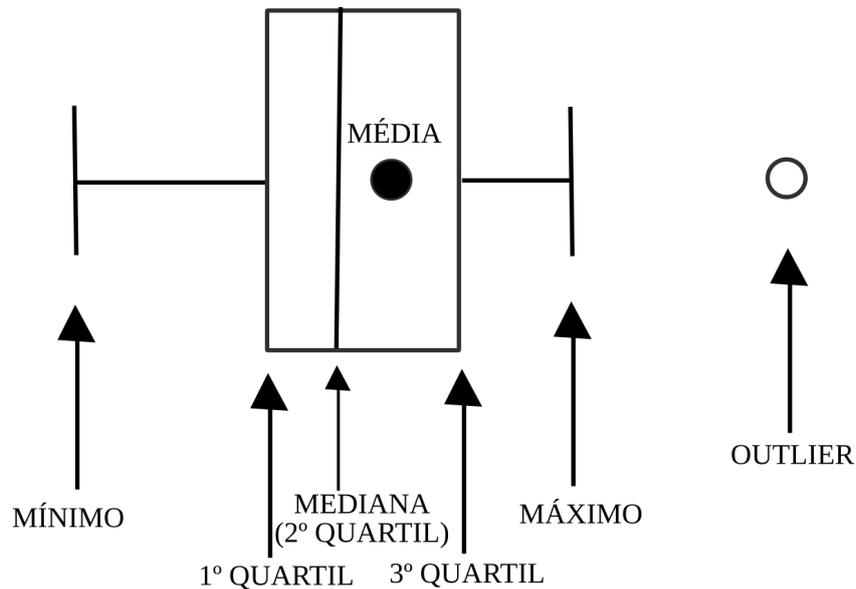
Tipos Funcionais de Plantas		
Código	Nome	Sigla
1	Floresta Sempre Verde Tropical	FSVTr
2	Floresta Decídua Tropical	FDTTr
3	Floresta Sempre Verde Temperada (folhas largas)	FSVTeL
4	Floresta Sempre Verde Temperada (folhas agudas)	FSVTeA
5	Floresta Decídua Temperada	FDTTe
6	Floresta Sempre Verde Boreal	FSVBo
7	Floresta Decídua Boreal	FDBo
8	Floresta Mista	Fm
9	Cerrado	Ce
10	Pastagem/Estepe	Pa/Es
11	Arbusto Denso	Ard
12	Arbusto Aberto	Ara
13	Tundra	Tu
14	Deserto	De
15	Deserto Polar/Gelo	Ge

5.1.2 Boxplot

O *Boxplot* é uma análise gráfica que concede observação da variabilidade e valores discrepantes (*outliers*) dos dados, contribuindo para o entendimento sobre o caráter da compilação dos dados de BRF. Utilizam-se referências aos valores mínimos e máximos, os quartis, mediana, média e *outliers*: o início da caixa representa o primeiro quartil, a linha do meio a mediana e o final da caixa está associado ao terceiro quartil da base de dados. As linhas que se estendem fora da caixa representam os valores mínimos e máximos. O círculo preenchido representa a média e o círculo sem preenchimento os *outliers* (Figura 5.2) (ROSS, 2004).

O *Boxplot* permitiu a familiarização, organização e síntese dos dados de biomassa de raízes finas (BRF) (Seção 5.1.1). Dessa maneira foi possível a obtenção de informações necessárias sobre as características da base de dados de BRF para cada tipos de vegetação.

Figura 5.2 - Esquema gráfica da interpretação do *Boxplot*.



FONTE: Elaboração da autora.

5.1.3 Análise de Componentes Principais (ACP): Círculo de correlação (CC)

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística que objetiva reduzir a variação de um determinado conjunto de dados. Além disso, a ACP pode ser utilizada para identificar a covariância entre duas ou mais variáveis (JOLLIFFE, 2002). Através dos círculos de correlação (CC) é possível obter uma visualização gráfica das relações simultâneas entre as variáveis, e a consistência destas relações entre as classes de vegetação ao longo do tempo.

No círculo de correlação (MAKOSSO-KALLYTH; DIDAY, 2012), cada variável original é representada por um vetor que indica a força combinada das relações entre as variáveis e são plotadas em relação a dois dos principais componentes, representados no eixo x e y. O comprimento do vetor demonstra a correlação das variáveis em relação às duas componentes principais e a direção do vetor apresenta se essas relações são positivas ou negativas. O ângulo entre os vetores é uma aproximação do grau de correlação entre duas variáveis originais: um ângulo de 90° indica que as variáveis estão completamente não correlacionadas; 180° sugere uma completa correlação negativa; um ângulo pequeno próximo a 0° aponta que as variáveis estão

correlacionadas positivamente. Relações consistentes entre os tipos de vegetações para determinadas variáveis são indicadas por ângulos semelhantes.

Para o cálculo das relações entre as variáveis e os PFTs, as correlações de círculos foram separados por tipo de vegetação. Foram analisados os CC para todas as combinações de dimensões fatoriais (autovalores), porém é discutido apenas os círculos de correlação com Dim1 e Dim2, devido a maior contribuição da BRF.

Para esta análise foram utilizados dados mensais para o período de 2000 a 2016 referentes à PREC (Seção 3.1), US (Seção 3.1), TEMP (Seção 3.2), NPP (Seção 3.2), LAI (Seção 3.2) e BRF (Seção 5.1.1). Assim, pode-se gerar um banco de dados específicos de BRF para este trabalho.

5.1.4 Regressão linear múltipla

A análise de regressão linear múltipla verifica como o comportamento de duas ou mais variáveis influenciam em outra variável, assumindo que existe uma relação linear entre uma variável dependente (Y) e as variáveis independentes (X). O objetivo das variáveis independentes é melhorar a capacidade de predição em comparação com a regressão linear simples. Por se tratar de uma técnica multivariada, esta consegue diminuir um volumoso conjunto de variáveis para um pequeno número de dimensões com a pouca perda de informação. Para obter o cálculo de Y , tem-se que identificar o impacto coletivo e contribuição de cada variável X separadamente no efeito geral da variável Y .

A inclusão de novas variáveis na equação de ajuste pode possibilitar a identificação dos padrões de similaridade, combinação e correlação entre as variáveis. Tal função apresenta a seguinte Equação 5.1:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (5.1)$$

A solução da Equação 5.1 é um único número que demonstra uma combinação do conjunto de dados que melhor se aproxima do valor verdadeiro. O resultado de ajuste de reta pode ser desenvolvida a um conjunto de pontos $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$, pelo Método de Mínimos Quadrados (MMQ), para que modelos de regressão linear múltipla possam ser empregados, tem-se:

$$y = X\beta + \epsilon \quad (5.2)$$

Em que, y é um vetor $n \times 1$, X uma matriz $n \times (p+1)$, β é um vetor $p \times 1$ e ϵ um vetor $n \times 1$. Para alcançar o resultado de ajuste da função linear em β a um conjunto de pontos $(Y_1, X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1p}), \dots, (Y_n, X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{np})$ pelo MMQ, é preciso reduzir a equação:

$$\sum_{i=1}^n [y_i + \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_p X_{ip}]^2 \quad (5.3)$$

Derivando em termos de β , obtém-se:

$$\frac{\partial y'y}{\partial \beta} = 2 \frac{\partial y'X\beta}{\partial \beta} + \frac{\partial \beta'X'X\beta}{\partial \beta} \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial y'y}{\partial \beta} = 0 - 2(y'X)' + 2X'X\beta \quad (5.5)$$

Em que o vetor de dimensão $p+1$ sucede na Equação 5.6:

$$\hat{\beta} = \frac{X'y}{(X'X)} \quad (5.6)$$

Se $(X'X)$ existir, $\hat{\beta}$ é o estimador não-viciado do modelo. Em vista disso, o modelo de regressão ajustado é dado por:

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \quad (5.7)$$

E o vetor de resíduos (Equação 5.9):

$$\epsilon = y - \hat{y} \quad (5.8)$$

$$\epsilon = y - X\hat{\beta} \quad (5.9)$$

Para o cálculo da matriz de covariância, tem-se:

$$Cov(\hat{\beta}) = \sigma^2(X'X)^{-1} \quad (5.10)$$

σ^2 é calculado através de matriz, dado pela fórmula:

$$\sigma^2 = \frac{y'y - \hat{\beta}X'y}{n - p - 1} \quad (5.11)$$

Com isso, é possível analisar a relação entre a biomassa de raízes finas e as demais variáveis que influenciam o sistema. Nesse contexto, baseada na Equação 5.1, Y é a biomassa de raízes finas (BRF) e, X_n as variáveis US, PREC, TEMP, NPP e LAI. O coeficiente β_n corresponde ao coeficiente de significância, estimados pelo método clássico de regressão múltipla. A metodologia detalhada da Análise de Regressão Linear Múltipla pode ser encontrada no livro escrito por Hoffmann (2016).

De modo a melhorar a estimativa de BRF para todos os tipos de vegetação, foram criadas combinações entre as variáveis preditoras (PREC, NPP, TEMP, US e LAI) (Tabela 5.2). Em seguida, foram geradas equações para cada grupo (Y1, Y2, etc) e estimados valores de BRF e comparadas com BRF observada. Por fim, através da Correlação Linear de Pearson (MALAWI, 2012) foi calculada a relação estatística entre às duas variáveis contínuas (BRF observada e estimada).

Tabela 5.2 - Combinações de testes realizados para investigar simultaneamente os efeitos sobre BRF, de duas ou mais variáveis preditoras.

Y _n	PREC	NPP	TEMP	US	LAI
Y1	X	X	X		
Y2	X		X		X
Y3		X	X	X	
Y4			X	X	X
Y5	X		X		
Y6			X	X	

5.1.5 Análise de regressão linear

Através da análise de regressão linear foram obtidas as funções pesos (*wgt*), que se caracteriza por modular o aumento ou diminuição, ou seja, se qualquer alteração na variável independente causa uma mudança proporcional na variável dependente.

Com base em dois conjuntos X e Y não vazios, uma função f de X em Y é uma ligação que relaciona todo elemento $x \in X$ a um único elemento $y \in Y$. Assim, a função peso associa um elemento do domínio (conjunto X com valores observados de BRF) com um elemento do contradomínio (conjunto Y com os valores do intervalo numérico). De modo que a cada elemento do domínio está relacionado diretamente a um, e exclusivamente um, elemento do contradomínio (SU et al., 2012). A equação de uma função linear é dada por (Equação 5.12):

$$Y = aX + b \quad (5.12)$$

Em que, a é o coeficiente angular ou taxa de variação e b é o coeficiente linear. Sendo $a \neq 0$ e b são constantes.

O ajuste das funções peso para cada tipo de vegetação foi realizado assumindo X como sendo os dados observado de BRF (descritos na Seção 5.1.1), e Y é um intervalo numérico variando de 0,5 a 1,5. Foram gerados dois conjuntos de dados, um referente aos valores observados de BRF (X) e outro ao intervalo numérico (Y). Foi definido que o valor mínimo do conjunto de dados de BRF para cada tipo de vegetação corresponde ao valor mínimo do intervalo numérico, e o valor máximo observado de BRF corresponde ao valor máximo do intervalo.

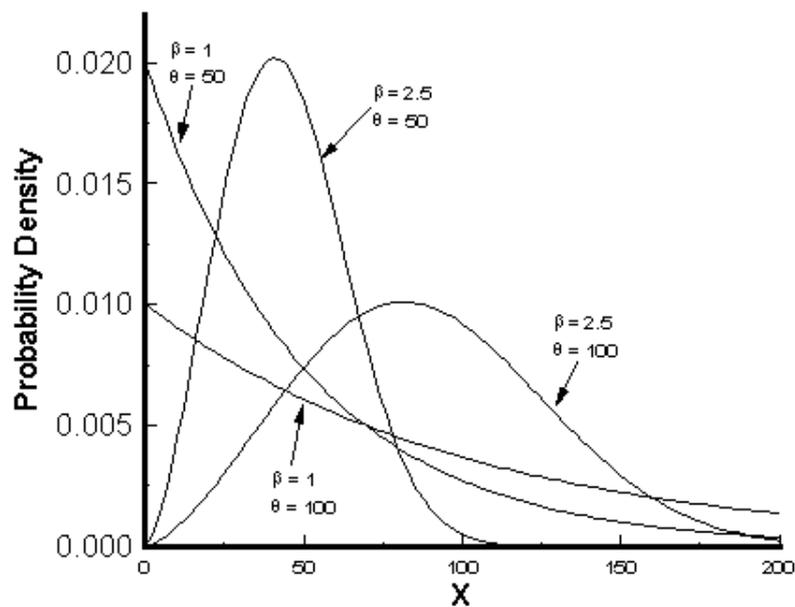
5.1.6 Distribuição de *Weibull*

Através da Função de Distribuição de *Weibull* pode-se formular uma proposta para uma nova abordagem de esquema dinâmico de raízes finas em função do carbono de raízes finas e profundidade do solo. A principal vantagem da Distribuição de *Weibull* é que ela pode ser semelhante às características de outras distribuições de probabilidade, fazendo com que seja flexível no ajuste de diferentes tipos de dados. Esse método é uma equação de distribuição de probabilidade contínua e unimodal, geralmente utiliza-se a equação de *Weibull* em função de dois ou três parâmetros e aplica-se a diferentes populações e fenômenos (WEIBULL, 1951). A função de densidade de probabilidade de Weibull é dada por (Equação 5.13):

$$f(x) = \left[\frac{\beta}{\theta} \left(\frac{x - \delta}{\theta} \right)^{\beta-1} \right] \left\{ \text{EXP} \left[- \left(\frac{x - \delta}{\theta} \right)^\beta \right] \right\}, x \geq \delta \quad (5.13)$$

Em que β o parâmetro de forma, θ é o parâmetro de escala e δ refere-se ao parâmetro de localização. A Figura 5.3 representa o efeito do parâmetro de forma (β) e de escala (θ) da função de densidade de probabilidade de *Weibull*. Mais detalhes e aplicações podem ser encontrados em [Weibull \(1951\)](#).

Figura 5.3 - Impacto dos parâmetros de forma e de escala da função proposta por [Weibull \(1951\)](#).



FONTE: [Weibull \(1951\)](#).

5.2 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados adquiridos conforme a metodologia apresentada na Seção 5.1. No Item 5.2.1 são apresentados a variabilidade dos dados de BRF (Seção 5.1.1), na Seção 5.2.2 são mostrados os resultados correspondentes aos círculos de correlação (CC) e no Item 5.2.3 apresenta como foi obtida a nova parametrização de raízes finas.

5.2.1 Variabilidade dos dados de biomassa de raízes finas (BRF)

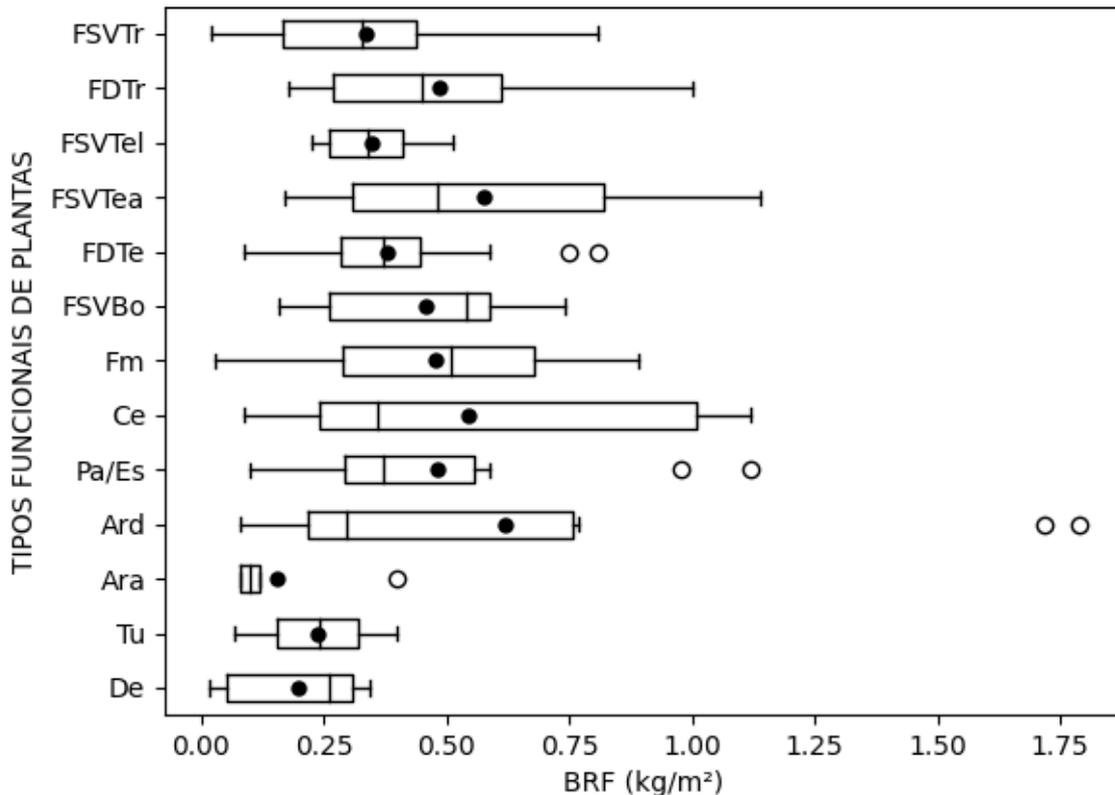
O conjunto de dados de BRF possuem valores em todos os estágios da vegetação, estações do ano e diferentes condições ambientais. Uma esquematização gráfica através da técnica do *Boxplot* facilita a visualização do conjunto de dados em relação à sua variabilidade por tipo de vegetação.

Na Figura 5.4, o eixo-y representa os tipos funcionais de plantas e o eixo-x a mensuração quantitativa da BRF. Analisando os *boxplots*, observa-se que as BRF do FDTr, FSVTea, Fm e Ce possuem as maiores variabilidades do conjunto de dados. A FSVTr, FCTr, FSVTel, FSVTea, FDTe, Ce, Pa/Es, Ard e Ara apresentaram assimetrias positivas para as biomassas de raízes finas, pois os valores médio mostraram-se mais altos do que a mediana. O FSVBo possui a mediana próxima ao segundo quartil, apontando distribuições assimétricas negativas. A FDTr, FSVTel, FDTe e Ara têm as linhas das medianas nos centros dos retângulos, portanto têm distribuições simétricas. É possível identificar valores atípicos (*outliers*) no conjunto de dados dos tipos de vegetação FDTe, PA/Es, Ard e Ara. Esses valores apresentam diferenças significativas em relação ao conjunto de dados, desta maneira foram descartados das demais análises com o intuito de reduzir erros.

As BRF foram menores em florestas boreais do que em florestas tropicais (Figura 4.3), concordando com pesquisas anteriores (VOGT *et al.*, 1995; JACKSON *et al.*, 1997; FINÉR *et al.*, 2011). As temperaturas frias das regiões de florestas boreais limitam o crescimento radicular em comparação às florestas temperadas e tropicais, onde temperaturas mais altas, portanto, podem contribuir para um maior crescimento das raízes finas. Além do que o estresse hídrico sazonal nas florestas tropicais é um fator importante para a rotatividade de raízes finas. Durante a estação seca o estresse hídrico nas camadas superiores do solo reduz a BRF, este processo, induz as raízes finas das camadas inferiores a absorverem água e nutrientes do solo profundo (WANG *et al.*, 2018a). De acordo Finér *et al.* (2011) 20% da variação de BRF destes biomas pode ser explicada por influência da latitude, temperatura média anual e

precipitação anual.

Figura 5.4 - *Boxplot* das biomassas de raízes finas (BRF) dos diferentes tipos funcionais de plantas (PFTs) do modelo IBIS. As linhas pretas indicam os valores mediano e os círculos preenchidos indicam as médias.



FONTE: Elaboração da autora.

Segundo [Poorter et al. \(2012\)](#) no bioma Tundra a biomassa total alocada abaixo do solo (raízes grossas e finas) é consideravelmente maior do que a biomassa acima do solo (caules e folhas). O desenvolvimento das vegetações nas regiões de Tundra são limitadas pela disponibilidade de nutrientes, temperatura ([WANG et al., 2016](#)) e do solo raso ([WANG et al., 2019](#)), estes fatores limitam a alocação de carbono (C) acima do solo e aumenta abaixo do solo, conseqüentemente, mais carbono é transformado em BRF. A tundra é caracterizada por vegetações rasteiras que possuem alta adaptabilidade às temperaturas baixas e ao congelamento de suas folhas ([WANG et al., 2019](#)), como resultado pouca rotatividade de BRF, média baixa e próxima à

mediana (Figura 4.3).

No deserto, a pouca vegetação existente suporta a escassez de água, e para sobreviver algumas espécies de plantas conseguem armazenar água em suas folhas, raízes e caules. Outras espécies têm raízes profundas capazes de absorver água do lençol freático (XU et al., 2016).

5.2.2 Análise da contribuição de fatores ambientais na biomassa de raízes finas

As condições impostas pelo ambiente influenciam os PFTs a desenvolverem mecanismos de sobrevivência, seja perda total/parcial das folhas (WANG et al., 2018b), aumento/diminuição da profundidade de raízes e biomassa de raízes (XU et al., 2016), redistribuição hidráulica (HAFNER et al., 2017a), dentre outros. Para entender a resposta da BRF às condições climáticas, a Figura 5.2.2 apresenta os círculos de correlações (CC) formado pelas duas primeiras componentes principais ajustadas a partir do conjunto de dados das variáveis de biomassa de raízes fina (BRF), precipitação anual média (PREC), temperatura da superfície anual média (TEMP), umidade do solo anual média (US), Índice de Área Foliar (LAI) e produtividade primária líquida anual média (NPP).

As relações entre as variáveis são distintas para cada PFTs, o grupo da FSVTr mostra que quase 75,9% da variação (informação) contida nos dados é explicada pelos dois primeiros componentes principais. A análise fatorial apresenta que as variáveis BRF e US estão negativamente correlacionadas, e a BRF e TEMP não apresentam correlação significativa devido à quase ortogonalidade entre os vetores. O mapa fatorial da FDTr (60% da variação) indica uma correlação positiva entre BRF e NPP, também é possível observar que LAI, TEMP e NPP são positivamente correlacionadas e negativamente correlacionadas com a PREC.

Os resultados para FSVTel apresentam que os eixos 1 e 2 explicaram 24,2% e 27,3%, respectivamente. A BRF não obteve correlação positiva com nenhuma variável. Entretanto, apresentou correlação negativa forte com o NPP. O mapa da FSVTea mostra LAI, PREC e US concentrados no mesmo quadrante e com um ângulo pequeno entre as flechas representadas pelas variáveis, indicando que estão fortemente correlacionadas entre si. No quadrante oposto têm-se a TEMP, NPP e BRF, apontando que estão correlacionadas, ou seja, para esse conjunto de dados a temperatura e o NPP têm maior influência no crescimento de BRF do que as outras variáveis.

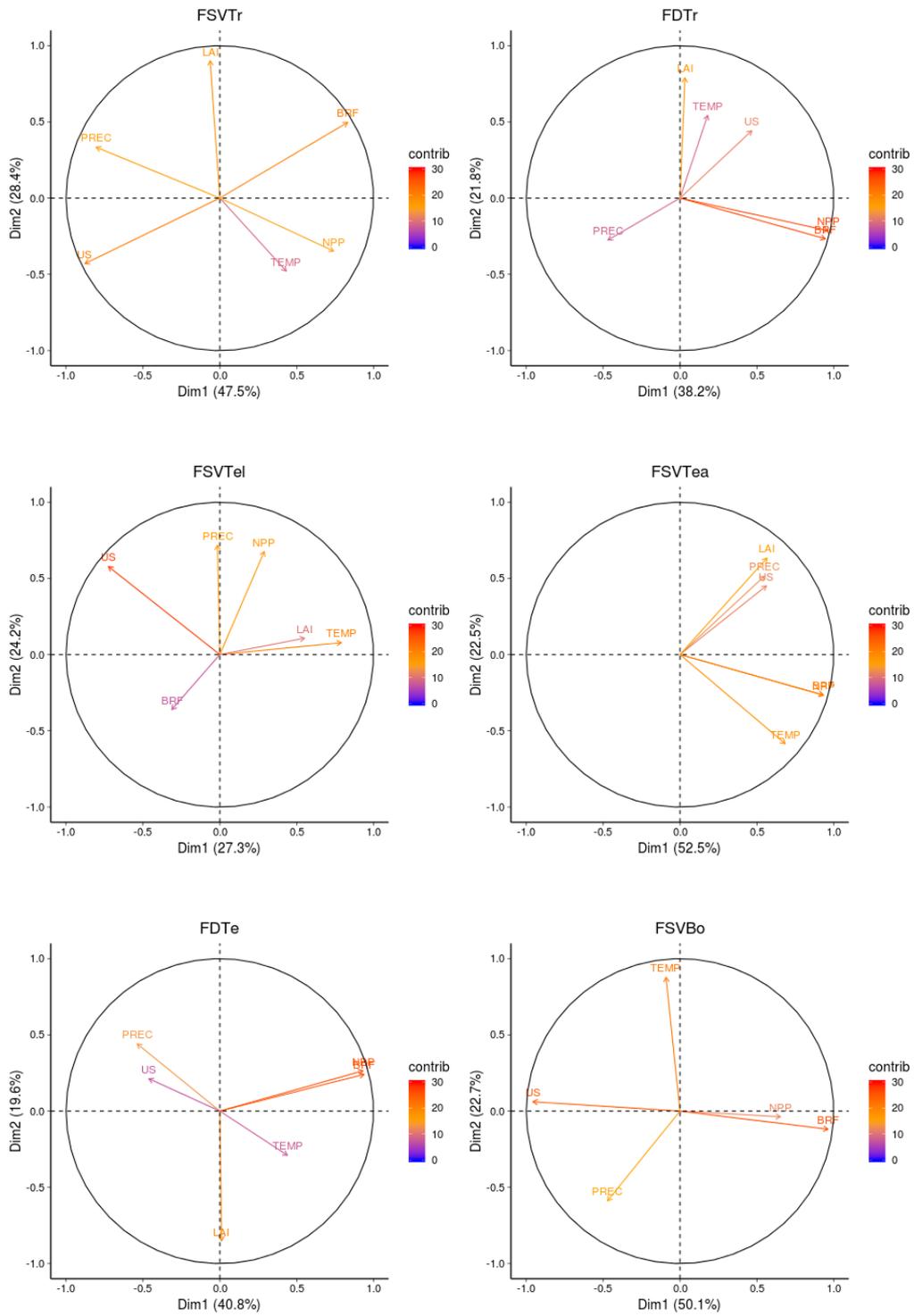
A BRF da FDTe está fortemente correlacionada com o NPP, e moderadamente com US e PREC, entretanto apresenta pouca correlação com LAI e TEMP. O círculo unitário da FSVBo formou um ângulo muito pequeno entre BRF e NPP, evidenciando correlação positiva entre as duas variáveis. Do lado oposto têm-se a US, indicando que as variáveis são correlacionadas negativamente. Devido a ortogonalidade entre BRF e TEMP as variáveis não apresentaram correlações. O mapa fatorial da Tu explica 77,3% dos dados e mostra que as variáveis BRF e PREC estão a um ângulo de quase 180°, em sentidos opostos, o que significa que a medida que a precipitação diminui a biomassa de raízes finas aumenta. A BRF e TEMP tem correlação positiva moderada (as variáveis estão no mesmo quadrante).

Na análise das variáveis do Ce, ocorre uma correlação positiva das variáveis BRF e NPP. Pode-se verificar que no quadrante oposto estão as variáveis PREC e US, indicando uma forte correlação negativa e correlação insignificante entre BRF e TEMP. Para o tipo de vegetação Ard a correlação de círculo mostrou que o eixo 1 e 2 explicam respectivamente, 61,8% e 17,8% dos dados. As variáveis BRF e TEMP estão sobrepostas revelando uma forte correlação positiva, e a BRF e US estão opostas representando uma forte correlação negativa. O mapa de fatores do Ara apresenta algumas variáveis sobrepostas (lado direito do círculo), o que revela que estas possuem representatividade semelhante, ou seja, BRF/US/PREC estão fortemente correlacionadas positivamente e correlacionadas negativamente com a TEMP.

Observa-se que nos mapas fatoriais da Fm, Pa/Es e De, a biomassa de raízes finas e a umidade do solo estão negativamente correlacionadas, indicando que a umidade do solo é o principal fator para o crescimento das raízes finas. As demais variáveis não apresentam correlações significativas com a BRF.

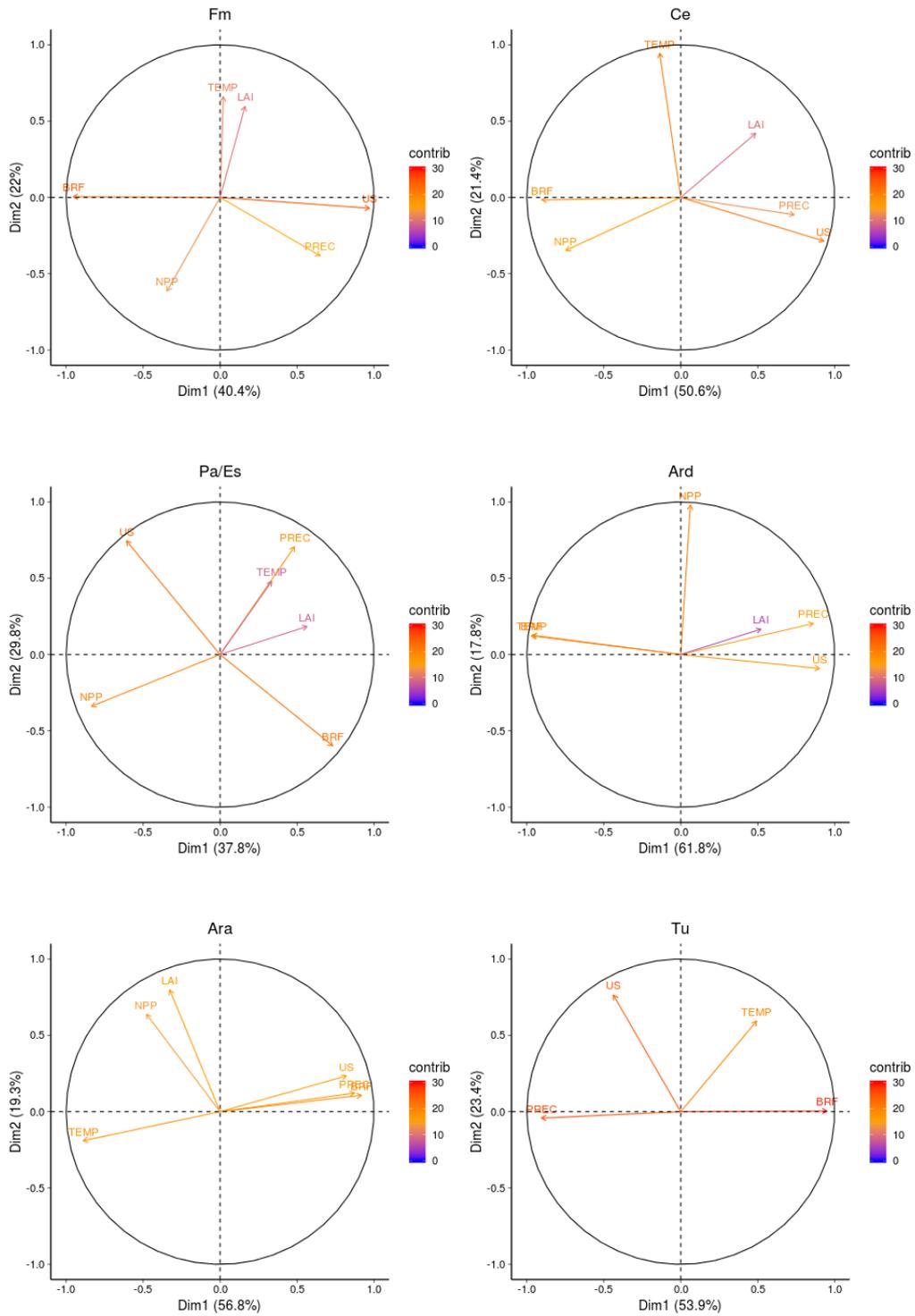
Foram apresentadas as correlações com ênfase na BRF, cada grupo de vegetação tem uma fator determinante para o crescimento das raízes finas. Entretanto, as demais variáveis também interagem entre si, e isso influencia a BRF indiretamente. Por exemplo, a quantidade de umidade do solo depende da intensidade da precipitação e da temperatura, que conseqüentemente, impacta no crescimento de raízes finas. Portanto, a BRF para cada tipo de vegetação é sensível às alterações climáticas da região, concordando com Yuan e Chen (2010) e See et al. (2019)

Figura 5.5 - Círculos de correlações (CC) para os PFTs analisados, exibem as distribuições de cada grupo nas dimensões fatoriais (Dim 1 X Dim 2).



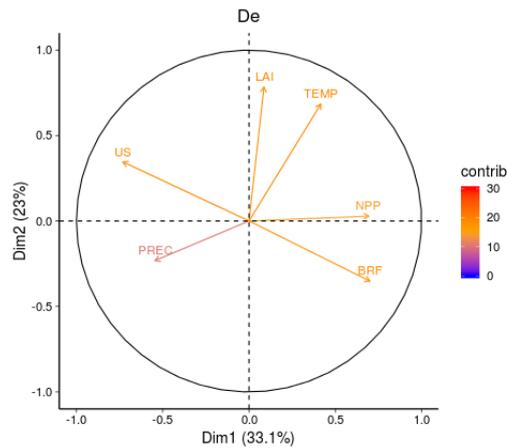
Continua

Figura 5.5 — Continuação.



Continua

Figura 5.5 — Continuação.

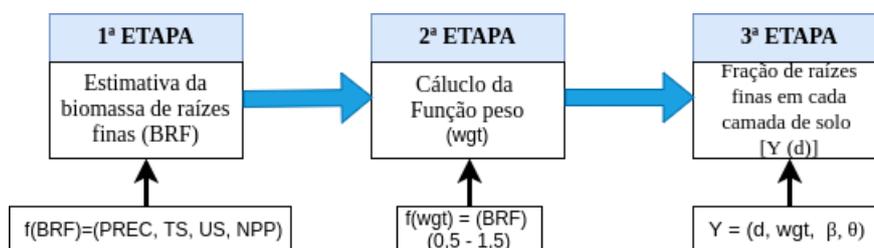


FONTE: Elaboração da autora.

5.2.3 Desenvolvimento da nova parametrização de raízes finas

A nova distribuição de raízes finas é calculada em três etapas (Figura 5.6): na primeira etapa é estimada a biomassa de raízes finas (BRF; kgm^{-2}) em função da umidade do solo (US; kgm^{-2}), produtividade primária líquida (NPP; $\text{kg}^\circ\text{Cm}^{-2}\text{dia}^{-1}$) e temperatura da superfície (TEMP; $^\circ\text{C}$), e precipitação (PREC; mmdia^{-1}) (Tabela 5.3); na segunda etapa, calcula-se o resultado da função peso (wgt) (Tabela 5.4), que representa a BRF em um determinado intervalo numérico, variando de 0,5 a 1,5, indicando uma redução ou aumento da biomassa de raízes finas, respectivamente. Na última etapa é obtido onde as raízes finas podem crescer dinamicamente, em cada instante de tempo, dependendo das condições ambientais da região e da profundidade do solo.

Figura 5.6 - Esquema modular da nova distribuição de raízes finas no solo.



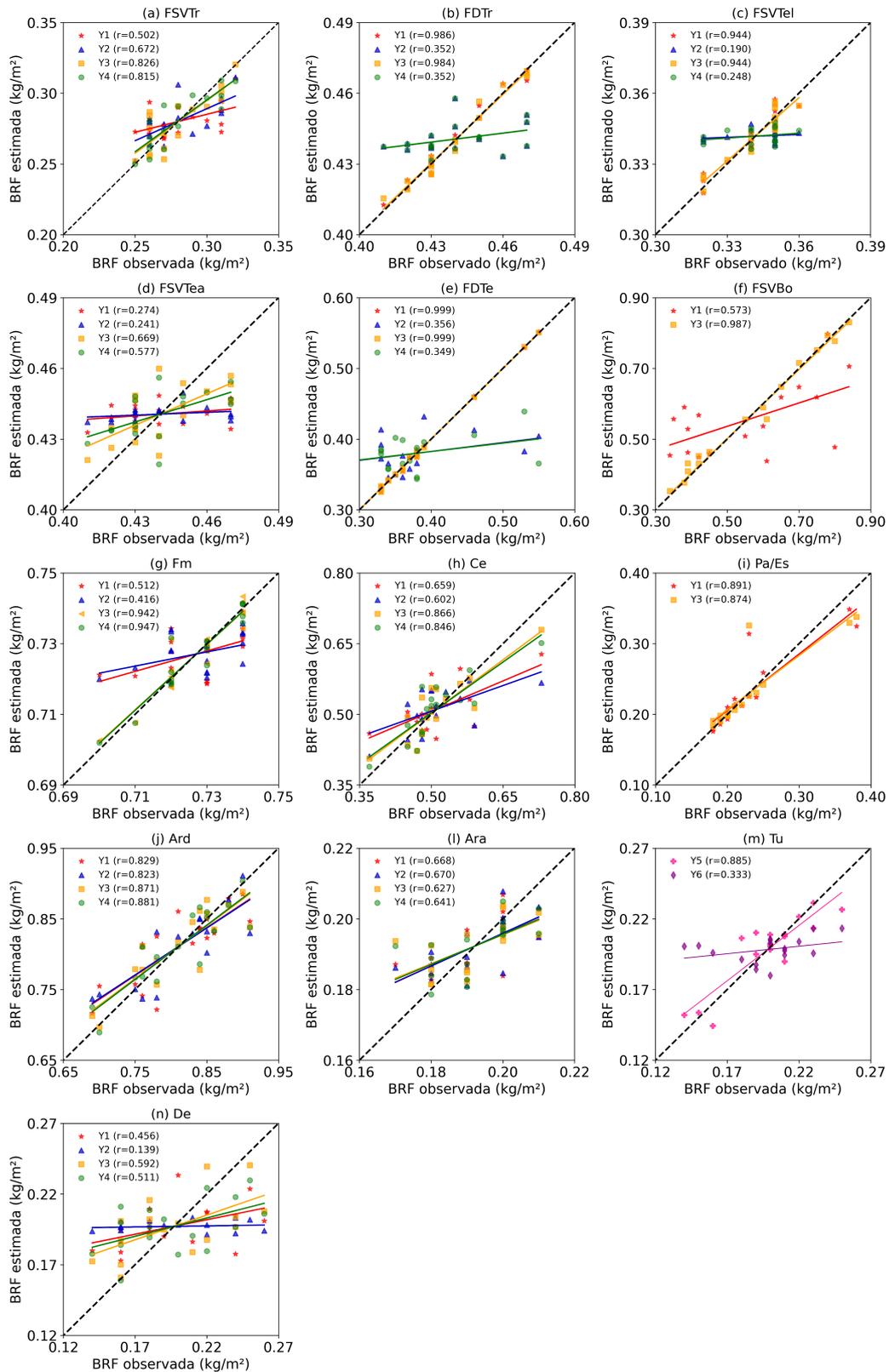
FONTE: Elaboração da autora.

5.2.3.1 1ª Etapa: Estimativa da biomassa de raízes finas (BRF)

A biomassa de raízes finas (BRF) pode ser influenciada por uma ou mais variáveis, portanto, as estimativas de BRF foram calculadas através da Análise Linear Múltipla (HOFFMANN, 2016). A partir dessa análise foram encontradas diferentes combinações de equações para estimar a BRF.

A Figura 5.7 mostra a dispersão entre os valores de BRF observados e estimados, para cada tipo de vegetação, visando encontrar a melhor equação para estimativa de BRF. O gráfico de dispersão do De mostrou muitos pontos espalhados ao redor da reta tracejada, apresentando dificuldades da equação gerada em estimar a BRF. Os tipos de vegetações FDTr, FSVTel, FDTe e FSVBo apresentaram fortes correlações e quase perfeita quando as BRF foram estimadas com as equações para Y1 e Y3, dado que a reta apresentada para Y1 (reta vermelha) e Y3 (reta amarela) está praticamente na mesma posição quando se comparada a linha tracejada preta (correlação perfeita). Esta análise também foi observada para Fm, entretanto quando a BRF foi estimada com as equações Y3 (reta amarela) e Y4 (reta verde), as relações entre os valores observados e estimados de BRF para FSVTr, FSVTea, Ce, Pa/Es, Ard e Ara mostraram que os valores foram relativamente bem estimados com o modelo Y3, em que a biomassa de raízes finas é calculada em função do NPP, TEMP e US. Em relação ao bioma Tu, a melhor correlação ocorreu quando a BRF foi estimada com a equação Y5 que é função da precipitação e temperatura da superfície.

Figura 5.7 - Relação entre os valores observados e estimados para a biomassa de raízes finas (BRF) de cada Tipo Funcional de Planta (PFT).



FONTE: Elaboração da autora.

A principal vantagem desta estimativa é que a BRF varia com o tempo. Além disso, cada tipo de vegetação possui uma equação diferente para estimativa da BRF. A Tabela 5.3 mostra o conjunto de equações obtidas pelo modelo Y3 para todos os tipos de vegetação e pelo modelo Y5 para a Tundra. Também são apresentadas as Correlações de Pearson (r) entre os valores de BRF observados e estimados. Estatisticamente estas correlações apontam que as biomassas de raízes finas podem ser calculadas usando equação alométrica (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009).

Tabela 5.3 - Conjunto de equações para o cálculo da biomassa de raízes finas (BRF; kgm^{-2}) em função da umidade do solo (US; kgm^{-2}), produtividade primária líquida (NPP; $\text{kg}^\circ\text{Cm}^{-2}\text{dia}^{-1}$) e temperatura da superfície (TEMP; $^\circ\text{C}$).

PFTs	SIGLAS	MODELOS BRF	r
1	FSVTr	$\text{BRF} = 0,00412 \text{ NPP} + 0,00245 \text{ TEMP} - 0,00104 \text{ US}$	0,826
2	FDTTr	$\text{BRF} = 0,3434 \text{ NPP} + 0,00088371 \text{ TEMP} - 0,0000095 \text{ US}$	0,984
3	FSVTel	$\text{BRF} = - 0,121435 \text{ NPP} + 0,0016357 \text{ TEMP} - 0,0000484961 \text{ US}$	0,944
4	FSTea	$\text{BRF} = 0,0467695 \text{ NPP} + 0,00262037 \text{ TEMP} - 0,00070331 \text{ US}$	0,669
5	FDTe	$\text{BRF} = 0,4176 \text{ NPP} + 0,0003958 \text{ TEMP} - 0,00001209 \text{ US}$	0,999
6	FSVBo	$\text{BRF} = 0,07124887 \text{ NPP} + 0,00913977 \text{ TEMP} - 0,006930 \text{ US}$	0,987
7	FDBo	$\text{BRF} = 0,07124887 \text{ NPP} + 0,00913977 \text{ TEMP} - 0,006930 \text{ US}$	0,987
8	Fm	$\text{BRF} = 0,0002869 \text{ NPP} + 0,0040748 \text{ TEMP} - 0,0000120895 \text{ US}$	0,942
9	Ce	$\text{BRF} = 0,1417 \text{ NPP} + 0,0056628 \text{ TEMP} - 0,003020164 \text{ US}$	0,866
10	Pa/Es	$\text{BRF} = 0,1417 \text{ NPP} + 0,00566280 \text{ TEMP} - 0,0030201644 \text{ US}$	0,874
11	Ard	$\text{BRF} = 0,01297793 \text{ NPP} + 0,00394534 \text{ TEMP} - 0,00118412 \text{ US}$	0,871
12	Ara	$\text{BRF} = - 0,03545374 \text{ NPP} + 0,00043934 \text{ TEMP} + 0,0003682 \text{ US}$	0,627
13	Tu	$\text{BRF} = - 0,00020958198 \text{ NPP} + 0,001093372 \text{ TEMP}$	0,885
14	De	$\text{BRF} = 0,0799614 \text{ NPP} + 0,00126153 \text{ TEMP} - 0,00132702 \text{ US}$	0,592

Quando as equações para estimar a BRF (Tabela 5.3) são resolvidas numericamente a cada passo de tempo no modelo IBIS, a entrada de umidade do solo (US) é simulada a partir da equação de fluxo de *Richards* (RICHARDS, 1931) e, é função da condutividade hidráulica do solo, da curva de retenção de água no solo, absorção de água pelas raízes e das condições de contorno (YI et al., 2007). O modelo IBIS determina a NPP em função da produtividade primária bruta (GPP) e da respiração autotrófica da vegetação ($\text{NPP}=\text{GPP}-\text{R}$), ou seja, é determinada através da fração de GPP não utilizada na respiração das plantas e está disponível para ser alocada em forma de biomassa para cada reservatório de carbono da planta, tais como, raízes, folhas, caule, etc. A parcela de NPP alocada para esses reservatórios é controlada por parâmetros específicos de cada tipo de vegetação (KUCHARIK et al., 2000). O cálculo da precipitação é através da água de chuva que atinge a superfície do solo e infiltra (KUCHARIK et al., 2000). A temperatura da superfície (TEMP) é obtida através do fluxo de calor em função do balanço de radiação que chega e sai de uma determinada área. Além disso, a TEMP é sensível às mudanças da vegetação e umidade do solo

(AMIRI et al., 2009).

5.2.3.2 2ª Etapa: Cálculo da função peso

Para modular a fração máxima de raízes finas no solo a cada espaço de tempo, é calculado o “peso” (wgt) que está relacionado com a perda e o ganho de BRF. Em matemática pode-se representar um conjunto através de intervalos numéricos, cada número real do conjunto de dados de BRF está relacionado a dois extremos (intervalo numérico entre 0,5 — 1,5) do conjunto de dados obtidos pela função peso (linear). De modo que, quanto maior (menor) for a biomassa de raízes finas estimada maior (menor) será a máxima fração de raízes.

Através da análise de regressão foi possível determinar a equação que melhor representa a relação existente entre a BRF e o ganho/perda de biomassa. A partir dessas equações é possível fazer predições para a variável resposta. A Tabela 5.4 apresenta a função peso (wgt) para cada classe de vegetação.

Tabela 5.4 - Conjunto de equações lineares para o cálculo da Função Peso (wgt) referente a cada PFTs.

PFTs	SIGLA	FUNÇÃO PESO (wgt)
1	FSVTr	$wgt = 1,52 \text{ BRF} + 0,199$
2	FDTr	$wgt = 1,19 \text{ BRF} + 0,500$
3	FSVTel	$wgt = 3,70 \text{ BRF} + 0,500$
4	FSVTea	$wgt = 1,15 \text{ BRF} + 0,425$
5	FDTe	$wgt = 1,96 \text{ BRF} + 0,340$
6	FSVBo	$wgt = 3,33 \text{ BRF} - 0,330$
7	FDBo	$wgt = 3,33 \text{ BRF} - 0,330$
8	Fm	$wgt = 1,15 \text{ BRF} + 0,480$
9	Ce	$wgt = 2,00 \text{ BRF} - 0,300$
10	Pa/Es	$wgt = 2,04 \text{ BRF} + 0,320$
11	Ard	$wgt = 1,43 \text{ BRF} + 0,430$
12	Ara	$wgt = 3,33 \text{ BRF} - 1,170$
13	Tu	$wgt = 2,78 \text{ BRF} + 0,420$
14	De	$wgt = 3,57 \text{ BRF} + 0,043$

5.2.3.3 3ª Etapa: Fração de raízes finas em cada camada de solo

Por fim, através da equação da função de Distribuição de Weibull foi desenvolvida uma nova abordagem dinâmica de raízes finas, esse método é uma função de distri-

buição de probabilidade contínua e unimodal (WEIBULL, 1951). Dada pela Equação 5.14:

$$Y(d) = \left[\frac{wgt.\beta}{\theta} \left(\frac{d-1}{\theta} \right)^{wgt.\beta-1} \right] \left\{ EXP \left[- \left(\frac{d-1}{\theta} \right)^{wgt.\beta} \right] \right\} \quad (5.14)$$

Em que $Y(d)$ é a fração de raízes finas em função da profundidade do total (d) (em cm), β é o parâmetro de forma que está representando a distribuição da fração máxima de raízes finas, θ é o parâmetro de escala (associado com a biomassa de raízes finas com a profundidade) e wgt é a função peso de ganho ou perda de biomassa. Os valores de d foram retirados do conjunto global de dados disponível na plataforma *World Soil Information* (SHANGGUAN et al., 2017) descritos na Seção 3.4.

Tabela 5.5 - Valores associados aos parâmetros β e θ para as camadas inferior e superior de vegetação do modelo IBIS, conforme os PFTs.

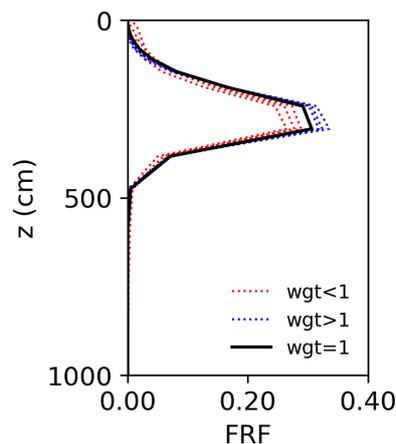
Códigos		INFERIOR		SUPERIOR	
PFTs	SIGLA	β	θ	β	θ
1	FSVTr	2,10	200	2,80	470
2	FDTTr	1,40	45	3,00	400
3	FSVTel	2,00	45	2,30	150
4	FSVTea	2,70	33	2,40	120
5	FDTTe	2,10	28	2,20	60
6	FSVBo	1,50	29	1,30	35
7	FDBo	1,50	27	1,30	40
8	Fm	1,80	27	2,50	50
9	Ce	0,30	27	0,80	350
10	Pa/Es	1,00	50	1,20	23
11	Ard	0,80	18	1,10	350
12	Ara	1,00	10	1,10	58
13	Tu	1,00	40	1,00	16
14	De	2,00	13	2,10	13

O ideal seria estimar β , θ e δ , e verificar a adequação da distribuição do perfil de raízes finas para cada tipo funcional de planta, entretanto dados observados não estão amplamente disponíveis. Sendo assim, os parâmetros foram ajustados após sucessivos testes e estes resultados comparados com as variáveis influenciadas pela distribuição de raízes. Em particular, essa nova parametrização utiliza valores distin-

tos de β , θ e d para diferentes biomassas (Tabela 5.5). O valor de β é proporcionalmente ajustado com o valor de wgt e δ é fixo para todos os tipos de vegetação, $\delta = 1$.

A Figura 5.8 ilustra como o wgt ajusta o valor de β , ou seja, o resultado do crescimento das raízes finas para um wgt entre 0,5 — 1,5. O valor $wgt = 1$ é representado pela linha contínua. Isso implica que, quanto menor o valor de wgt , menor será a máxima fração de raízes finas (FRF). Ainda, após alcançar a profundidade de enraizamento com uma baixa fração de raízes finas, as raízes crescem basicamente na horizontal.

Figura 5.8 - Efeito da função peso (wgt) no parâmetro da distribuição da fração máxima de raízes finas (β). Os valores de wgt variam de 0,5 - 1,5, a linha contínua representa o $wgt=1$, as linhas pontilhadas vermelhas descreve os valores de $wgt<1$, e as pontilhadas azuis apresenta os valores de $wgt>1$. O eixo x é a fração de raízes finas (FRF) e o eixo y é a profundidade do solo (z ; cm).



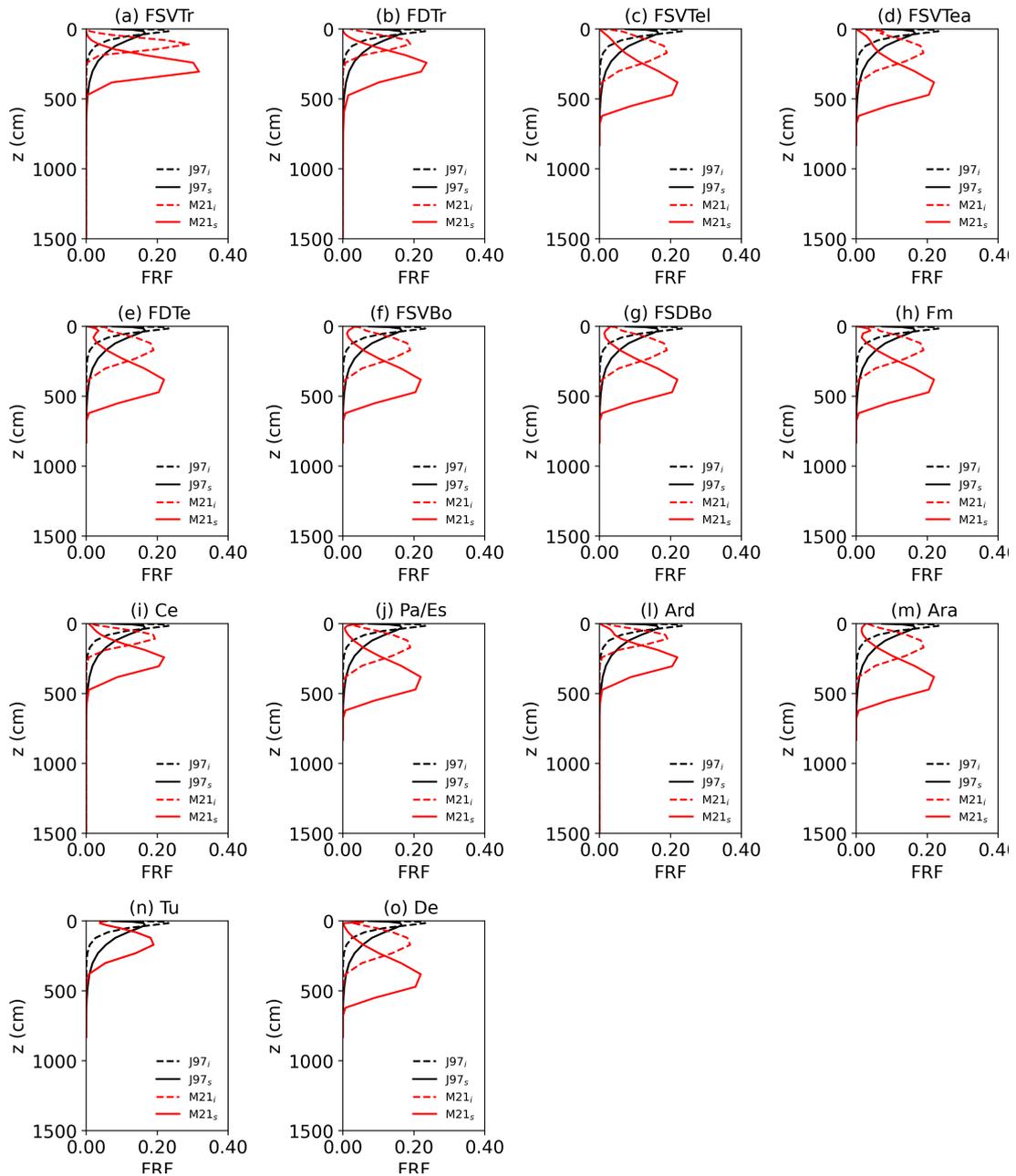
FONTE: Elaboração da autora.

As distribuições de raízes finas para cada classe de vegetação é apresentada na Figura 5.9. J97 está representando a parametrização de raízes finas proposta por Jackson et al. (1997) (linhas pretas) e M21 caracteriza a nova parametrização de raízes finas (linhas vermelhas) (Equação 5.14). As linhas contínuas indicam as distribuições de raízes finas do dossel superior e as linhas tracejadas indicam as distribuições de raízes finas referente ao dossel inferior. Os gráficos ilustram que a parametrização de J97 possui um perfil vertical constante e fixo para todos os tipos de vegetação. Além de apresentar um perfil raso com raízes finas próximas da superfície e invariante no tempo, isso impacta em uma distribuição fracionária de raízes finas em cada

camada de solo. Estudos indicam que algumas plantas possuem raízes capazes de acessar camadas mais profundas do solo para absorver água e nutrientes (GERMON et al., 2020).

A nova parametrização apresenta diferenças nas distribuições de raízes finas para cada classe de vegetação (Figura 5.9). Por exemplo, quando se comparadas a parametrização J97, os perfis com a parametrização M21 indicam máxima fração de raízes finas (FRF) em camadas mais profundas de solo. A capacidade dessa nova abordagem de desenvolver perfis de raízes finas distintas em regiões com condições climáticas diferentes, indicam uma possível melhora na nova representação de raízes finas.

Figura 5.9 - Distribuições de raízes finas para cada PFTs do modelo IBIS-CPTEC. As linhas pretas representam a atual parametrização de Jackson et al. (1997) (J97) e as linhas vermelhas estão associadas a nova parametrização de raízes finas (M21). Os índices i e s correspondem, respectivamente, dossel inferior (linhas tracejadas) e dossel superior (linhas contínuas). FRF é a fração de raízes finas e z é a profundidade do solo em cm.



FONTE: Elaboração da autora.

5.3 Discussão

Entender o comportamento de variação da biomassa de raízes finas de cada tipo de vegetação é fundamental para o desenvolvimento e implementação de uma parametrização de raízes finas dinâmica em modelos de superfície. Os resultados revelam que a biomassa radicular é sensível às alterações climáticas. Em ecossistemas de pastagens, a correlação entre BRF e PREC foi insignificante, entretanto, nos biomas de florestas e arbustos (plantas lenhosas) apresentam que alteração na precipitação influencia no comportamento da vegetação, conseqüentemente, na distribuição de raízes finas.

Com base nas correlações significativas deste estudo, ressalta-se a importância da precipitação e da umidade do solo na BRF. Para as correlações positivas, uma explicação é que a precipitação fornece umidade suficiente para o solo e mantém alta a disponibilidade de água (CUI *et al.*, 2019). Em ecossistemas secos, a precipitação é um fator limitante para o crescimento de raízes finas, e a umidade do solo disponível é o principal fator do aumento da biomassa radicular. O aumento de BRF com a redução da umidade do solo, corrobora com os estudos de Leuschner *et al.* (2001) e Liu *et al.* (2017). Em situações de estresse hídrico, a raiz da planta pode alcançar as camadas mais profundas do solo para conseguir mais água e nutrientes (LI *et al.*, 2019). Entretanto, para o crescimento de raízes ocorre um aumento na alocação de carbono (C) ao sistema radicular (KRAMER; BOYER, 1995; LEUSCHNER *et al.*, 2001; RANGARAJAN *et al.*, 2018). Sendo assim, o aumento da biomassa de raiz por efeito da diminuição de umidade do solo está possivelmente relacionado à mudança na alocação de carbono.

Além disso, as respostas da BRF à precipitação e umidade do solo podem diferenciar entre plantas de grande e baixo portes. Por exemplo, no período chuvoso as plantas de grande porte aproveitam melhor a disponibilidade de água no solo, conseqüentemente, essas plantas têm taxa de transpiração mais elevada, por este motivo suas raízes necessitam ser mais adaptável ao aumento de umidade do solo do que raízes de plantas de baixo porte (WANG *et al.*, 2020). Durante o período seco, plantas de grande porte com raízes profundas conseguem resistir ao estresse hídrico do solo. Através da elevação hidráulica, as raízes das plantas redistribuem água das camadas úmidas para as camadas secas de solo, como estratégia de sobrevivência (PRIETO *et al.*, 2012). Em comparação às plantas de grande porte e raízes profundas, as plantas de baixo porte com raízes rasas são mais sensíveis às estações secas e menos resistentes ao estresse hídrico do solo (MORAES *et al.*, 2019), isso pode estar relacionado

à distribuição radicular próxima da superfície e suas raízes não conseguem atingir grandes profundidade.

A temperatura e a BRF apresentaram correlações positivas e negativas, indicando que a TEMP um fator significativo para o aumento ou redução da biomassa de raízes finas. As raízes crescem lentamente quando o solo está frio, mas crescem rapidamente quando o solo é aquecido a uma temperatura ideal (MONTAGNOLI et al., 2019). No entanto, nas vegetações localizadas em regiões de clima frio e pouca umidade, o crescimento de raízes finas é limitado, mas ocorre uma grande rotatividade radicular como estratégia de sobrevivência das vegetações às condições ambientais (GöBEL et al., 2019).

Esse estudo confirmou observações anteriores de correlações positivas entre as biomassas acima e abaixo do solo (KIM et al., 2016). As folhas absorvem C e alocam uma parcela para as raízes, mas é necessário N das raízes para realizar isso, e vice-versa (MCMURTRIE; DEWAR, 2013). As relações encontradas sugerem que as folhas exercem uma função importante na absorção de energia e ciclagem do carbono, e aponta que existe uma conexão peculiar entre biomassas radicular e de folha.

Comparando a nova parametrização de raízes finas com a parametrização de Jackson et al. (1997), as plantas alocam carbono para as raízes temporariamente, resultando em uma mudança líquida na fração de raízes finas dentro de cada camada de solo (CHRISTINA et al., 2017). Na atual parametrização de raízes finas (JACKSON et al., 1997), a resposta da vegetação ao estresse hídrico do solo é controlado inteiramente pela hidrologia local, ou seja, este esquema não possui mecanismo capaz de modular as raízes às condições locais (SIVANDRAN; BRAS, 2013; SMITHWICK et al., 2014; OORSCHOT et al., 2021). Isso pode induzir a erros nas simulações numéricas de alocação de carbono (C) e de fluxos de superfície. Uma parametrização dinâmica de raízes finas capaz de variar a fração líquida de raízes finas em cada camada de solo, visto que a absorção de água é realizada através da distribuição de raízes finas, terá um impacto mais significativo nas simulações numéricas de C e fluxos de superfície.

Além disso, na parametrização estática proposta por Jackson et al. (1997) a máxima fração de raízes finas pode estar em uma camada de solo que possui baixo teor de umidade do solo, o que irá impactar na simulação da transpiração das plantas. No caso da nova parametrização, a fração máxima de raízes finas pode estar localizada em camadas com alto teor de umidade do solo, resultando em um perfil mais realista e melhorando a estimativa da transpiração das plantas nos modelos de superfície (SIVANDRAN; BRAS, 2013; LU et al., 2019).

Apesar de Jackson et al. (1997) sugerir parâmetros de raízes finas (β) específicos para cada tipo funcional de plantas (PFTs), a maioria dos modelos de superfície utilizam o mesmo valor de β para todos os PFTs. Assim, a representação das distribuições de raízes finas de uma árvore de grande porte e uma gramínea são as mesmas. No entanto, o β da nova distribuição de raízes finas tem um valor próprio para cada classe de vegetação.

No modelo IBIS é utilizada uma profundidade do solo fixa para todos os tipos de solo (WANG et al., 2016). No entanto, a profundidade do solo afeta significativamente a umidade do solo, o escoamento e o fluxo subterrâneo de água e calor. Também fornece uma estimativa da capacidade de água disponível e desempenha um importante controle na evapotranspiração (CAO et al., 2018). Com a nova parametrização é possível tornar as estimativas dos modelos de superfície mais realistas, visto que para cada ponto de grade pode-se relacionar sua respectiva profundidade do solo.

5.4 Conclusão

O novo esquema da distribuição de raízes finas proposto é em função da biomassa de raízes finas, condições ambientais e profundidade do solo. Esse esquema dinâmico permite que a vegetação responda às condições ambientais da região modulando as frações de raízes finas em cada camada de solo. Os efeitos significativos da TEMP, US, PREC e NPP na biomassa de raízes finas indicam que mudanças nas condições ambientais são provavelmente o principal mecanismo responsável pelo comportamento de biomassa de raízes finas.

Em comparação com a distribuição estática de raízes finas dos modelos de superfície (JACKSON et al., 1997; CANADELL et al., 1996), a nova parametrização inclui distribuição das raízes finas dinâmica e profundidade do solo variável a cada ponto de grade. Além disso, o novo esquema da distribuição de raízes finas é de fácil implementação em modelos de superfície.

Apesar dessa parametrização ser variável no espaço, a fração de raízes finas varia apenas horizontalmente. Processos de elevação hidráulica (VANDERBORGHT et al., 2021) podem aumentar a eficiência de algumas raízes profundas na captação de água, assim como analisar o comportamento de raízes finas para cada tipo de solo (CUI et al., 2019) podem melhorar as abordagens de distribuições de raízes finas. Entretanto, mais pesquisas são indispensáveis para entender até que ponto a elevação hidráulica e a textura do solo são importantes na modelagem de raízes finas.

Deste modo, a nova distribuição de raízes finas não deve ser tomada como “verdade”, em vez disso, representa uma melhora considerável sobre a distribuição de raízes finas estáticas (JACKSON et al., 1997; CANADELL et al., 1996) e permite uma referência para avanços adicionais conforme dados se tornam disponíveis.

6 IMPLEMENTAÇÃO DA NOVA PARAMETRIZAÇÃO DE RAÍZES FINAS NO MODELO IBIS-CPTEC

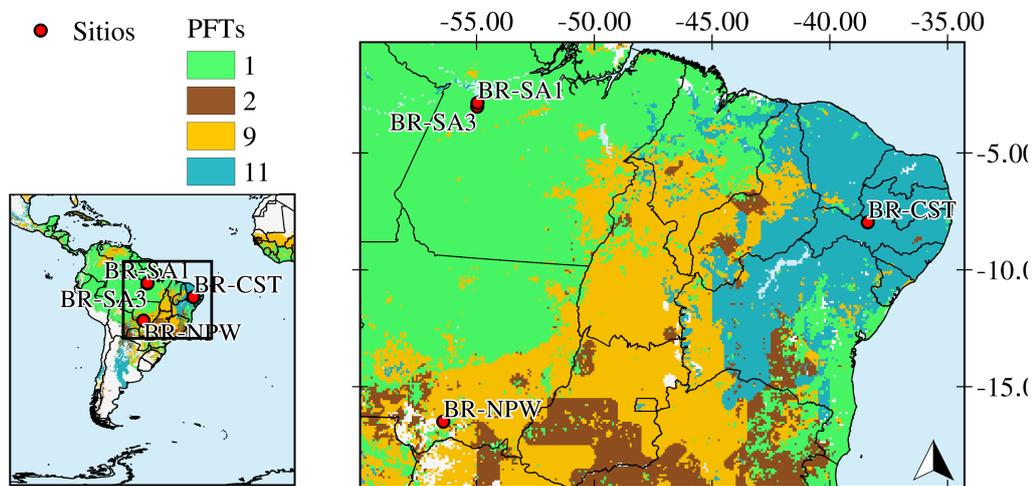
Neste capítulo, a nova parametrização de raízes finas (desenvolvida no capítulo anterior) foi incorporada no modelo IBIS-CPTEC (*off-line*) para analisar os efeitos da dinâmica de raízes finas na modelagem dos fluxos de superfície. Inicia-se apresentando a área de estudo e os sítios selecionados para as análises. A segunda etapa refere-se a descrição dos experimentos e avaliação da nova parametrização de raízes finas. Posteriormente, o capítulo aborda comparações entre as duas parametrizações de raízes finas. O desempenho do modelo foi avaliado usando dados observados de quatro locais sob diferentes biomas.

6.1 Metodologia

6.1.1 Área de estudo

As áreas de estudo localizam-se no norte, nordeste e centro-oeste do Brasil, abrangendo os estados do Pará, Pernambuco e Mato Grosso, regiões que possuem características próprias e distintas umas das outras. A Figura 6.1 mostra a distribuição dos biomas definidos neste estudo, conforme o modelo IBIS. A Tabela 6.1 apresenta a caracterização da área em estudo, com uma breve apresentação de sua localização, os PFTs segundo o mapa de vegetação do modelo IBIS (KUCHARIK et al., 2000), período utilizado no estudo e uma resumida descrição da região. Tais informações foram obtidas através da plataforma do FLUXNET.

Figura 6.1 - Localização dos sítios estudados e distribuição dos biomas conforme o modelo IBIS.



FONTE: Kucharik et al. (2000).

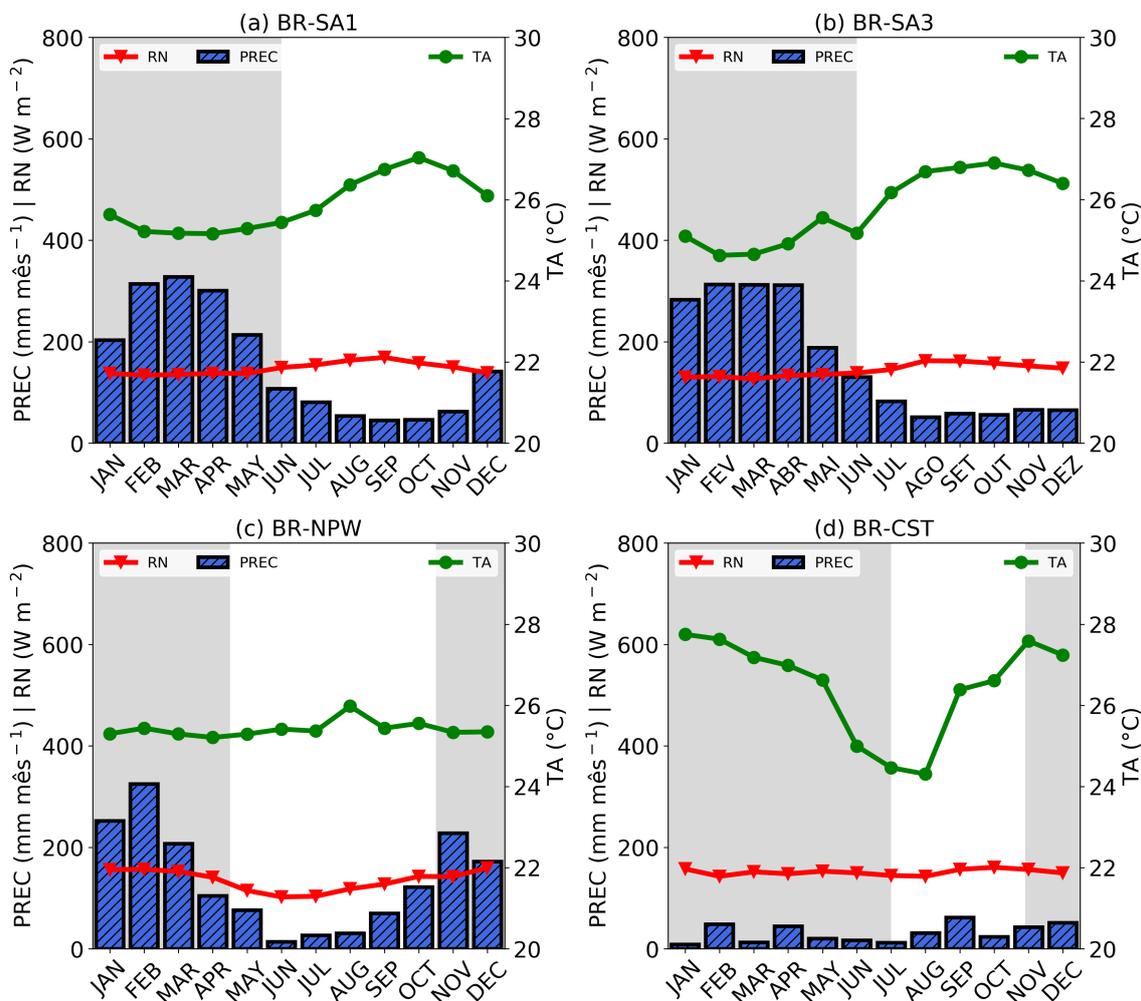
Tabela 6.1 - Principais características dos sítios e período de estudo.

PFTS	SÍTIOS	LOCALIZAÇÃO	PERÍODO	DESCRIÇÃO
(1) FSVTr	BR-SA1	-2.8567; -54.9589 (Santarém - PA)	Janeiro de 2002 - Dezembro de 2005	Esta floresta primária está localizada na Floresta Nacional do Tapajós, uma floresta fechada na Amazônia. Região dominada por vegetação lenhosa, quase todas as vegetações permanecem verdes durante todo o ano.
(2) FDTTr	BR-SA3	-3.0180; -54.9714 (Santarém - PA)	Janeiro de 2000 - Dezembro de 2004	Floresta desmatada, região denominada por vegetação lenhosa, com altura superior a 2 metros.
(9) Ce	BR-NPW	-16.4980; -56.4120 (Pantanal Norte)	Janeiro de 2014 - Junho de 2017	Localizada no norte do Pantanal, centro-oeste brasileiro. A região é sujeita a inundações sazonais com estações chuvosas e secas bem definidas. Região com herbáceos e outros sistemas de sub-bosque.
(11) Ard	BR-CST	-7.9682, -38.3842 (Serra Talhada-PE)	Janeiro de 2014 - Julho de 2015	Localizada em uma área de floresta tropical seca sazonal (caatinga) na região semi-árida brasileira. É uma região aberta e há pastagem. Não há extração de madeira há pelo menos 50 anos. Florestas de folha-agulha decíduas.

FONTE: Pastorello et al. (2020).

O entendimento e caracterização das áreas de estudo dependem do comportamento médio de variáveis climáticas, a Figura 6.2 mostra as médias mensais do balanço de radiação, temperatura do ar e precipitação, conforme os dados observados dos sítios em estudo (Tabela 6.1). O sítio Br-SA1, no período de 2002 a 2005, registrou temperatura média anual do ar e RN de 25,89 °C e 147,11 W.m⁻², respectivamente. A oscilação da temperatura do ar mensal foi menor que 2 °C. A radiação solar no período seco foi relativamente maior do que no período chuvoso. A precipitação anual total foi 1899,21 mm com menos de chuva no período seco (Figura 6.2a). O Br-SA3 no intervalo de janeiro de 2000 a dezembro de 2004 apresentou chuva total anual média de 1918,02 mm, fevereiro – março – abril os meses mais chuvosos em torno de 312 mm e agosto o menos chuvoso (51,41 mm). A temperatura média anual do ar foi de 25,81 °C, com máxima anual de 26,09 °C e a mínima anual de 24,62 °C (Figura 6.2b). O RN médio anual de 143,49 W.m⁻², variando de 126,53 W.m⁻² (período seco) a 162,44 W.m⁻² (período chuvoso). Conforme a Figura 6.2c (BR-NPW), a temperatura média anual do pantanal é de 25,41 °C, apresentando valores médios anuais de máximo e mínimo em torno de 25,98 °C e 25,21 °C, nessa ordem. Observa-se precipitação anual total e RN médio anual de 1629,84 mm e 134,87 W.m⁻², respectivamente. Dentre todos os sítios, o BR-CST apresentou a maior variação de temperatura média anual do ar, cerca de, 3,44 °C. A menor média da precipitação anual total (375,21 mm) e a maior média da radiação solar anual (151,14 W.m⁻²) (Figura 6.2d).

Figura 6.2 - Média mensal da precipitação (PREC; mm.mês⁻¹; barras azuis), temperatura do ar (TA; °C; linha vermelha com triângulos) e saldo de radiação (RN; W.m⁻²; linha verde com círculos) para os sítios (a) BR-SA1 , (b) BR-SA3, (c) BR-NPW e (d) BR-CST conforme o período descrito na Tabela 1. A área cinza indica o período chuvoso e a branca está relacionada ao período seco.



FONTE: Elaboração da autora.

6.1.2 Descrição dos experimentos

A execução do modelo IBIS-CPTEC baseou-se em analisar os efeitos da nova distribuição de raízes finas em quatro distintos tipos de vegetação presentes na América do Sul. Foram realizadas simulações usando a atual parametrização de raízes finas (J97) proposta por Jackson et al. (1997) (Seção 4.1) e o novo esquema proposto com distribuição dinâmica de raízes finas (M21) (Seção 5.2.3).

Os dados do GLDAS (descritos na Seção 3.5) foram usados como forçantes do modelo, a simulação J97 e o experimento M21 compartilharam as mesmas condições iniciais. Este conjunto de dados contém dados de 3 horas e resolução de $0,25^\circ$ da velocidade do vento, temperatura do ar, precipitação, radiação de onda curta e onda longa, e umidade relativa do ar.

O período de integração para cada sítio foram conforme os dados observados do FLUXNET disponíveis: de janeiro de 2002 a dezembro de 2005, janeiro de 2000 a dezembro de 2004, janeiro de 2014 a junho de 2017 e janeiro de 2014 a julho de 2015, respectivamente, BR-SA1 (4 anos), BR-SA3 (5 anos), BR-NPW (4,5 anos) e BR-CST (1,5 anos). Foram simulados fluxos de calor sensível (H) e latente (LE), saldo de radiação (RN), albedo superficial (α), umidade do solo e temperatura do solo.

Para a simulação com a nova parametrização de raízes finas, o modelo foi configurado conforme as Tabelas 6.2 e 6.3. Para cada sítio são utilizadas equações diferentes para estimativa de BRF e função peso. Além de valores distintos de β , α e profundidade do solo (descritos no Item 3.4).

Tabela 6.2 - Conjunto de equações para o cálculo da biomassa de raízes finas (BRF) e função peso (wgt) de acordo com as Tabelas 5.3 e 5.4.

PFTs	MODELOS DE BRF	FUNÇÃO PESO (wgt)
1	$BRF=0,00412NPP+0,00245TS-0,00104US$	$WGT=1,52BRF+0,199$
2	$BRF=0,3434NPP+0,00088371TS-0,0000095US$	$WGT=1,19BRF+0,50$
9	$BRF=01417NPP+0,0056628TS-0,003020164US$	$WGT=2BRF-0,30$
11	$BRF=0,01297793NPP+0,00394534TS-0,00118412US$	$WGT=1,43BRF+0,43$

Tabela 6.3 - Valores de β , θ e profundidade máxima do solo (dmax) para cada PFTs referentes às duas camadas de vegetação do modelo de superfície IBIS semelhantes à Tabela 5.5. Em que, s representa a camada de vegetação superior e i é referente a camada de vegetação inferior.

PFTs	β (i)	β (s)	θ (i)	θ (s)	dmax (m)
1 (BR-SA1)	2,10	2,80	200	470	38,46
2 (BR-SA3)	1,40	3,00	45	400	46,80
9 (BR-NPW)	0,30	0,80	50	350	37,08
11 (BR-CST)	0,80	1,10	10	350	28,23

6.1.3 Avaliação da nova parametrização

Para avaliar o desempenho da nova parametrização serão utilizados alguns parâmetros estatísticos básicos e conhecidos na modelagem. Dentre eles, o erro médio (ME, sigla em inglês), que representa a tendência do modelo superestimar ou subestimar as variáveis simuladas em relação às observadas. O ME é definida pela Equação 6.1 (SHEN et al., 1998; SPIEGEL; STEPHENS, 2000):

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N X_{sim,i} - X_{obs,i}}{N} \quad (6.1)$$

A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE, em inglês), é geralmente usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos, representada pela Equação 6.2 (SHEN et al., 1998):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{obs,i})^2}{N}} \quad (6.2)$$

O índice de concordância (d) que mede a precisão dos valores simulados em relação aos observados, dado pela Equação 6.3 (WILLMOTT et al., 1985):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (|X_i - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs,i} - \bar{X}_{obs}|)^2} \quad (6.3)$$

Considerando que X_{sim} serão os valores referentes a simulação numérica, X_{obs} serão os dados em campos observados e N representa o número de valores.

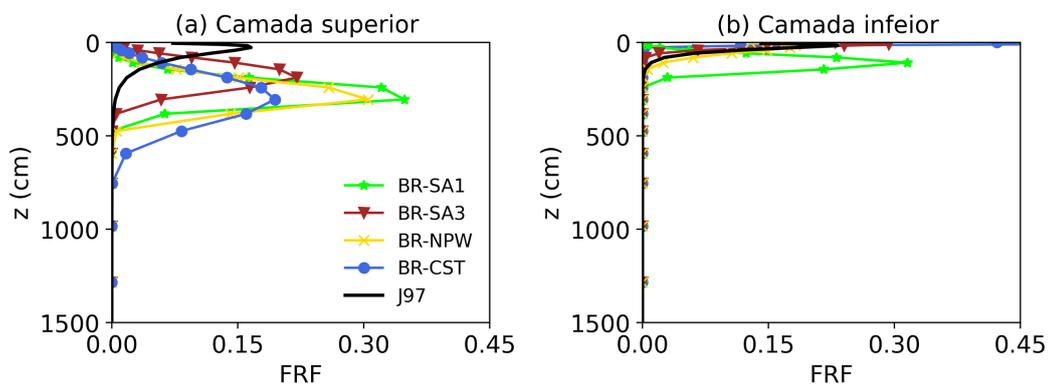
A avaliação do desempenho dos experimentos foi realizada usando uma combinação de dados observados do FLUXNET (Seção 3.3) e do GLDAS (Seção 3.5). As simulações do H e LE foram comparadas com observações do FLUXNET, o RN e α foram comparados com dados do GLDAS. Sendo os dados do FLUXNET e GLDAS considerados os observados.

6.2 Resultados

6.2.1 Simulações das distribuições de raízes finas

A distribuição de raízes finas no modelo IBIS-CPTEC (KUBOTA, 2012), são representadas através da fração de raízes finas em cada camada do solo. A Figura A.5 ilustra o perfil médio das raízes finas ao longo dos experimentos, para as vegetações do dossel superior (Figura A.5a) e inferior (Figura A.5b). A curva preta representa o perfil médio da raiz utilizada para o experimento J97, a qual é invariante no tempo e no espaço e, indiferente para a variação dos biomassas. E as curvas coloridas são os perfis de raízes finas para os experimentos com a nova parametrização, conforme a legenda descrita nas Figura A.5a e Figura A.5b.

Figura 6.3 - Perfil vertical médio da distribuição de raízes finas ao longo das simulações referentes aos sítios. A linha preta representa o perfil de raízes da simulação J97 e as linhas coloridas estão associadas ao experimento M21.



FONTE: Elaboração da autora.

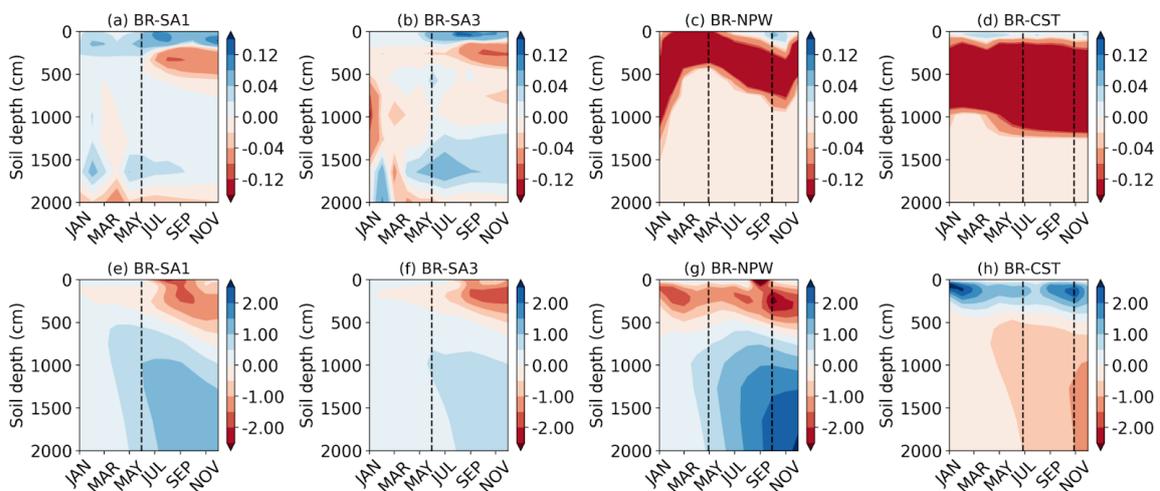
A parametrização M21 estima os perfis específicos para cada tipo de vegetação, em outras palavras, possui a capacidade de gerar perfis médios de raízes para regiões com diferentes condições climáticas e desenvolvimento da vegetação. Esta diferença é notória principalmente na distribuição de raízes finas da copa superior, com um máximo de fração nas camadas do solo mais profundas, conseqüentemente, este novo esquema consegue modular a evapotranspiração em função da distribuição espacial de raízes finas, de forma mais realista e distinta da parametrização J97. No entanto,

existem dúvidas a respeito dos mecanismos que dominam a fenologia das raízes finas nas camadas profundas do solo (RADVILLE et al., 2016) que ainda necessita ser explorado.

Para garantir que a nova parametrização responda adequadamente à variabilidade das condições ambientais, principalmente da umidade do solo, a copa inferior caracteriza-se por apresentar a máxima fração de raízes finas próxima à superfície, auxiliando o controle de umidade dessas camadas (CHRISTOFFERSEN et al., 2014; CHRISTINA et al., 2017). Entretanto, para ambos os dosséis, o controle de absorção de umidade do solo não depende apenas da distribuição de raízes (GERMON et al., 2020), mas também da fração de cobertura vegetal de cada copa e das condições climáticas do ambiente.

As características da nova parametrização de distribuição de raízes finas para as vegetações dos dosséis superior e inferior são apresentadas na Figura A.5. A partir da parametrização M21 verifica-se que a absorção da umidade do solo será absorvida em camadas mais profundas em relação à simulação J97. Estas características são verificadas ao analisar a Figura 6.4, onde o comportamento de maior absorção de umidade do solo ocorre nas camadas de máxima concentração de fração de raízes finas em relação à parametrização J97.

Figura 6.4 - Diferenças entre a simulação com nova parametrização (M21) e a controle (J97) da (a, b, c, d) umidade do solo em % e da (e, f, g, h) temperatura do solo em °C para os quatro sítios em estudo. As linhas pretas tracejadas separam o período chuvoso e seco.



FONTE: Elaboração da autora.

A influência da parametrização M21 também pode ser observada sazonalmente nos diferentes sítios utilizados nos experimentos. No sítio BR-SA1, as estimativas de umidade e temperatura do solo durante a estação seca (Figura 6.4a, e), apresentam valores superiores à simulação J97 em camadas mais profundas do solo. Em camadas próximas à superfície, o experimento com a parametrização J97 é mais úmido e frio do que o experimento com a parametrização M21, este padrão pode ser explicado analisando a Figura A.5b, onde a fração de raízes finas do dossel inferior é maior no experimento M21, aumentando a absorção de umidade nestas camadas e a redução de temperatura no período seco em relação à simulação J97. Nas camadas intermediárias durante a estação seca verifica-se que há uma redução de umidade e temperatura do solo no experimento M21, esta redução é em função da redução de precipitação no período seco e a maior fração de raízes finas na nova distribuição (Figura A.5a). Na estação chuvosa, houve um pequeno aumento da umidade e temperatura do solo, estas pequenas diferenças entre as estimativas indicam que a alteração da distribuição de fração de raízes finas é importante quando aumenta o estresse hídrico.

As novas distribuições de raízes referentes ao sítio BR-SA3 (Figura A.5), apresentam uma maior fração de raízes finas em relação à atual parametrização. Entretanto, no dossel superior, a máxima quantidade de raízes finas está em camadas mais profundas e no dossel inferior na mesma camada da simulação J97. O padrão das análises das simulações de umidade e temperatura do solo são similares à BR-SA1. Entretanto, nas camadas mais profundas verifica-se que há uma pequena redução de umidade e um aumento de temperatura em relação ao sítio BR-SA1. A redução na umidade está relacionada a uma maior fração de raízes finas do dossel superior no experimento M21. Analisando os experimentos para os sítios BR-SA1 e BR-SA3 observa-se que tanto nos experimentos com parametrização M21 quanto J97 que a diferença da distribuição de raízes finas é maior durante o período seco.

A nova distribuição de raízes finas do dossel superior da região do BR-NPW tem amplitude maior (θ) e uma maior fração de raízes finas distribuídas em camadas mais abaixo do que na simulação J97 (Figura A.5a). Este novo padrão de distribuição de raízes finas remove mais umidade (Figura 6.4c) nesta camada intermediária em relação ao perfil vertical de raízes na simulação controle (J97). As camadas mais profundas no experimento com parametrização M21 também sofrem uma pequena redução de umidade em função da maior absorção de umidade pelas raízes finas, nas camadas intermediárias em relação à simulação J97. Na simulação com a parametrização J97, o dossel superior e inferior da vegetação, tem as distribuições de

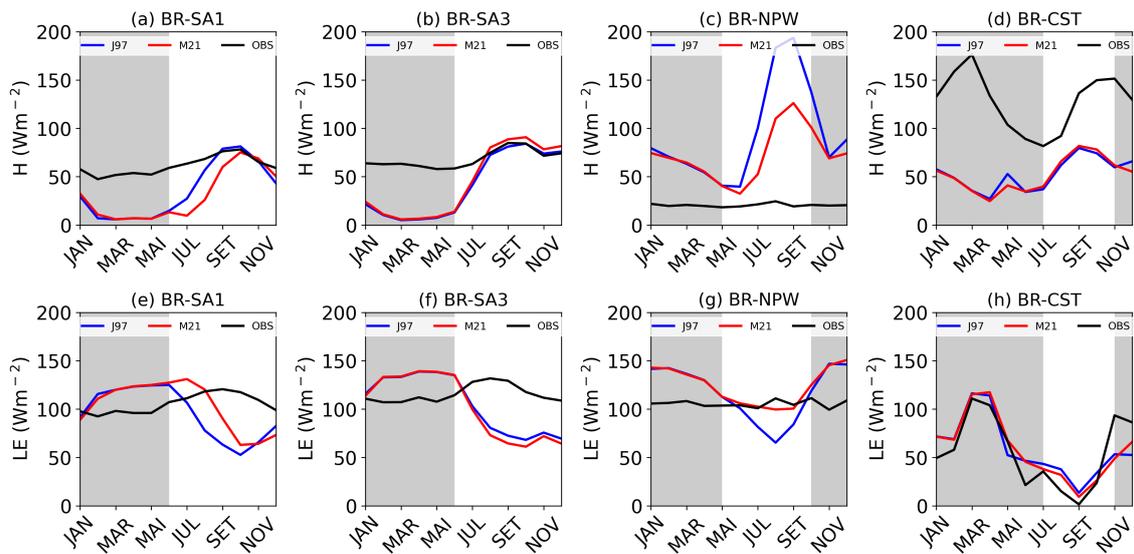
raízes próximo à superfície, este enraizamento raso, absorve mais umidade em níveis próximos à superfície. Nesta camada de solo, o experimento M21 tem mais umidade durante a estação seca devido a menor quantidade de fração de raízes finas em relação à simulação controle (J97). Considerando as condições ambientais e a climatologia de precipitação do sítio BR-NPW, observa-se que a umidade do solo tem um ciclo sazonal bem pronunciado, intensificado com a nova parametrização de raízes finas. A nova parametrização de raízes finas mostra uma redução de temperatura nas camadas mais acima e um aumento nas camadas mais inferiores, mostrando a tendência de armazenar mais energia em camadas mais profundas.

A nova parametrização para o sítio BR-CST estimou uma fração de raízes finas dominante para o dossel superior em relação ao dossel inferior (Figura A.5), entretanto essa distribuição de raízes finas para o dossel superior se concentra nas camadas intermediárias um pouco abaixo da distribuição de raízes finas estimada no experimento J97. As distribuições de raízes finas dos experimentos J97 e M21 na copa inferior apresentam a máxima fração de raízes finas próxima à superfície. Entretanto, o aumento na fração de raízes na nova distribuição no dossel inferior indica maior presença de vegetação do tipo pastagem, conforme detalhado na Tabela 6.1. Desse modo, a absorção de água ao longo do perfil do solo, não depende apenas da distribuição de raízes finas com a profundidade, mas também da cobertura da copa. Em camadas profundas do solo, a umidade geralmente é mais elevada e as variações de temperaturas são mais baixas do que próximo à camada superficial do solo (DU; FANG, 2014). Alguns estudos comprovaram que a vegetação da Caatinga tem fração de raízes finas mais profundas durante o inverno. Durante o verão, o conteúdo de água no solo tende a evaporar rapidamente e durante o inverno as raízes acessam as camadas profundas do solo para retirar a água armazenada (SCHWINNING; EHLERINGER, 2001; SCHENK; JACKSON, 2002b). Este comportamento pode ser verificado na Figura 6.4d, na primeira metade do ano (período chuvoso), a nova parametrização de raízes finas têm uma maior absorção de umidade nas camadas intermediárias em relação à parametrização J97. No período seco, correspondente à segunda metade do ano, a absorção de umidade se concentra nas camadas mais profundas e impacta diretamente na temperatura (Figura 6.4h). Devido a uma maior absorção de umidade nas camadas intermediária e profundas, o solo fica mais seco e a temperatura com a nova parametrização de raízes finas tende a ser mais fria em relação à parametrização J97, indicando uma maior perda de energia armazenada no solo.

6.2.2 Efeitos da nova parametrização de raízes finas nos ciclos anuais dos fluxos de superfície

Para uma melhor avaliação dos efeitos da nova parametrização de raízes nos fluxos de superfície, foram estimados os ciclos anuais de H e LE para os períodos dos experimentos nos quatro diferentes sítios (Figura 6.5). No período chuvoso, ocorreu uma superestimativa do LE em ambas as parametrizações, exceto no sítio BR-CST (Figura 6.5h) onde os experimentos acompanharam o padrão dos dados observados. Mesmo os perfis de raízes finas no sítio BR-SA1 e BR-SA3 (Figura A.5) serem mais realistas e diferentes da parametrização J97, não houve uma melhora na simulação dos fluxos de calor latente. Geralmente no período úmido, a maior parte da energia disponível é convertida em calor latente, no período seco em calor sensível (MYHRE et al., 2018).

Figura 6.5 - Ciclos anuais das simulações do H e LE, em comparação com as observações (áreas sombreadas indicam a estação chuvosa).



FONTE: Elaboração da autora.

Os dados observados dos sítios BR-SA1 e BR-SA3 apresentam inversões nos comportamentos sazonais dos fluxos de calor latente, os menores valores do LE ocorreram no período chuvoso, enquanto que os maiores ocorreram no período seco. Este padrão encontrado nos dados observados pode ser explicado através do processo de redistribuição hidráulica (RICHARDS; CALDWELL, 1987; HAFNER et al., 2017b). As

raízes das plantas extraem água do solo em camadas mais úmidas e a distribuem em camadas mais secas (YU; D'ODORICO, 2014), no caso dos sítios BR-SA1-SA3, extraem de camadas mais profundas e restauram em camadas rasas. Nestes sítios a umidade do solo tem pouca variabilidade (Figura 6.4a, b), assim a magnitude é mantida o ano todo. No período seco, o gradiente de umidade entre a atmosfera e a superfície é maior, aumentando o fluxo de umidade para a atmosfera.

O H também apresentou uma divergência dos dados observados no período chuvoso, indicando uma subestimativa nos sítios BR-SA1, BR-SA3 e BR-CST (Figura 6.5a, b, d). É evidente que a subestimativa do sítio BR-CST está relacionada a muita umidade próxima da superfície, assim a temperatura do solo nas camadas mais profundas não é afetada. Segundo Germon et al. (2020) em camadas profundas a umidade e temperatura do solo são mais constantes, variando menos sazonalmente e ao longo do dia em relação às camadas mais rasas e, conseqüentemente afetam o desenvolvimento das raízes finas por toda extensão do solo.

As estimativas do calor sensível durante o período seco nos sítios BR-SA1 e BR-SA3 mostraram que os experimentos com a nova parametrização estão próximos do experimento J97 e dos dados observados (Figura 6.5). Comparando os perfis verticais médios de raízes dos experimentos (Figura A.5), a parametrização M21 permite maior absorção de água nas camadas mais profundas em relação à parametrização J97, ou seja, uma parametrização dinâmica de raízes finas não é o único parâmetro que necessita de ajuste no modelo IBIS-CPTEC para uma melhor estimativa dos fluxos de superfície.

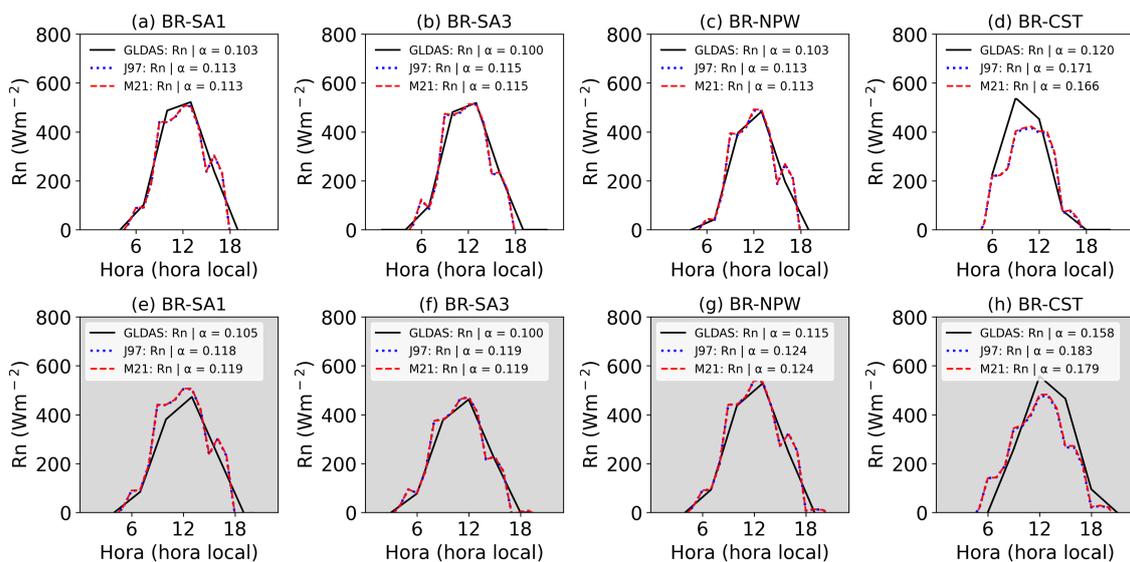
É importante observar que nas simulações J97 e M21, os erros tendem a diminuir moderadamente no período seco, portanto os resultados das duas parametrizações J97 e M21, representam satisfatoriamente a média mensal do H e LE. Entretanto, a atuação da nova parametrização distribuição de raízes no solo tem um maior efeito em vegetações com raízes mais profundas e menos efeitos em regiões com raízes mais rasas. Essa influência é mais perceptível nas simulações dos fluxos de superfície do BR-NPW, em decorrência de um maior fluxo de calor latente e um menor fluxo de calor sensível em relação ao experimento J97, a qual compreende a uma simulação mais aproximada das observações. Ainda assim, ocorre uma superestimativa do H, que pode estar relacionada à falta de uma representação de áreas alagáveis no modelo (SCHRAPFFE et al., 2021). Como H e LE na observação não apresentam um ciclo sazonal definido, este padrão pode ser explicado pela presença de uma lâmina de água durante o período de coleta dos dados que, conseqüentemente, modifica

as características físicas da superfície e o comportamento dos fluxos de superfície (BIUDES et al., 2009; SILVA et al., 2021b).

6.2.3 Efeito da nova parametrização de raízes finas nos ciclos diurnos de RN, α , H e LE

As variações do RN e albedo de superfície (α) no período seco e chuvoso com ambas parametrizações estão mostradas na Figura 6.6. As características radiativas da superfície diferem em relação ao dado observado, os albedos dos experimentos são ligeiramente maiores do que o albedo da forçante (GLDAS).

Figura 6.6 - Ciclos diurnos médios do Saldo de Radiação (RN) e albedo da superfície (α), durante o período seco (área branca) e chuvoso (área cinza), referentes aos sítios (a, e) BR-SA1, (b, f) BR-SA3, (c, g) BR-NPW e (d, h) BR-CST.



FONTE: Elaboração da autora.

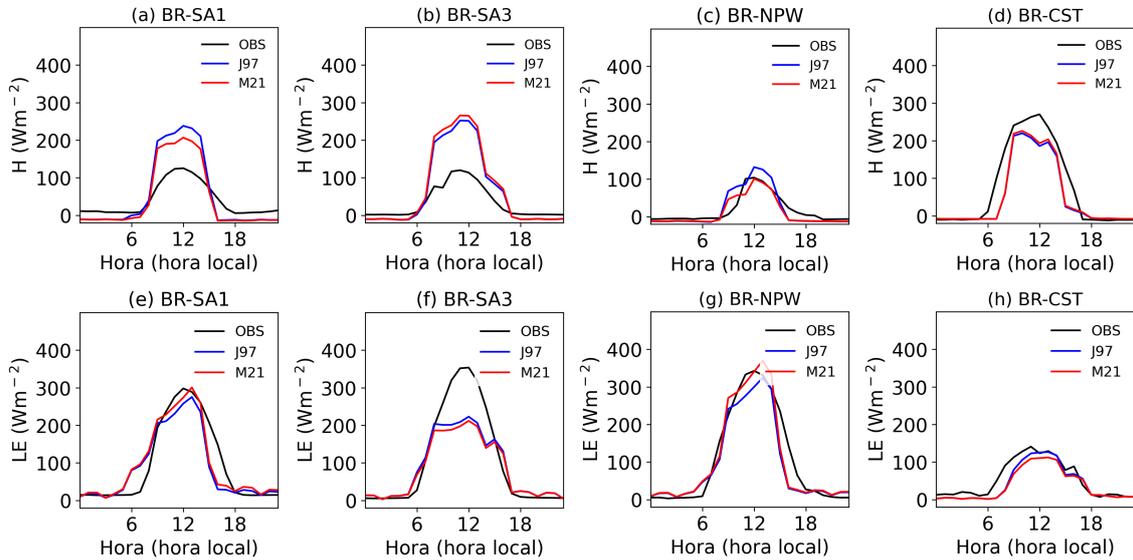
Em geral, as mudanças do albedo da superfície entre períodos seco e chuvoso estão relacionadas à mudança na cor do sistema solo-vegetação, resultante da variação no conteúdo de água no solo (PAVÃO et al., 2015; QUERINO et al., 2017). O α tem variações espaciais e temporais devido às mudanças nas características da superfície, como umidade do solo e cobertura vegetal (FRENCH et al., 2016). Os sítios BR-SA1 (Figuras 6.6 a, e) e BR-SA3 (Figuras 6.6 b, f) por se tratarem de, respectivamente, uma floresta sempre verde e uma área desmatada, ambos com alto regime de precipitação (Figura 6.2), apontam não haver mudanças sazonais significativas nas propriedades

radiativas da superfície. Evidenciando nos resultados dos albedos estimados que não há uma variação significativa entre as estações secas e chuvosas. Além disso, os valores de albedo estimados possuem comportamentos consideravelmente semelhantes entre os experimentos J97 e M21.

No BR-NPW (Figura 6.6c, g), o aumento de α no período chuvoso pode estar relacionado ao solo argiloso e vegetação arbustiva. Além disso, nesta região ocorre inundações sazonais (MACHADO et al., 2016; FERNANDES; ANUNCIACÃO, 2018). Entre os períodos seco e chuvoso, houve uma diferença do albedo médio de 0,011, caracterizando uma cobertura vegetal bastante homogênea durante o ano. No sítio BR-CST (Figuras 6.6d, h), o albedo apresentou diferenças significativas entre as simulações do ciclo diurno médio do período seco e chuvoso. Os albedos estimados durante a estação seca foram inferiores à estação chuvosa, possivelmente devido a uma precipitação significativa durante os meses de agosto e setembro (Figura 6.2d) que favoreceu a umidade do solo, levando a uma resposta rápida das vegetações, consequentemente, contribuindo para um maior aproveitamento de energia disponível e aumento de biomassa (HUI et al., 2018; SILVA et al., 2019; CUNHA et al., 2020).

Com relação ao saldo de radiação, observa-se nas regiões BR-SA1 (Figuras 6.6a, e) e BR-SA3 (Figuras 6.6b, f), um aumento da amplitude do ciclo diurno do saldo de radiação no período seco e uma redução no período chuvoso. Este comportamento está relacionado à maior presença de nebulosidade durante a estação chuvosa. Nos sítios BR-NPW (Figura 6.6c, g) e BR-CST (Figuras 6.6d, h), a amplitude dos ciclos diurnos dos RNs são relativamente maiores durante o período chuvoso e menores no período seco. Embora a nova distribuição de raízes finas seja variável no tempo, parâmetros da cobertura vegetal no modelo IBIS-CPTEC não foram alterados. Portanto, as estimativas médias do RN e α não devem apresentar diferenças significativas entre os experimentos J97 e M21. Mudanças no albedo afetaram o saldo de radiação e, por consequência, os fluxos de superfície. O RN e a reflexão de ondas curtas são inversamente proporcionais, ou seja, quanto menor o albedo da superfície maior será o saldo de radiação (FREY et al., 2007; ANGELINI et al., 2017).

Figura 6.7 - Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE), durante o período seco, referentes aos sítios (a, e) BR-SA1, (b, f) BR-SA3, (c, g) BR-NPW e (d, h) BR-CST.



FONTE: Elaboração da autora.

Apesar dos avanços nas simulações dos ciclos anuais (Figura 6.5), a nova distribuição de raízes finas aponta algumas diferenças em relação aos valores observados. Para entender essas diferenças foram obtidos os ciclos diurnos do H e LE referente aos períodos seco (Figura 6.7) e chuvoso (Figura 6.8). No período seco, os gráficos dos sítios BR-SA1 (Figura 6.7a, e) e BR-SA3 (Figura 6.7b, f) (entre 7h e 17h) mostraram que as duas parametrizações superestimaram o valor de H e subestimaram o LE, inclusive uma maior energia disponível. Os resultados das simulações dos experimentos M21 e J97 indicam que os sítios apresentam pequenas diferenças entre o ciclo diurno da soma H+LE (Figura 6.7a, b) e o RN (Figura 6.6a, b). A maior parte da energia total disponível foi particionada nos fluxos de calor latente e sensível, sendo o fluxo de energia absorvida no solo muito pequena. No sítio BR-SA1 (Figura 6.7a, e), a temperatura do solo utilizada para a inicialização pode estar alta ou a capacidade térmica do sistema solo-vegetação pode ter um valor menor em relação ao valor real. No sítio BR-SA3 o problema da partição de energia pode estar relacionado uma menor umidade do solo estimada pelas simulações devido à incerteza no campo de precipitação usada como forçante. Estas características dos sítios são as principais responsáveis por esse particionamento da energia disponível que resultou no aumento da temperatura do solo, consequentemente, superestimativas do H. Como os períodos de integração são curtos, 4 anos (BR-SA1) e 5 anos (BR-SA3),

ocorre influência das condições iniciais nos experimentos. Durante a estação seca verifica-se que o ciclo sazonal da temperatura do solo (Figura 6.4 e, f) não resfriou suficiente para ter uma estimativa do H e LE consistente com a observação.

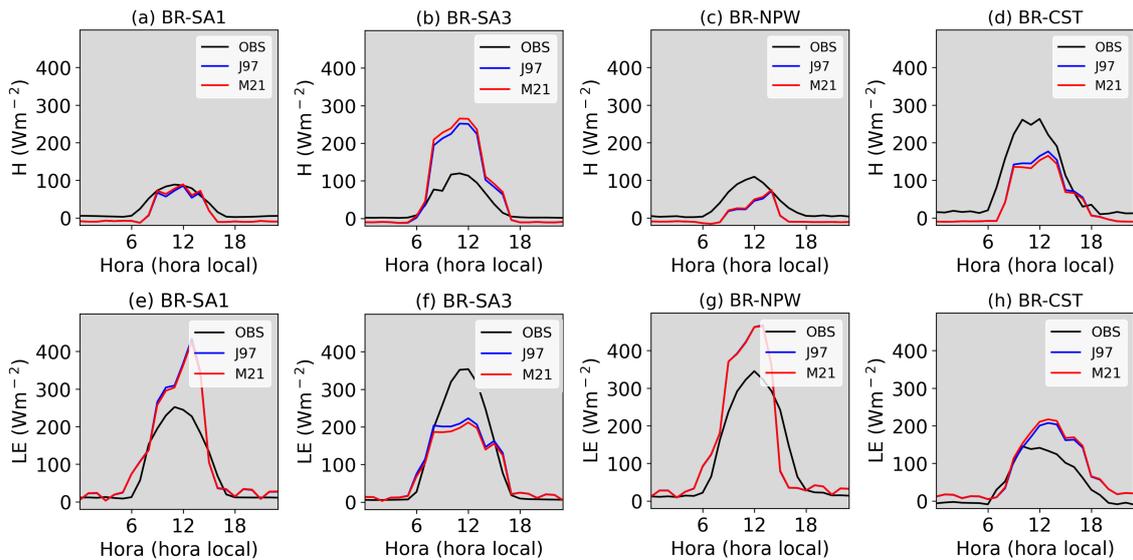
Ainda na estação seca, para o sítio BR-NPW (Figura 6.7c, g), o novo esquema de enraizamento se mostrou mais eficiente para as estimativas do H e LE. A fração de RN para conversão em LE foi maior que a convertida em H, provavelmente relacionado a uma maior disponibilidade de água no solo em camadas mais profundas (SILVA et al., 2021a). A nova parametrização de raízes finas apresentou a simulação dos fluxos consistentes com os dados observados. Os ciclos médios diurnos do BR-CST (Figura 6.7d, h), mostram que as simulações no cálculo do LE foram semelhantes e próximas do observado, e nas estimativas do H apresentaram uma leve tendência de subestimativa. Diante disso, as simulações da umidade e temperatura do solo estão aparentemente conforme a realidade (SILVA et al., 2021a).

Para a estação chuvosa (Figura 6.8), às duas configurações não apresentaram diferenças significativas. Entretanto, quando comparadas com os valores observados, alguns viés são evidentes nas simulações dos fluxos de superfície, especialmente no fluxo de calor latente. Aparenta que ambas as parametrizações apresentam erro que pode estar relacionado a estimativa de precipitação na região e, ao fato de que no período seco não houve muita redução da umidade do solo. Quando chega no período úmido, o solo está bastante úmido e conseqüentemente, superestima a simulação do fluxo de calor latente, que seria a razão para um menor fluxo de calor sensível e um maior fluxo de calor latente simulados durante o dia. Assim, a energia disponível do sistema, proveniente do RN, é convertida em calor latente, que engloba o processo de evapotranspiração (TAQUES, 2018). No sítio BR-NPW (Figura 6.8c, g), as simulações diurnas do LE estão associadas ao alagamento da região. Principalmente na estação chuvosa que a energia disponível no sistema é consumida no processo de evapotranspiração (TAQUES, 2018), devido ao aumento da disponibilidade hídrica da região neste período. Dessa forma, o pico diurno do LE é extremamente elevado, dado que, neste período o tempo em que a lâmina d'água permanece na superfície do solo também é máxima e grande parte da energia disponível é utilizada para evaporar a água na superfície alagada (DUARTE et al., 2019).

Em resumo, a parametrização M21 apresentou melhoras significativas nas estimativas dos fluxos de superfície para o período seco. Esta parametrização que apresenta de forma mais realista a distribuição de raízes, permite que mais carbono seja alocado para camadas mais profundas do solo e, conseqüentemente, ocorre um aumento

da fração de raízes finas nessas camadas. Como resultado, mais água pode ser absorvida pelo sistema radicular, reduzindo o estresse hídrico do solo e aumentando a amplitude do LE.

Figura 6.8 - Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE), durante o período chuvoso, referentes aos sítios (a, e) BR-SA1, (b, f) BR-SA3, (c, g) BR-NPW e (d, h) BR-CST.



FONTE: Elaboração da autora.

6.2.4 Avaliação dos índices estatísticos dos experimentos

As Tabelas 6.4 e 6.5 mostram os índices de concordância e erros calculados dos ciclos diurnos e anuais para os experimentos com as parametrizações J97 e M21. Os resultados geraram um grande número de análises, das quais serão aqui reportadas aquelas consideradas mais relevantes para este trabalho.

As diminuições do RMSE e ME indicam uma melhoria na simulação dos H e LE, em geral, a nova parametrização reduziu os erros associados a uma parametrização invariável no tempo e espaço. Em destaque, o sítio BR-NPW apresenta bons resultados na simulação do ciclo anual durante a estação seca, onde o RMSE do H foi de $112,86 Wm^{-2}$ para $66,80 Wm^{-2}$ e do LE de $33,44 Wm^{-2}$, para $8,39 Wm^{-2}$. Com a parametrização M21, os sítios BR-SA1 e BR-CST melhoram as simulações dos fluxos de superfície (ciclos diurnos secos e chuvosos). Entretanto, quando não foram melhorados, não apresentaram grandes diferenças entre os experimentos J97 e

M21. Os maiores erros relacionados à parametrização M21 foram verificados no sítio BR-SA3 no ciclo diurno do H e LE (período seco), entretanto com pouca diferença dos erros da parametrização J97.

As reduções do RMSE e ME com a parametrização M21, principalmente na estação seca, mostram a sensibilidade do modelo com a nova parametrização (WANG et al., 2016). O índice de concordância (d) mostra uma melhora nos experimentos com a parametrização M21, principalmente nos ciclos diurnos dos fluxos de superfície, quanto mais próximo de 1 for seu valor, maior é o indicativo de que existe uma concordância entre o experimento e o dado observado. Com isso, a substituição de uma parametrização capaz de absorver águas de camadas mais profundas e de se adaptar às condições climáticas da região melhora as simulações dos fluxos de calor sensível e latente.

Tabela 6.4 - Avaliação dos experimentos do fluxo de calor sensível (H) através de Índices estatísticos básicos: Erro Médio (ME), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e Índice de concordância (d).

H	I.E.	BR-SA1 M21 [J97]	BR-SA3 M21 [J97]	BR-NPW M21 [J97]	BR-CST M21 [J97]
DIURNO (P. SECO)	ME	4,22 [13,55]	35,72 [30,46]	-6,85 [0,29]	-24,08 [-26,22]
	RMSE	46,40 [58,83]	73,89 [66,49]	17,05 [22,48]	45,87 [47,08]
	d	0,87 [0,83]	0,76 [0,79]	0,94 [0,93]	0,95 [0,94]
DIURNO (P. ÚMIDO)	ME	-26,37 [-27,70]	-11,83 [-12,74]	-27,51 [-28,29]	-44,77 [-41,77]
	RMSE	29,79 [31,51]	20,81 [22,35]	33,80 [34,89]	59,82 [55,74]
	d	0,87 [0,85]	0,91 [0,89]	0,75 [0,73]	0,87 [0,88]
ANUAL (P. SECO)	ME	-14,49 [-23,77]	-4,63 [-9,88]	56,47 [95,30]	-32,29 [-35,27]
	RMSE	31,98 [22,95]	18,86 [19,14]	66,80 [112,86]	34,33 [37,12]
	d	0,32 [0,53]	0,71 [0,69]	0,04 [0,06]	0,55 [0,53]
ANUAL (P. ÚMIDO)	ME	-40,00 [-0,79]	-50,02 [-51,74]	47,36 [50,64]	-40,59 [-36,84]
	RMSE	40,85 [27,46]	50,97 [52,02]	47,75 [51,73]	42,46 [39,40]
	d	0,12 [0,15]	0,07 [0,07]	0,03 [0,02]	0,53 [0,54]

Tabela 6.5 - Avaliação dos experimentos do fluxo de calor latente (LE) através de Índices estatísticos básicos: Erro Médio (ME), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e Índice de concordância (d).

LE	I.E.	BR-SA1 M21 [J97]	BR-SA3 M21 [J97]	BR-NPW M21 [J97]	BR-CST M21 [J97]
DIURNO (P. SECO)	ME	0,89 [-12,83]	-23,84 [-18,89]	-1,71 [-12,97]	-15,85 [-11,92]
	RMSE	40,67 [46,47]	64,01 [59,22]	37,49 [40,24]	23,84 [20,65]
	d	0,96 [0,94]	0,90 [0,92]	0,98 [0,97]	0,93 [0,95]
DIURNO (P. ÚMIDO)	ME	34,01 [35,33]	31,57 [32,48]	26,55 [26,57]	67,14 [30,56]
	RMSE	64,55 [67,28]	60,75 [61,32]	72,64 [73,06]	45,33 [41,35]
	d	0,92 [0,91]	0,94 [0,94]	0,94 [0,93]	0,89 [0,90]
ANUAL (P. SECO)	ME	-23,77 [-14,49]	-40,25 [-34,44]	1,48 [-12,02]	-3,04 [2,51]
	RMSE	31,98 [22,95]	43,05 [37,08]	8,39 [22,44]	21,69 [22,07]
	d	0,32 [0,53]	0,23 [0,26]	0,55 [0,24]	0,75 [0,75]
ANUAL (P. ÚMIDO)	ME	-40,00 [-41,37]	35,64 [35,72]	35,75 [35,22]	7,94 [3,71]
	RMSE	40,85 [41,95]	91,07 [36,91]	36,45 [35,87]	15,94 [19,71]
	d	0,12 [0,12]	0,06 [0,06]	0,13 [0,13]	0,91 [0,87]

6.3 Conclusão

Este estudo implementou um esquema de raízes finas dinâmico que descreve a biomassa de raízes finas em função da profundidade do solo e condições climáticas no modelo de superfície IBIS-CPTEC. A aplicação deste trabalho foi focada em quatro regiões com tipos funcionais de plantas e características climáticas diferentes, para um melhor ajuste de como as raízes finas se distribuem para a absorção de água no solo.

A nova parametrização possuem distribuições de raízes finas específicas para cada tipo de vegetação e fração máxima de raízes finas em camadas mais profundas do

solo, conseqüentemente, consegue absorver água dessas camadas e gerar resultados mais realista em relação a uma parametrização estática. Conclui-se que a nova parametrização apresenta perfis mais realistas devido à comparação das simulações dos fluxos de superfície simulados e dados observados, em que o H e LE seguem o mesmo padrão de comportamento dos dados observados.

Quando consideradas as respostas dos biomas à seca sazonal, nos dois experimentos há uma tendência de reduzir os erros, entretanto, o H e LE foram melhor simulados quando a nova parametrização de distribuição vertical de raízes foi implementada no modelo. Houve uma maior absorção de umidade do solo em camadas mais profundas, reduzindo o estresse hídrico do solo. Apesar das melhorias, alguns erros permaneceram, apontando que uma parametrização dinâmica de raízes finas não é o único parâmetro que necessita de ajustes.

Durante a estação chuvosa, a simulação dos ciclos diurnos com ambas parametrizações são semelhantes, indicando que a diferença entre as parametrizações não têm impacto considerável quando não há estresse hídrico. No entanto, durante a estação seca, as simulações dos ciclos diurno dos fluxos de superfície, a parametrização M21 conseguiu superar as superestimativas dos H e subestimativas dos LE, nos sítios BR-SA1, BR-SA3 e BR-NPW. Evidenciando que uma distribuição dinâmica de raízes não é o único mecanismo que precisa ser ajustado no modelo de superfície e inclusive que as incertezas dos dados observados podem dificultar o ajuste e análise da nova parametrização.

As simulações do RN e albedo da superfície foram similares nas duas parametrizações. Apesar da parametrização M21 representar melhor o perfil raízes finas, os ciclos do RN e o albedo médio de superfície não são parâmetros sensíveis à distribuição de raízes finas nas camadas de solo. Entretanto, entre as estações seca e chuvosa houve diferenças nos valores de albedo e RN mostrando sensibilidade a mudanças sazonais da umidade do solo e fração de cobertura vegetal.

Analisando os índices estatísticos dos experimentos, com a nova parametrização os fluxos de superfícies foram melhor representados, havendo redução do RMSE e ME, e aumento do índice de concordância (d). Em destaque, o sítio BR-NPW apresentou os melhores resultados durante a estação seca. Quando não ocorre uma diminuição do RMSE e ME, não há diferenças significativas dos erros entre os experimentos J97 e M21.

Este novo esquema de raízes finas, por ser um método indireto, tem a facilidade de

implementação e calibração em outros modelos de superfície. Como esses modelos de superfície são utilizados para simulações do saldo de radiação, seus componentes e umidade do solo, é essencial que consigam modular com precisão a dinâmica de raízes finas de diferentes biomas, então, sugere-se usar dados observados de distribuição de raízes finas para melhorias futuras das parametrizações da dinâmica de raízes finas.

7 EFEITO DA NOVA PARAMETRIZAÇÃO DE RAÍZES FINAS NOS PADRÕES ATMOSFÉRICOS DA AMÉRICA DO SUL

O objetivo do capítulo anterior foi avaliar a sensibilidade da nova parametrização de raízes finas na modelagem de fluxos de superfície. Neste capítulo, o novo esquema de raízes finas é integrado na estrutura de modelagem do modelo BAM-3D. Primeiramente, é descrita toda a metodologia utilizada para chegar em tais resultados. Na sequência, apresentam-se os resultados relativos ao desempenho dos modelos BAM com a atual parametrização (BAM-3D-J97) e com a nova parametrização de raízes finas (BAM-3D-M21) nas simulações dos padrões atmosféricos e umidade do solo da América do Sul. Durante o período de 1997 a 2017 foi feita a comparação entre campos médios sazonais simulados e dados de reanálises (ERA5, GPCP e GLDAS). As discussões desses resultados são realizadas visando analisar a habilidade do modelo BAM-3D-M21 em simular os principais padrões atmosféricos sobre a América do Sul.

Em seguida, são apresentadas os resultados relativos ao efeito da nova parametrização durante o verão da América do Sul em anos de eventos de El Niño e La Niña; na última parte apresenta-se os resultados do impacto da inicialização da umidade do solo (40%, 60%, 80% e 100%) com o modelo BAM-3D-M21 nas simulações da precipitação e temperatura (2 metros).

7.1 Metodologia

7.1.1 Descrição do Modelo Atmosférico Global Brasileiro (BAM)

O Modelo Atmosférico Global Brasileiro (BAM) tem sido desenvolvido no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) sendo descrito e amplamente avaliado nos últimos anos por Figuerola et al. (2016), Cavalcanti e Raia (2017), Souza et al. (2019), Cavalcanti et al. (2020), Guimarães et al. (2020), Baker et al. (2021), Lima (2021), Coelho et al. (2022).

O núcleo dinâmico do modelo engloba um esquema semi-lagrangiano de dois *times steps* monotônico, executado na grade do modelo para o transporte tridimensional de umidade, variáveis prognósticas da microfísica e traçadores. O núcleo dinâmico e os processos físicos têm sido aprimorado com o tempo, a exemplo de (FIGUEROA et al., 1995) que acoplaram o BAM a um modelo oceânico para realizar previsão climática sazonal e estudo climáticos. Figuerola et al. (2016) analisaram o desempenho

do modelo atmosférico BAM para prever chuva tropical e a sensibilidade à resposta dos esquemas de convecção e, às resoluções horizontais e verticais.

De modo a facilitar os tratamentos espectral e a implantação do método semi-implícito de integração no tempo, as equações do modelo e do movimento horizontal são transformadas nas equações da vorticidade e da divergência. As principais equações que simulam os movimentos atmosféricos são as equações da continuidade de massa para o ar seco e vapor d'água, a primeira lei da termodinâmica e as equações do movimento (denominada Segunda Lei de Newton). A resolução atualmente usada operacionalmente no INPE é TQ666L64, ou seja, truncamento triangular na onda zonal de número 666 e 64 camadas na vertical, cerca de 20 km de resolução espacial. O modelo possui o sistema de coordenada híbrida. Como o espaçamento vertical é irregular, desta forma é necessária uma resolução maior próximo à superfície, devido aos processos de camada limite e as trocas de fluxos de energia entre superfície e atmosfera. Além disso, é necessária uma resolução maior na região de interface entre troposfera e estratosfera devido às variações verticais rápidas, principalmente de temperatura (FIGUEROA et al., 1995; NOBRE et al., 2009; NOBRE et al., 2013).

A superfície terrestre desempenha de uma variedade de diferentes plantas, solos e formações geográficas, as quais trocam massa, momentum e calor com a atmosfera em diferentes intensidades. O BAM inclui três opções de modelos de superfície: SiB2.5 (SELLERS et al., 1986; SELLERS et al., 1996b; SELLERS et al., 1996a), SSiB (XUE et al., 1991) e IBIS-2.6 (KUBOTA, 2012).

A parametrização da camada limite é através de um esquema fechado de ordem 2 para a difusão vertical. Os coeficientes de mistura são calculados considerando um balanço local entre a produção e dissipação de energia cinética turbulenta. E considera-se um arrasto topográfico pelas ondas de gravidade como um mecanismo de amortecimento nas equações do movimento. E por fim, os coeficientes de amortecimento são obtidos considerando a variância da silhueta orográfica do modelo (MCFARLANE, 1987). O modelo BAM contém três opções desta parametrização: MELLOR YAMADA 2.0 (MELLOR; YAMADA, 1982), parametrização da Universidade de Washington (BRETHERTON; PARK, 2009) e Hostlag-Boville-modificado (KUBOTA, 2012).

As parametrizações de aquecimento devido à radiação de ondas curtas e de ondas longas são consideravelmente afetadas pela cobertura de nuvens. Atualmente, é utilizado um esquema que prevê nuvens em três camadas, além de nuvens convectivas profundas. O método para determinar a quantidade de nuvens em uma dada coluna

inclui a umidade relativa e a velocidade vertical para nuvens baixas, médias e altas. A quantidade de nuvens convectivas baseia-se na razão de precipitação convectiva prevista na parametrização de convecção profunda (KUO, 1965).

7.1.2 Implementação realizada no modelo BAM

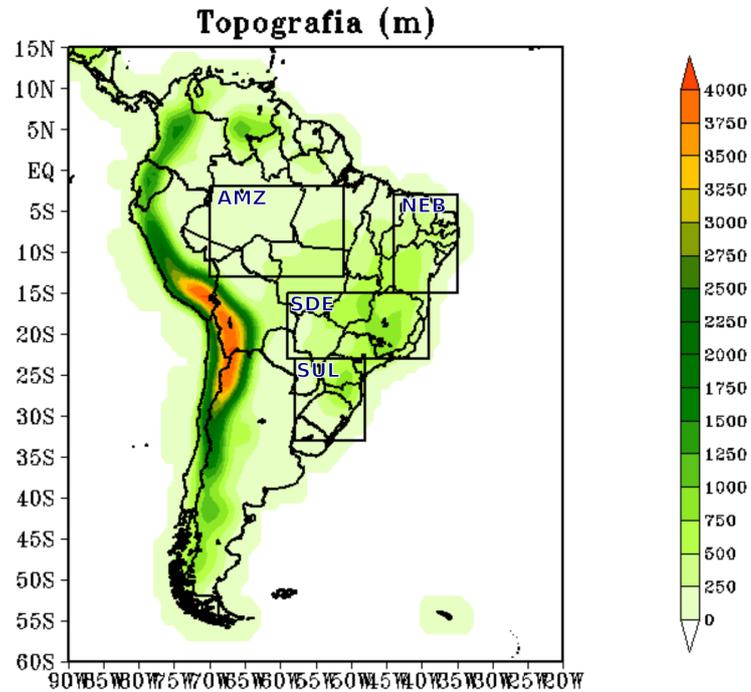
A nova parametrização da distribuição de raízes finas foi incorporada à estrutura de modelagem BAM, ou seja, o que foi implementado anteriormente no modelo de superfície IBIS *off-line* (descrito na Seção 6) foi inserido também no modelo BAM-IBIS. Os efeitos de retroalimentação poderão ocorrer livremente enquanto a física dos modelos BAM-IBIS processam tais efeitos. Sendo importante, devido à interação que ocorre entre a superfície e a atmosfera.

7.1.3 Área de estudo

A América do Sul (AS) compreende uma grande área latitudinal, estendendo-se desde regiões equatoriais até latitudes médias entre 12°N e 55°S, por conseguinte, possui a ocorrência de diferentes sistemas meteorológicos, que colaboram para diferentes características climáticas. Os climas são predominantemente tropicais, com presença de climas temperados, semi áridos e áridos. Encontra-se vegetação nativa desde florestas tropicais até estepes e desertos Reboita et al. (2012).

A Figura 7.1 exibe o relevo topográfico da América do Sul e as áreas dos subdomínios selecionados para avaliar a sensibilidade do modelo BAM-3D-M21 às simulações de processos de superfície e atmosférico durante o verão da AS. A Tabela 7.1 apresenta as latitudes e longitudes dos subdomínios analisados. Essas áreas já foram estudadas anteriormente por outros pesquisadores (DIAS, 2017; REBOITA et al., 2018; FREITAS et al., 2020).

Figura 7.1 - Topografia (m) da América do Sul utilizado pelo modelo BAM-3D. Em destaque os subdomínios utilizados neste estudo.



FONTE: Elaboração da autora.

Tabela 7.1 - Localização dos subdomínios seleccionados sobre o continente da América do Sul (AS).

SIGLAS	REGIÕES	LATITUDES	LONGITUDES
AMZ	Amazônia e Centro-oeste	2°S-13°S	51°W-70°W
NEB	Nordeste	3°S-15°S	35°W-44°W
SDE	Sudeste	15°S-23°S	49°W-59°W
SUL	Sul	23°S-33°S	48°W-58°W

7.1.4 Descrição dos experimentos

Para comparar as simulações do modelo BAM com a nova parametrização de raízes finas (BAM-3D-M21) e a atual parametrização proposta por Jackson et al. (1997) (BAM-3D-J97), um conjunto de simulações foram executadas a partir das 1200 UTC

de 1 de setembro de 1997 até 30 de setembro de 2017 (período de integração de 20 anos). A área de integração do modelo foi compreendida o globo inteiro, no entanto, para este estudo foi analisado apenas a América do Sul entre as latitudes 60°S-15°N e longitude de 20°W-90°W.

Foram realizadas 16 simulações (Figura 7.2) para verificar se existe alguma contribuição significativa durante o verão da América do Sul que possa ser atribuída a nova parametrização de raízes finas. As simulações têm período de integração de 4 meses, iniciando em 1200 UTC de 1 novembro de 2014 até 1200UTC de 31 de março de 2015, para o evento de El Niño (CASO 1) e 1200 UTC de 1 novembro de 2011 até 1200UTC de 31 de março de 2012, para o evento de La Niña (CASO 2). Para cada caso foram utilizados os modelos BAM-3D-J97 e BAM-3D-M21, variando a inicialização da umidade do solo (40%, 60% 80% e 100%).

Todos os experimentos com o modelo BAM, foram integrados com uma resolução espectral de TQ0126L42 e resolução espacial de cerca de 100 km. Os dados de TSM da NOAA (descritos no Item 3.8) foram utilizados como condições de contorno sobre os oceanos e as reanálises do ERA5 (Seção 3.7) como condição inicial (pressão de superfície, geopotencial de superfície, temperatura, umidade e componentes do vento (u e v). Foi utilizada a configuração do modelo BAM semelhante à configuração descrita por Souza et al. (2019), Guimarães et al. (2020) e Coelho et al. (2021). Listadas na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Configuração do modelo BAM utilizada para realizações das simulações.

CONFIGURAÇÃO	PARAMETRIZAÇÃO	REFERÊNCIA
Convecção profunda	Grell e Dévényi	Grell e Dévényi (2002)
Radiação onda curta	CLIRAD-SW	Chou e Suarez (1999)
Radiação onda longa	CLIRAD-LW	Iacono et al. (2008)
Microfísica de nuvens	Morrison	Morrison et al. (2005, 2005)
Modelo de superfície	IBIS-CPTEC	Kubota (2012)
Camada limite	Arakawa-Shubert	Han e Pan (2011)

Figura 7.2 - Diagrama das simulações realizada para o verão em eventos de El Niño e La Niña na América do Sul.

CASOS	MODELOS	INICIALIZAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO
1. EL NIÑO	BAM-3D-J97	40%
2. LA NIÑA	BAM-3D-M21	60%
		80%
		100%

FONTE: Elaboração da autora.

7.1.5 Validação das simulações

Foram calculados os campos médios sazonais (DJF, MAM, JJA, SON) da precipitação (PREC), temperatura a 2 metros da superfície (T2MT), escoamento do vento em 850 hPa (V850) e 200 hPa (V200), e umidade do solo (US), em seguida foram comparados com os dados de reanálises (Tabela 7.3), período de 1997 – 2007. Esta primeira avaliação teve a finalidade de examinar a destreza dos modelos BAM-3D-J97 e BAM-3D-M21 em representar os principais padrões sazonais da América do Sul. Em seguida, para as simulações com modelos BAM-3D-J97 e BAM-3D-M21 foram realizadas comparações com dados de reanálise e conjunto de dados de estimativas de precipitação. Para cada conjunto “previsão e observação”, foram realizadas as seguintes comparações dos valores previstos com os respectivos valores observados:

- a) BIAS indica a existência e magnitude de viés de uma amostra em relação a outra (WILKS, 2011). Em outras palavras, foi utilizado para estimar se o modelo de previsão superestimou ou subestimou a demanda (Equação 7.1).

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (X_{sim,i} - X_{obs,i}) \quad (7.1)$$

- b) Erro Quadrático Médio (RMSE) que representa o desvio padrão dos resíduos, ou seja, erros de previsão. O RMSE é uma medida de quão espalhados são esses resíduos (WILKS, 2011). Isto é, informa o quão concentrados os dados estão em torno da linha de melhor ajuste (Equação 7.2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{obs,i})^2}{N}} \quad (7.2)$$

X_{sim} são referentes às simulações com os modelos BAM, X_{obs} são os dados observados e N representa o tamanho da amostra.

Tabela 7.3 - Sumário das variáveis simuladas e dados observados usados para comparações das simulações.

X_{sim}	UNIDADE	NÍVEL (hPa)	X_{obs}
PREC	mmdia ⁻¹		GPCP (Seção 3.6)
T2MT	°C		ERA5 (Seção 3.7)
V850 e V200	ms ⁻²	850	ERA5 (Seção 3.7)
		200	
US			GLDAS (Seção 3.5)

7.1.6 Teste estatístico: t-Student

A finalidade deste estudo não é unicamente avaliar o desempenho do modelo BAM com a nova parametrização de raízes finas, mas também analisar a resposta da nova distribuição de raízes finas nos processos atmosféricos e de superfície. Os experimentos foram realizados sob condições de eventos de El Niño e La Niña, durante o verão da América do Sul. Através desses experimentos, os mecanismos das interações entre o novo perfil de raízes finas e a superfície-atmosfera podem ser entendidos. Por meio do teste *t-Student* (SPIEGEL; STEPHENS, 2000) foi avaliado a significância estatística

entre as diferenças das simulações com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97.

O Teste *t-Studentt* é uma técnica de testar hipóteses sobre a média de uma pequena amostra extraída de uma população normalmente distribuída quando o desvio padrão da população é desconhecido. Além disso, é utilizado para comparar as médias entre dois grupos e não há necessidade de múltiplas comparações. A hipótese nula afirma que ambas as médias são estatisticamente iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma que ambas as médias não são estatisticamente iguais. Para determinar se havia diferença significativa entre as simulações com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97, foi alterada a inicialização da umidade do solo em 40%, 60%, 80% e 100%, com isso obteve o *ensemble*. Para pequenas amostras, são utilizadas as seguintes equações 7.3, 7.4, 7.5:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N - 1}} \quad (7.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{N_1 s_1^2 + N_2 s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (7.4)$$

$$t = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}} \quad (7.5)$$

Em que, μ_1 e μ_2 são as médias referentes às simulações dos modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97, respectivamente; X_i é a realização em cada amostra; N_1 e N_2 são os tamanhos das amostras, que representa o *ensemble* ($N_1=N_2=4$). O nível de confiança de 90% foi considerado o delimitador de significância, com 8 graus de liberdade ($gl=N_1+N_2-2$), correspondentes a 1,94 conforme a Tabela de distribuição t para testes bilaterais.

7.2 Resultados

7.2.1 Avaliação do impacto da nova parametrização de raízes finas em simulações climáticas e sazonais

7.2.1.1 Precipitação (PREC)

Os resultados da implementação da nova parametrização de raízes finas podem ser verificadas na Figura 7.3, onde cada linha corresponde aos campos médios do GPCP (primeira linha) e da simulação com modelo BAM-3D utilizando a parametrização de Jackson et al. (1997) (segunda linha), BIAS (terceira linha) e RMSE (quarta linha) para o período de 1997 – 2017. De modo geral, o ciclo sazonal da precipitação é bem simulado pelo modelo quando comparado aos dados de precipitação do GPCP, onde pode-se verificar as estações úmidas e secas bem definidas em diversas regiões. Grande parte da América do Sul apresenta seu período seco entre os meses de JJA e seu período úmido de setembro – maio, com máximos em DJF. Durante DJF, as regiões com grande atividade convectiva são observadas ao norte do Brasil devido à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e na direção noroeste-sudeste do Brasil associada à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). No leste do nordeste brasileiro (NEB) e o sul da Argentina, a precipitação é fraca nesta época do ano.

Comparando a simulação do modelo com a observação (GPCP), o modelo BAM-3D-J97 simula adequadamente a distribuição espacial sazonal da precipitação. Entretanto, algumas diferenças são verificadas entre a simulação do modelo e as observações. Os maiores valores de BIAS (Figura 7.3, terceira linha) são observados sobre a Cordilheira dos Andes, no sudeste brasileiro (DJF e SON) e Colômbia (JJA e SON), onde os totais de precipitações foram mais intensos, indicando uma superestimativa do modelo. Esta superestimativa é associada a topografia que gera excesso de convergência em baixos níveis que força a ocorrência de precipitação (SILVA; FREITAS, 2015). Em contrapartida, nas demais localizações, a simulação com o modelo BAM-3D-J97 apresentou menores magnitudes no BIAS.

A simulação com o BAM-3D-J97 subestimou a precipitação observada sobre o norte da América do Sul, no trimestre MAM. Esta subestimativa também foi encontrada por Freitas et al. (2020), onde o modelo RegCM4.7 subestimou a precipitação observada no extremo norte da América do Sul, nos meses que precedem o período seco (JJA). Além disso, essa subestimativa da precipitação pode estar relacionada a resoluções espaciais específicas de modelos globais ($> 1^\circ$), que apontam problemas em simular processos convectivos (RICHTER; XIE, 2008).

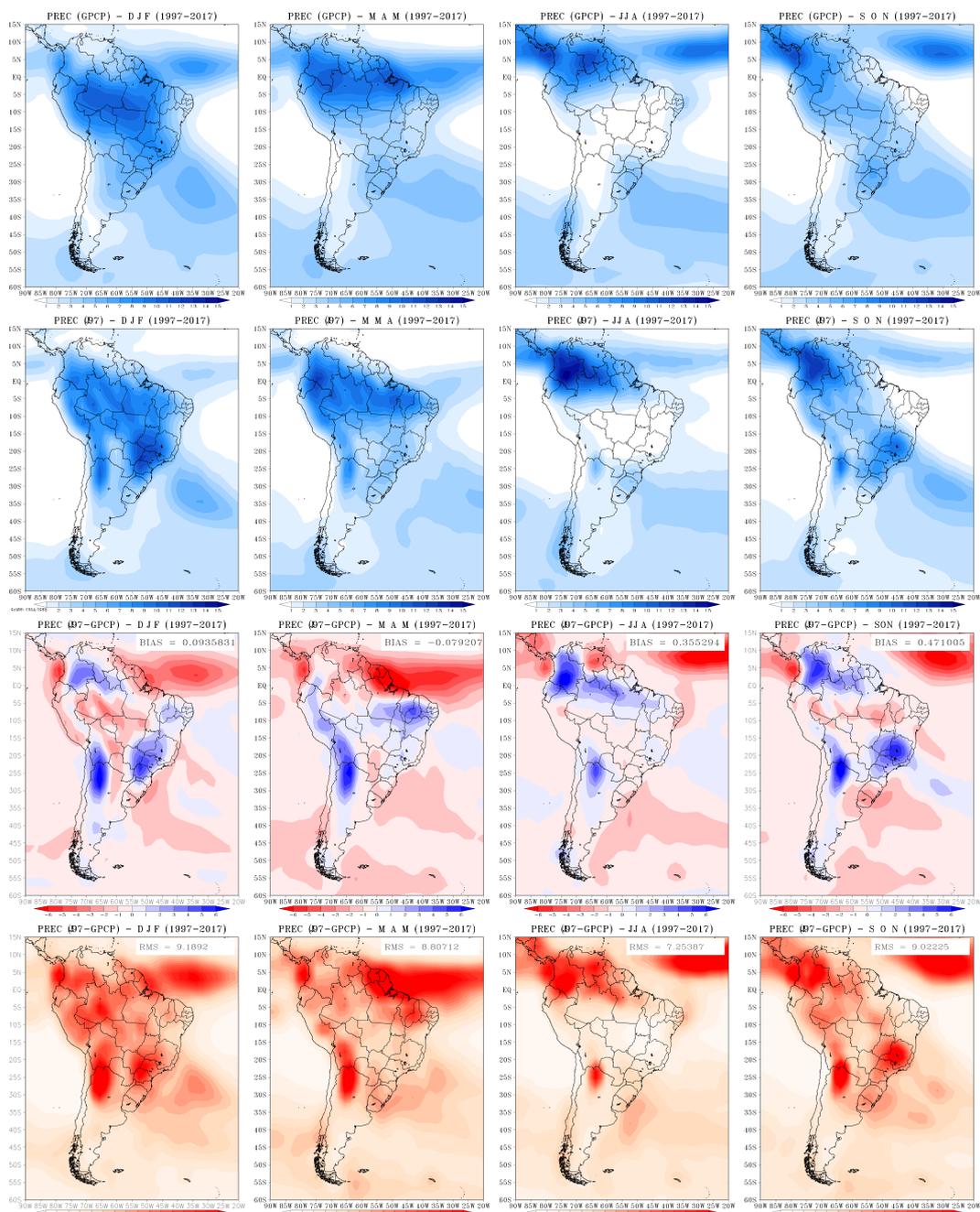
A variação sazonal do RMSE para precipitação (Figura 7.3, quarta linha) apresentou resultados coerentes com a observação. Nos trimestres de MAM e JJA, a distribuição espacial apresenta menores valores de RMSE, sugerindo que o modelo foi mais eficiente nestes períodos. Observa-se que em DJF apresentou maiores valores de RMSE no sentido noroeste-sudeste da América do Sul, trimestre de máxima atividade convectiva na região.

O padrão geral da precipitação simulada com o BAM-3D-M21 (Apêndice A.1) acompanha a distribuição espacial do GPCP e BAM-3D-J97. A Figura 7.4 apresenta o BIAS da precipitação média sazonal simulada pelo modelo BAM com a nova parametrização de raízes finas (BAM-3D-M21). Em geral, na região central do Brasil houve um aumento da subestimativa da precipitação do modelo BAM-3D-M21 no período chuvoso (setembro a março), quando comparada à precipitação simulada com o BAM-3D-J97. Esta subestimativa de precipitação durante o período chuvoso está relacionada à profundidade das raízes finas. A parametrização de raízes finas utilizadas no modelo BAM-3D-M21 coloca a máxima concentração de raízes finas em uma profundidade maior em relação ao modelo BAM-3D-J97. Esta característica da parametrização de raízes finas é sensível à concentração de umidade no solo. Neste caso, durante o período chuvoso as camadas mais superficiais estão mais úmidas em relação às camadas mais profundas, portanto a parametrização do modelo BAM-3D-M21 tem mais dificuldade de retirar umidade do solo e realizar a transpiração.

No noroeste da América do Sul para os trimestres DJF, JJA e SON, as simulações tendem a superestimar a precipitação. No entanto, a simulação com BAM-3D-M21 tem um viés positivo menor do que a simulação com BAM-3D-J97. A superestimativa pode estar relacionada à imediação com a topografia, que favorece a intensificação do movimento ascendente e convecção (LLOPART *et al.*, 2017). Onde ocorre a redução da superestimativa da precipitação com o modelo BAM-3D-M21, indica que a concentração máxima de raízes finas em camadas mais profundas melhora a estimativa de precipitação do modelo. Neste resultado verifica-se a redução do erro sistemático do modelo nas regiões com topografia elevada.

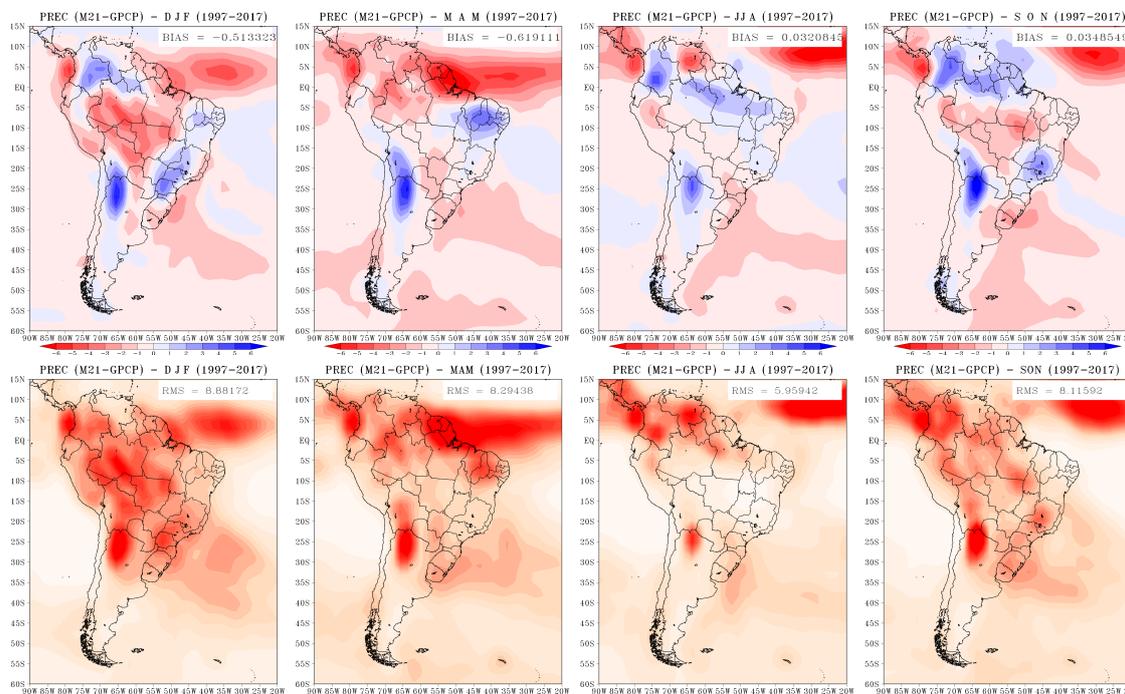
Além disso, quando se utiliza a nova parametrização de raízes finas, o modelo continua superestimando a precipitação na Cordilheira dos Andes, no sudeste brasileiro (DJF e SON) e Colômbia (JJA e SON). Porém, ocorre uma redução do valor de BIAS que pode estar relacionado à capacidade da nova parametrização em representar a máxima fração de raízes finas em camadas mais profundas do solo.

Figura 7.3 - Precipitação média sazonal (mmdia^{-1}) simulada com o modelo BAM-3D-J87 para o período de 1997 – 2017. A primeira e segunda linha representam os campos médios do conjunto de dados do GPCP e da simulação com do modelo BAM-3D-J97, respectivamente. A terceira linha exibe bias da precipitação (J97-GPCP). A última linha corresponde ao RMSE (J97-GPCP).



FONTE: Elaboração da autora.

Figura 7.4 - Valor de BIAS e RMSE da precipitação média sazonal (mmdia^{-1}) simulada com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam, respectivamente, BIAS e RMSE (M21-ERA5), em mmdia^{-1} .



FONTE: Elaboração da autora.

A subestimativa da precipitação sobre a Bacia do Prata (sul do Brasil, Uruguai e nordeste da Argentina) também é encontrada em outros estudos (SOLMAN et al., 2013; REBOITA et al., 2014; LLOPART et al., 2017). Solman et al. (2013) relaciona esta subestimativa com alguns fatores do modelo de superfície. Reboita et al. (2014) associa com a parametrização convectiva do modelo. Entretanto, nesta região da Bacia do Prata, a habilidade do modelo em simular a frequência e a intensidade dos sistemas frontais também deve ser considerado, pois, tanto os processos de superfície quanto a atividade convectiva dependem dos sistemas frontais.

Para MAM (Figura 7.4, primeira linha), observa-se que a simulação com o modelo BAM-3D-M21 apesar de superestimar a precipitação na região do nordeste brasileiro, ainda assim, apresenta melhor desempenho na simulação da precipitação em comparação com a parametrização BAM-3D-J97 (Figura 7.3, terceira linha). Este resultado também pode ser verificado nos campos médios do RMSE (Figura 7.3 quarta linha e Figura 7.4, segunda linha), esta melhora nas simulações é devido à nova parametrização de raízes finas melhorar a distribuição de raízes finas no solo e a

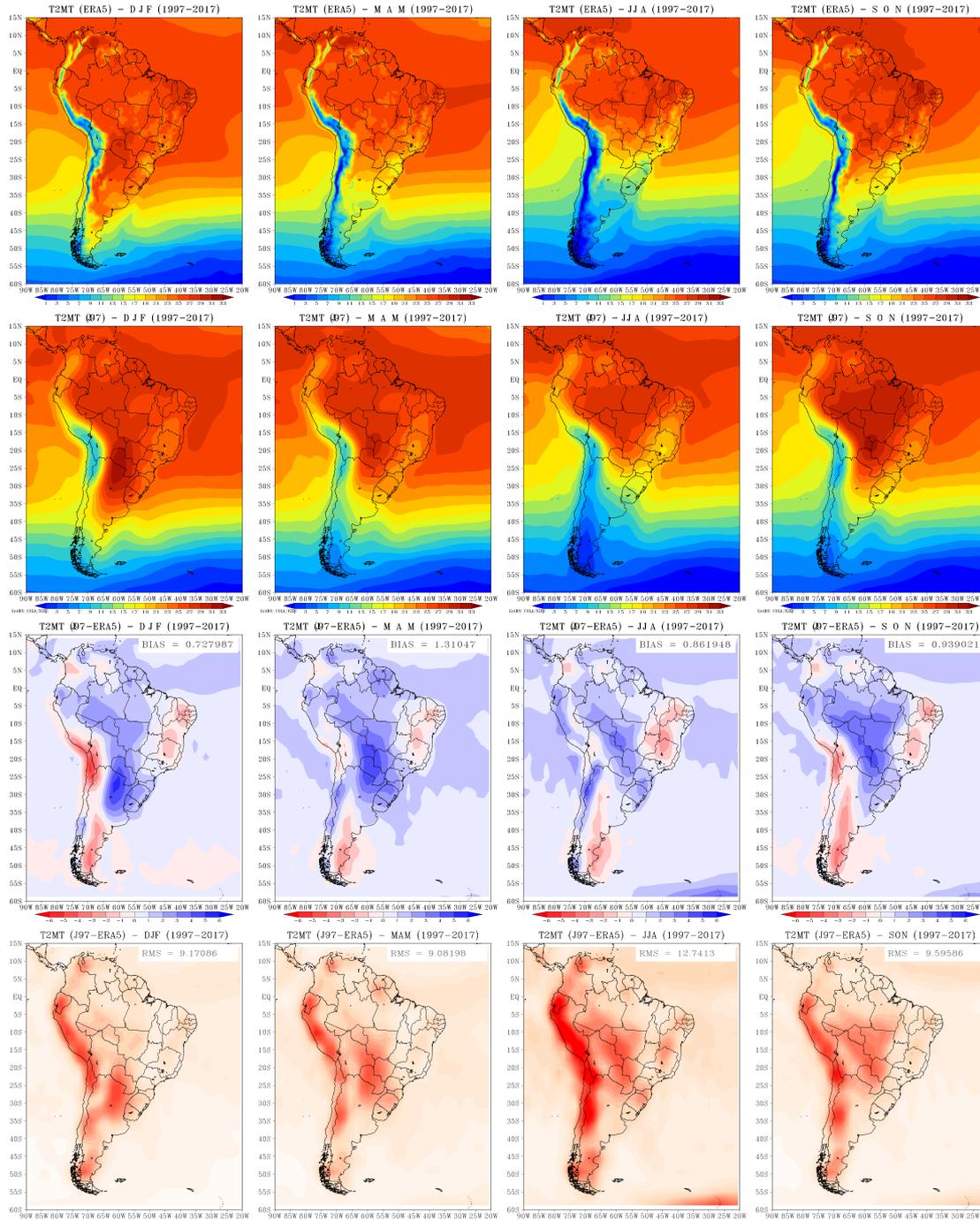
simulação do conteúdo de água armazenada nas camadas mais profundas do solo utilizada para transpiração das plantas. Visto que os modelos de superfície acoplados às modelos atmosféricos configuram os processos físicos que acontecem entre o sistema superfície-atmosfera (LAWSTON-PARKER et al., 2021). Esses esquemas desempenham a função de particionar a energia disponível entre fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor no solo (G). Sendo que LE é responsável por conduzir o vapor d'água para atmosfera, por conseguinte, induzir na formação de nuvem e precipitação (MOURA et al., 2020).

De modo geral, os menores valores médios de RMSE foram observados nas simulações com o BAM-3D-M21 (Figura 7.4, segunda linha). O trimestre de JJA apresentou o menor valor de RMSE de $5,959 \text{ mmdia}^{-1}$, indicando que a nova parametrização melhorou a simulação da precipitação no inverno da América do Sul. Através das análises estatísticas do campo de precipitação simulada pelas duas parametrizações conclui-se que a nova parametrização de raízes reduz o erro sistemático do modelo BAM para o campo de precipitação.

7.2.1.2 Temperatura do ar a 2 metros da superfície (T2MT)

A Figura 7.5 mostra a média sazonal da temperatura do ar a 2 metros da superfície (T2MT) obtida com dados de reanálise ERA5 (primeira linha), modelo BAM-3D-J97 (segunda linha), BIAS (terceira linha) e RMSE (quarta linha). As simulações do ciclo sazonal da T2MT do modelo apresentam boa concordância com os dados do ERA5, conforme alguns padrões de temperatura conhecidos e estabelecidos na América do Sul. Em geral, em baixas latitudes e na faixa equatorial encontram-se temperaturas mais altas e em latitudes mais altas temperaturas mais frias. A temperatura do ar a 2 metros é diretamente proporcional ao balanço de radiação. Da mesma forma, os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) também afetam a variabilidade da temperatura do ar a 2 metros. Desse modo, diversas condições físicas da superfície controlam a distribuição de temperatura sobre a superfície da Terra, por exemplo: nebulosidade, a quantidade de energia solar recebida (NEVES et al., 2021), as características da superfície (XU; CUI, 2021), a natureza dos ventos predominantes (OGAWA; SPENGLER, 2019), as correntes oceânicas (WU et al., 2019), etc.

Figura 7.5 - Temperatura a 2 metros da superfície média sazonal (°C) simulada com o modelo BAM-3D-J87 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam os campos médios do conjunto de dados do ERA5 e da simulação com do modelo BAM-3D-J87, respectivamente. A terceira linha exibe bias da precipitação (J97-ERA5). A última linha corresponde ao RMSE (J97-ERA5).



FONTE: Elaboração da autora.

Na Figura 7.5 (terceira linha) em grande parte do continente da América do Sul apresenta o BIAS positivo relacionado com a superestimativa da T2MT do modelo BAM-3D-J97. Esta superestimativa é associada ao fluxo de calor sensível que aquece as camadas atmosféricas próximas à superfície. Portanto, regiões que apresentam BIAS seco tendem a apresentar BIAS maiores na temperatura a 2 metros da superfície. Comparando com as análises estatísticas do campo de precipitação, as regiões onde apresentaram subestimativa de precipitação são regiões onde apresentam maiores BIAS e RMSEs no campo de T2MT. Há possibilidade do resultado da subestimativa da T2MT também estar associado a superestimativa da precipitação, que pode ocasionar também uma superestimativa da umidade do solo e da nebulosidade, impactando a radiação solar incidente (CHOU *et al.*, 2020). A superestimativa na Bacia do Prata em DJF também foi encontrada por Chou *et al.* (2014a) e melhorada por Mourão (2015) que inseriu áreas inundáveis no modelo regional Eta, e concluiu que esta região é fortemente influenciada pela variação das áreas alagadas do pantanal brasileiro.

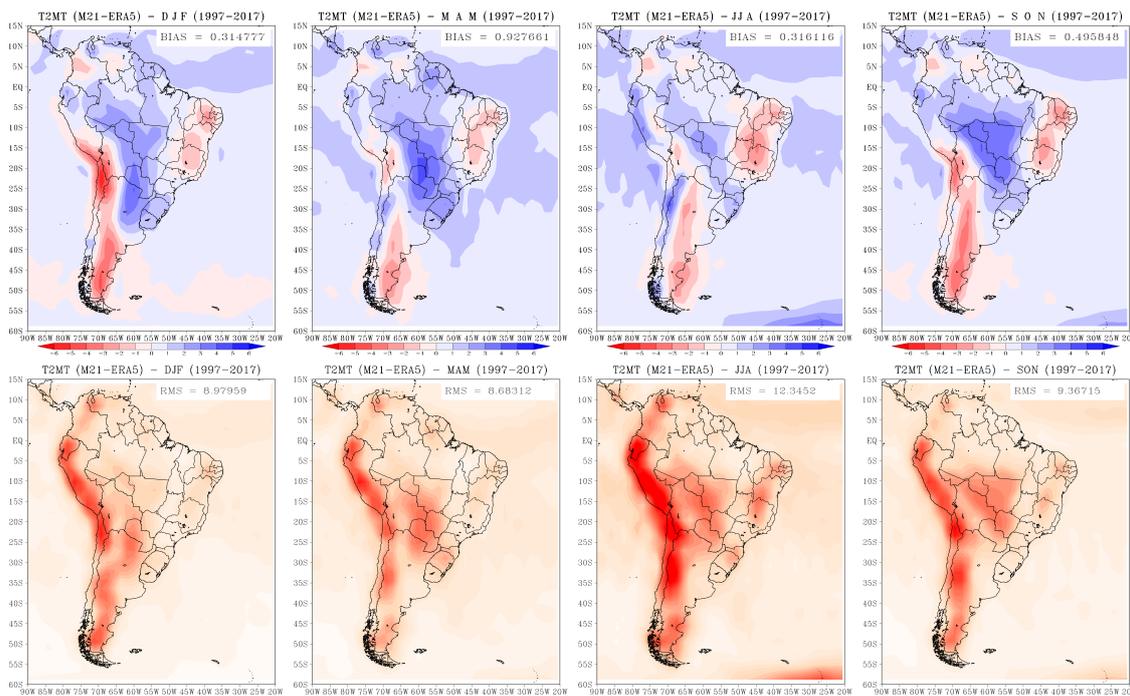
No entanto, valores de BIAS negativos (Figura 7.5, terceira linha) são observados no NEB, na costa oeste (DJF e SON) e no extremo sul do continente. Este viés negativo na Cordilheira dos Andes foi observado em diferentes estudos (CHOU *et al.*, 2014a; MOURÃO, 2015), os autores indicam que a ausência de dados observados nesta região podem prejudicar a avaliação estatística do campo de temperatura (2 metros), simulada pelos modelos. A Cordilheira dos Andes e a região central do continente indicam valores de RMSE (Figura 7.5, quarta linha) mais elevados em todos os trimestres devido a subestimativa e superestimativa da T2MT nestas regiões.

A Figura 7.6 apresenta os BIAS da temperatura a 2 metros da superfície (T2MT) simulada pelo BAM-3D-M21 (primeira linha) e o RMSE associado a simulação (segunda linha). O campo médio da temperatura (Apêndice A.2) foi similar aos campos simulados pelo BAM-3D-J97 (Figura 7.5, segunda linha). Com a nova parametrização, o modelo BAM apresentou um bom desempenho na simulação da T2MT na Bacia do Prata, diminuindo a superestimativa em cerca de 3°C. Esta região se caracteriza por apresentar clima mais seco a maior parte do ano, e com baixo acumulado de precipitação (MOURÃO, 2015). Assim, a simulação com a nova parametrização de raízes finas (BAM-3D-M21) possibilita a extração de água de camadas mais profundas do solo melhorando a partição de energia entre o calor latente e sensível em relação à simulação com a parametrização BAM-3D-J97.

Na parte central do Brasil, o RMSE e o BIAS positivo simulados com o BAM-

3D-M21 (Figura 7.6) são menores que no BAM-3D-J97 (Figura 7.5). Ressalta-se que nas regiões que o modelo superestimou (subestimou) a precipitação houve uma subestimativa (superestimativa) da T2MT. É importante observar que, ao fazer a média para todo o continente, o BIAS apresentou menor média para a simulação com a nova parametrização em todos os trimestres. A magnitude da subestimação é maior na Cordilheira dos Andes nos trimestres DJF para ambas simulações. O RMSE da T2MT (°C) com base na simulação do modelo BAM-3D-M21, é mostrado na segunda linha da Figura 7.6. Os valores de RMSE indicam uma diminuição na parte central do continente, indicando melhoria na simulação. Os erros de maiores amplitudes pertencem às regiões da Cordilheira dos Andes e centro-oeste brasileiro.

Figura 7.6 - Valor de BIAS e RMSE da temperatura a 2 metros da superfície média sazonal (°C) simulada com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam, respectivamente, BIAS e RMSE (M21-ERA5).



FONTE: Elaboração da autora.

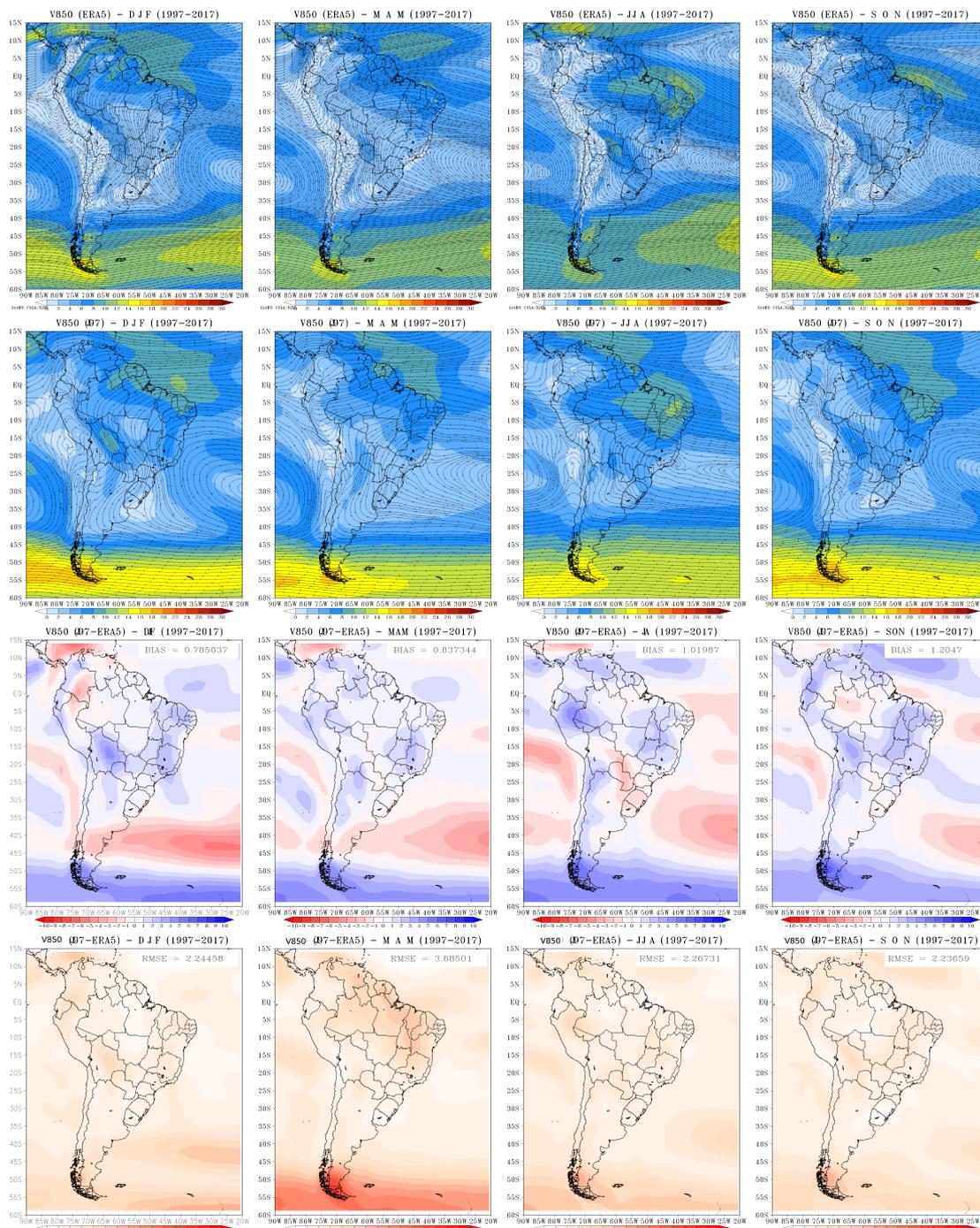
7.2.1.3 Escoamento do vento em 850 hPa (V850)

A Figura 7.7 (primeira e segunda linha) mostra os campos médios sazonais do escoamento do vento e linhas de correntes em 850 hPa, referentes aos dados observados

e simulados com BAM-3D-J97. Os campos médios simulados pelo modelo BAM-3D-M21 seguem o mesmo padrão do BAM-3D-J9 (Apêndice A.3). Em todo o período do ciclo sazonal observa-se que há um aumento do escoamento do vento de baixo nível para o sul e sudeste, indicando que pode haver um maior transporte de umidade das regiões tropicais para as extratropicais. Este resultado pode ajudar a justificar o aumento de precipitação nestas regiões (Figura 7.4). Além disso, a Alta do Pacífico Sul (APS) e a Alta do Atlântico Sul (AAS) foram bem representadas pelos modelos com relação às suas posições climatológicas. Entre 50° e 60° S, pode-se verificar que na simulação com o modelo BAM-3D-J97 há uma superestimativa da intensidade do escoamento em relação ao dado de reanálise do ERA5. Esta superestimativa deve ser considerada, pois atua como um bloqueio para a passagem dos sistemas frontais, inibindo a precipitação na região da Bacia do Prata.

Foram analisados os campos de BIAS e RMSE do escoamento do vento em 850 hPa analisando o uso da nova parametrização de raízes finas, com o modelo BAM-3D-J97 (Figura 7.7) e BAM-3D-M21 (Figura 7.8). A distribuição espacial do BIAS para DJF com o modelo BAM-3D-J97 (Figura 7.7) mostra uma tendência de superestimar o escoamento em 850 hPa sobre os Estados do Ceará a Minas Gerais, se estendendo por Mato Grosso do Sul até a Bolívia. A superestimativa sobre o Mato Grosso do Sul foi reduzida com o modelo BAM-3D-M21 (Figura 7.8). Os resultados da simulação do escoamento em 850 hPa com o modelo BAM-3D-M21 foram melhores devido ao ganho na simulação da T2MT (Figura 7.6). Este aquecimento mais acurado da superfície melhora a evolução da camada limite planetária impactando o escoamento na interface entre a camada limite e a atmosfera livre (YANG et al., 2017).

Figura 7.7 - Linhas de corrente e escoamento do vento em 850 hPa média sazonal (ms^{-1}) simulada com o modelo BAM-3D-J87 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam os campos médios do conjunto de dados do ERA5 e da simulação com do modelo BAM-3D-J87, respectivamente. A terceira linha exibe bias da precipitação (J97-ERA5). A última linha corresponde ao RMSE (J97-ERA5).



FONTE: Elaboração da autora.

Em MAM, observa-se que as simulações com modelos BAM-3D-J97 (Figura 7.7) e BAM-3D-M21 (Figura 7.8) apresentam superestimativas mais localizadas, tais como, parte do estado da Bahia, Minas Gerais e Goiás; Bacia do Prata; oeste da Amazônia, norte do Peru e Venezuela. Em JJA, estas superestimativas persistem com valores mais elevados e ocorreu uma subestimativa do sul do Brasil até o Paraguai em ambos os modelos, podendo estar associados a má representação dos modelos em simular a frequência e a intensidade dos sistemas frontais (CHAN *et al.*, 2013). Durante os meses de inverno, por ser uma época mais estável (período seco em grande parte do continente), não se observa diferenças significativas entre as simulações do escoamento do vento em 850 hPa. Durante SON, a simulação com BAM-3D-J97 se comporta da mesma forma que durante o verão (DJF), porém as áreas de abrangência das superestimativas foram maiores, além de superestimativa na região da ZCIT e no noroeste do continente. Também é verificada uma subestimativa no estado da Amazônia. A simulação com o modelo BAM-3D-M21 reduziu as áreas de abrangência das superestimativas apresentadas pelo modelo BAM-3D-J97 e, não houve subestimativa na Amazônia. Esses resultados podem ser considerados um ganho da simulação do escoamento em 850 hPa com o modelo BAM-3D-M21.

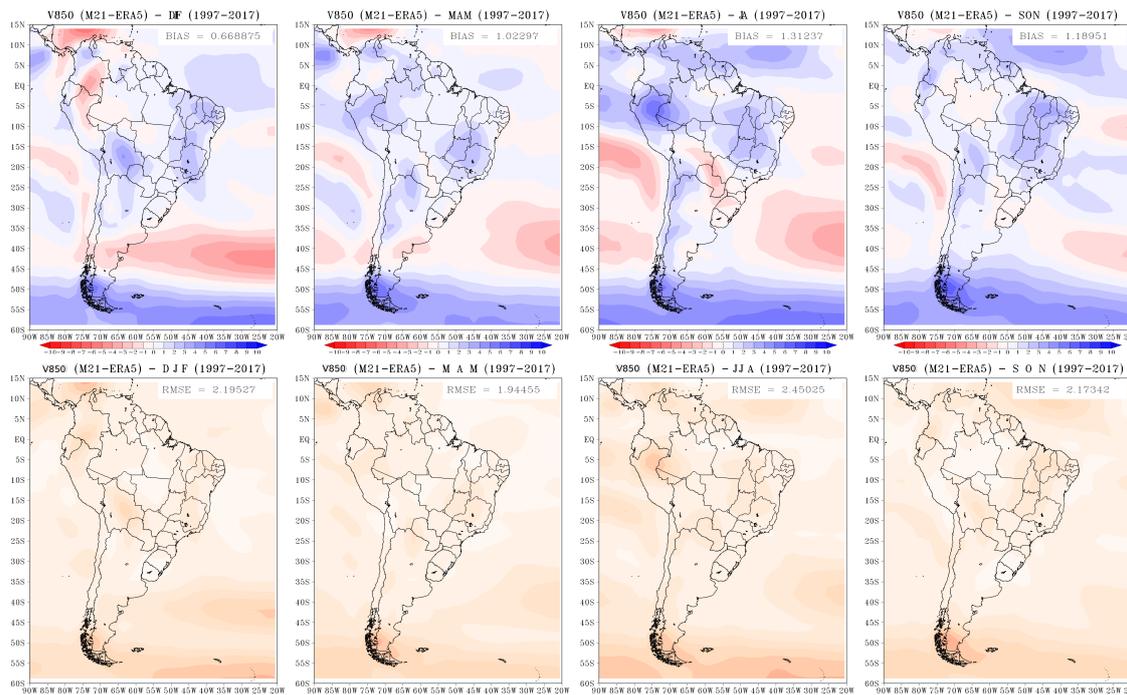
O RMSE do ciclo sazonal da simulação com o modelo BAM-3D-J97 e BAM-3D-M21 são mostrados nas Figuras 7.7 (quarta linha) e Figura 7.8 (segunda linha), respectivamente. Os RMSEs do escoamento em 850 hPa foram reduzidos quando inserida a nova parametrização de raízes finas (Figura 7.8, segunda linha), especialmente no trimestre março – abril – maio.

Analisando o RMSE para o escoamento em 850 hPa entre a simulação do modelo BAM-3D-J97 e BAM-3D-M21 verifica-se que o campo de RMSE para as latitudes de 50° a 60° S são menor na simulação com o modelo BAM-3D-M21. Este resultado é importante pois indica que os sistemas frontais terão uma menor influência da intensidade do escoamento zonal na sua propagação para latitudes mais baixas.

O ganho de desempenho do modelo BAM-3D-M21 para simular escoamento em 850 hPa pode estar relacionada a uma melhor estimativa dos processos que ocorrem na superfície, uma vez que, para modelos simularem corretamente as variáveis na escala de tempo e o clima, devem conseguir capturar a variabilidade dos fluxos de superfície (ZHOU *et al.*, 2020). Portanto, para obter um *feedback* sobre os mecanismos responsáveis pela diferença do escoamento em 850 hPa entre as simulações do modelo e a observação, é necessário avaliar separadamente o efeito da nova parametrização de raízes finas no fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (LE). Devido

aos fluxos de superfície permitir a troca de massa e energia entre o solo-vegetação-atmosfera e, conseqüentemente, influenciar a circulação atmosférica (VALDIVIESO et al., 2017).

Figura 7.8 - Valor de BIAS e RMSE do Escoamento do vento em 850 hPa média sazonal (ms^{-1}) simulado com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam, respectivamente, BIAS e RMSE (M21-ERA5).



FONTE: Elaboração da autora.

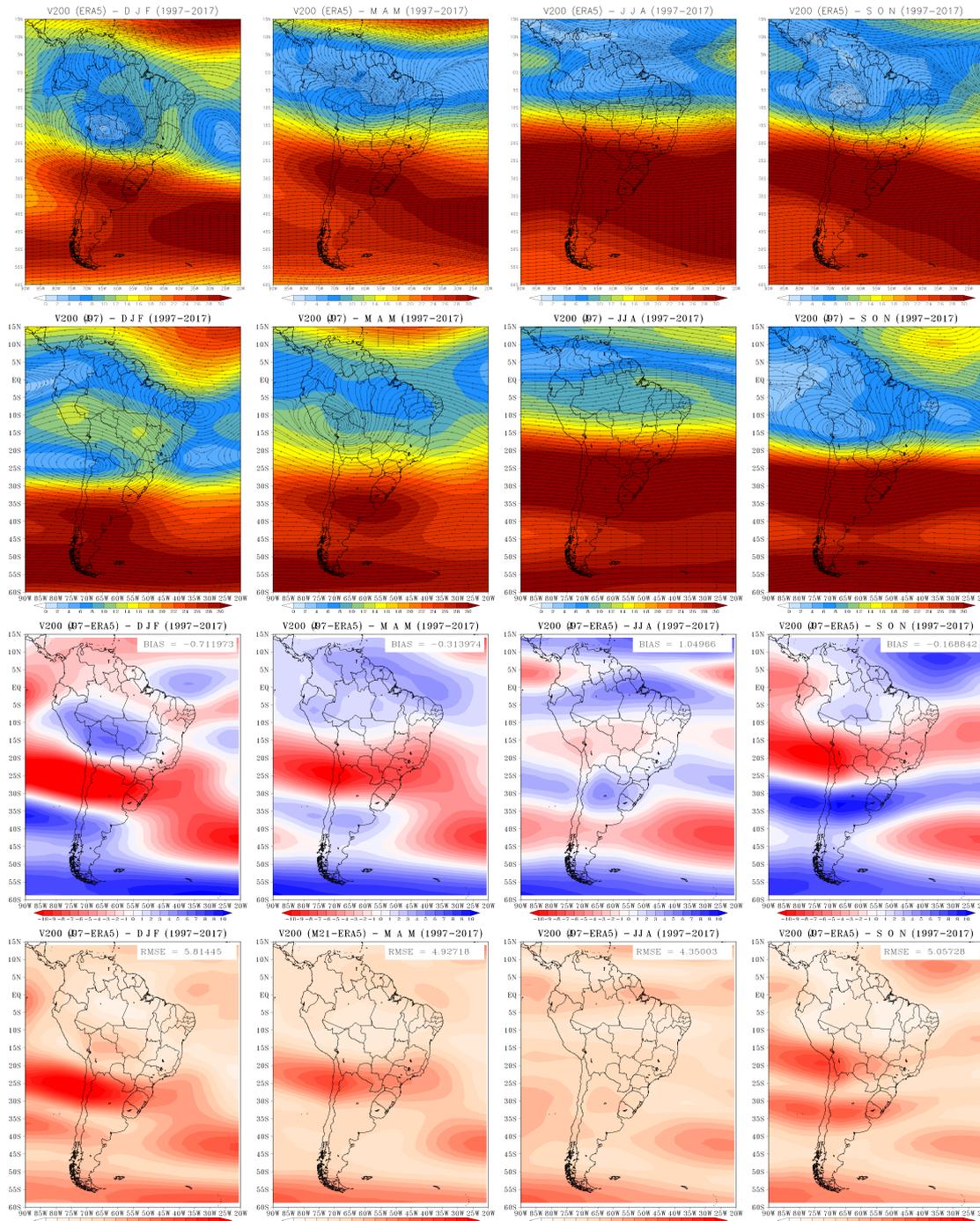
7.2.1.4 Escoamento do vento em 200 hPa (V200)

Durante o verão (DJF), o padrão de circulação dos ventos em 200 hPa sobre a região tropical é mais meridional em consequência ao aquecimento da superfície continental causando o aumento da convecção sobre a região da Amazônia (VALLIS et al., 2015) e formação da Alta da Bolívia (AB), um intenso anticiclone em 200hPa. Por conseguinte, a intensificação simultânea da crista associada a AB e do cavado a sua jusante, pode contribuir para um ambiente adequado para a formação dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) sobre o Nordeste brasileiro (REBOITA et al., 2017).

Diversas características do ciclo sazonal do escoamento em 200 hPa são bem simuladas, as maiores diferenças do escoamento do vento na região extratropical. Comparando os BIAS das simulações com o BAM-3D-J97 (Figura 7.9, segunda linha) e BAM-3D-M21 (Figura 7.10, primeira linha) com o observado, verifica-se uma superestimativa sobre a região central do continente no verão (DJF), nesta área a simulação com o modelo BAM-3D-J97 tem um BIAS positivo maior do que com o modelo BAM-3D-M21. Os modelos conseguem representar razoavelmente bem as principais características da circulação. Durante o verão, os modelos representam o cavado do Nordeste associado à Alta da Bolívia mais inclinado do que os dados do ERA5. Além disso, os modelos simularam a posição da AB mais ao sul da sua posição climatológica, isso explica a superestimativa do escoamento em 200 hPa sobre a Bolívia e centro-oeste do Brasil.

Ainda no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro para o extremo norte do continente, o campo médio do BIAS indica que o BAM-3D-M21 (Figura 7.10) simula valores do escoamento em 200 hPa similares à observação, enquanto no BAM-3D-J97 o subestima (Figura 7.9). No outono (MAM), a simulação com o modelo BAM-3D-M21 apresentou um viés positivo maior do que o BAM-3D-J97, indicando um aumento na superestimativa do escoamento em 200 hPa com a nova parametrização. No entanto, ressalta-se que o aumento foi de 1 ms^{-1} em relação ao BAM-3D-J97.

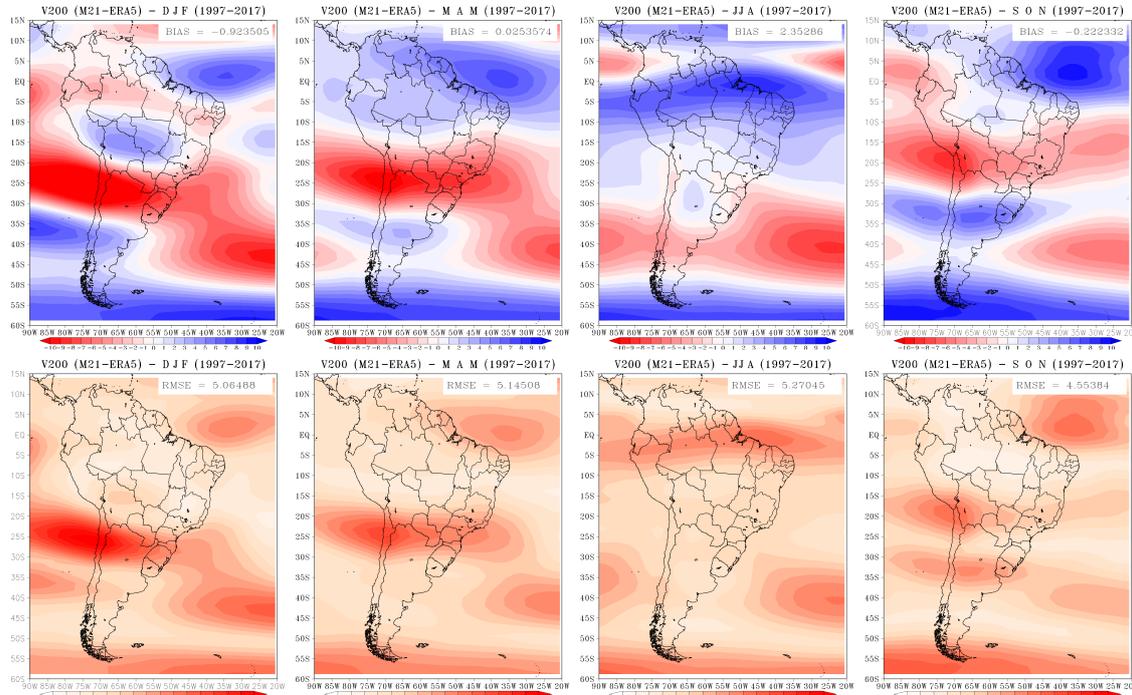
Figura 7.9 - Linhas de corrente e escoamento do vento em 200 hPa média sazonal (ms⁻¹) simulada com o modelo BAM-3D-J87 para o período de 1997 – 2017. A primeira e segunda linha representam os campos médios do conjunto de dados do ERA5 e da simulação com do modelo BAM-3D-J87, respectivamente. A terceira linha exibe bias da precipitação (J97-ERA5). A última linha corresponde ao RMSE (J97-ERA5).



FONTE: Elaboração da autora.

Em JJA sobre a Bacia do Prata, houve uma diminuição significativa da superestimativa na simulação do BAM-3D-M21 (Figura 7.10, primeira linha), contribuindo para uma melhor concordância com a observação. Entretanto, na região equatorial houve uma maior superestimativa do escoamento em 200 hPa com a nova parametrização. Isto pode ser explicado devido à posição do escoamento zonal reproduzidos pelos modelos, que atingiram latitudes mais altas do que o observado. Além disso, a simulação com o modelo BAM-3D-M21 posicionou o escoamento zonal bem mais ao norte que o modelo BAM-3D-J97 e os dados de reanálise ERA5 (Apêndice A.4). Os valores BIAS médios para todo o continente foram de $1,0496 \text{ ms}^{-1}$ para o BAM-3D-J97 e $2,3528 \text{ ms}^{-1}$ para BAM-3D-M21. Evidencia-se que ao fazer média para toda a região continental, os valores de BIAS podem ser amortecidos. Nos campos médios de BIAS que se refere ao trimestre SON, as simulações com os modelos BAM-3D-J97 e BAM-3D-M21 apresentaram uma subestimativa do escoamento em 200 hPa nas regiões entre as latitudes 10°S e 25°S . No entanto, houve uma diminuição da subestimativa com o modelo BAM-3D-M21, indicando que o posicionamento da AB sobre o sul da Amazônia foi melhor representado depois da implementação da nova parametrização de raízes finas ao modelo BAM. Também apresentou uma melhora nas superestimativas das regiões norte e sul do continente: na região da Amazônia os valores do escoamento em 200 hPa foram próximos do observado e no sul houve uma diminuição da superestimativa entre as latitudes de 40°S e 30°S .

Figura 7.10 - Valor de BIAS e RMSE do Escoamento do vento em 200 hPa média sazonal (ms^{-1}) simulado com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam, respectivamente, BIAS e RMSE (M21-ERA5).



FONTE: Elaboração da autora.

Uma comparação entre o BIAS e o RMSE mostra que um esquema de superfície com o perfil de raízes finas dinâmico acoplado ao modelo BAM, apresenta uma melhora na simulação do escoamento em 200 hPa no verão (DJF) e primavera (SON). No inverno (JJA) existe um erro maior associado ao novo perfil de raízes na região equatorial e uma melhora na simulação do escoamento em 200 hPa na Bacia do Prata (Figuras 7.9 e 7.10).

7.2.1.5 Umidade do solo (US)

A Figura 10 mostra a variabilidade sazonal da umidade do solo dos dados GLDAS (primeira linha) e simulação com o BAM-3D-J97 (segunda linha). As observações (GLDAS) medem o teor de umidade do solo até 40 cm da superfície. A simulação do modelo cobre às duas primeiras camadas, assim a umidade do solo é referente a camada de superfície e parte da zona de raízes, cerca de 60 cm.

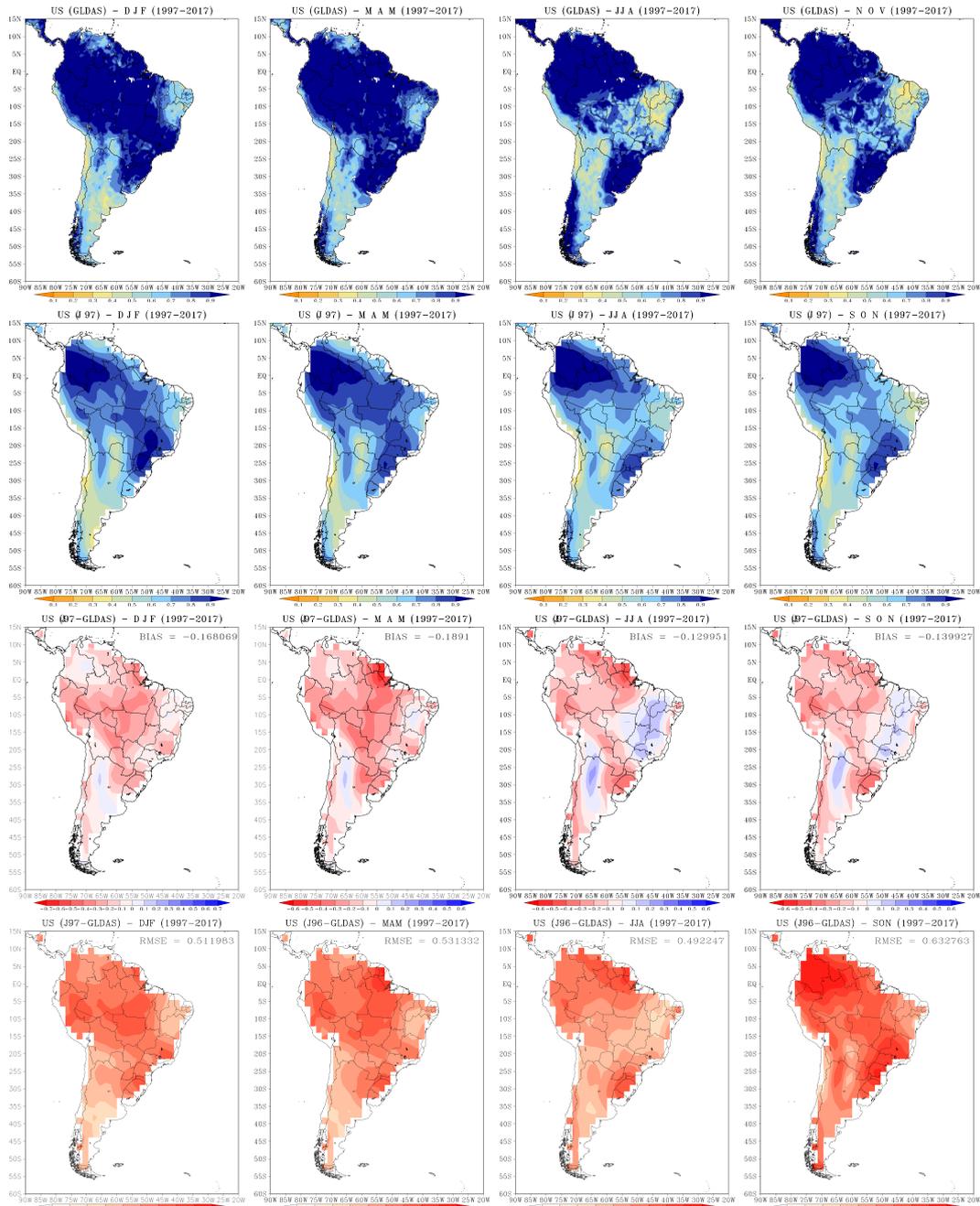
A umidade do solo média para DJF mostra regiões mais secas sobre o NEB, Chile

e Argentina, assim como regiões mais úmidas sobre o norte e noroeste-sudeste do continente. No inverno (JJA) verifica-se que houve uma diminuição umidade do solo no NEB, Chile, Argentina e parte central do Brasil (Figura 7.11, primeira linha). A variabilidade sazonal de umidade do solo na simulação com o modelo BAM-3D-J97 mostra campos médios no mesmo padrão, porém mais seco do que o GLDAS (Figura 7.11, segunda linha). A simulação com o modelo BAM-3D-M21 apresenta médias trimestrais (Apêndice A.5) próximas ao BAM-3D-J97.

O BIAS da umidade do solo calculado para DJF e MAM apresenta subestimativas na região central do continente e sul do Brasil para ambas simulações (Figura 7.11, terceira linha; Figura 7.12, primeira linha). No entanto, para estas regiões, o modelo BAM-3D-M21 subestimou mais a umidade do solo. Com relação aos trimestres JJA e SON, as subestimativas dos modelos se manteve no norte e no sentido noroeste-sudeste do continente, mas apresentou valores próximos à observação em uma pequena área central do Brasil.

As simulações com os modelos BAM-3D-J97 e BAM-3D-M21 foram mais úmidas que o GLDAS na região norte da Argentina e centro do nordeste até o sudeste brasileiro de junho-novembro (Figura 7.11, terceira linha; Figura 7.12, primeira linha), indicando uma superestimação dos valores previstos. No entanto, observa-se uma diminuição da superestimação da umidade do solo simulada com o BAM-3D-M21. Neste mesmo período, a precipitação simulada pelo BAM-3D-M21 (Figura 7.4) foi mais próxima da simulação, indicando que o efeito da nova parametrização de raízes finas na simulação da umidade do solo para atividade convectiva está coerente.

Figura 7.11 - Umidade do solo média sazonal simulada com o modelo BAM-3D-J87 para o período de 1997 – 2017. A primeira e segunda linha representam os campos médios do conjunto de dados do ERA5 e da simulação com do modelo BAM-3D-J87, respectivamente. A terceira linha exibe bias da precipitação (J97-GLDAS). A última linha corresponde ao RMSE (J97-GLDAS).



FONTE: Elaboração da autora.

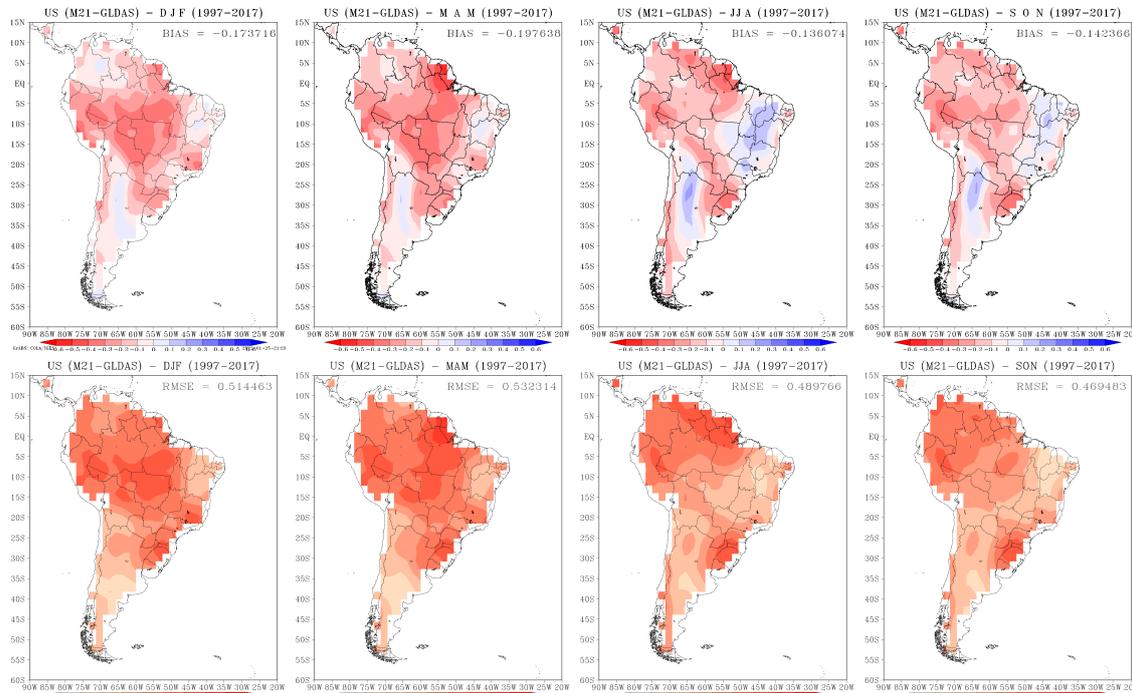
Os valores de RMSE para simulações da umidade do solo (Figura 7.11, quarta linha;

Figura 7.12, segunda linha) são maiores na parte central, sul do Brasil, e nos países Suriname e Guiana Francesa, indicando baixa precisão do modelo nessas regiões. Por outro lado, nos trimestres JJA e SON, a simulação com o modelo BAM-3D-M21 apresenta melhor previsibilidade nas regiões central e nordeste do Brasil.

Esses resultados indicam que a parametrização de raízes finas dinâmica melhora as superestimativas da umidade do solo, principalmente no período seco de cada região. No entanto, apesar das simulações com o modelo BAM-3D-M21 apresentarem maior magnitude nas regiões com superestimativas de umidade do solo, os valores de RMSE são próximos ou menores do que o RMSE apresentado com BAM-3D-J97.

Em razão de erros nas condições iniciais, física do modelo e parâmetros do modelo, a umidade do solo simulada ou prevista pode apresentar erros e/ou viés (YANG et al., 2020), segundo a base de dados de referência utilizada na análise. Mesmo que modelos de superfície com parametrização estática de raízes finas (JACKSON et al., 1997; SIVANDRAN; BRAS, 2013) consigam apresentar boas estimativas de umidade do solo, a nova parametrização de raízes finas produzem uma maior fração de raízes finas em camadas mais profundas do solo, conseqüentemente, ajustam a distribuição de umidade do solo simulada pelo modelo nessas camadas.

Figura 7.12 - Valor de BIAS e RMSE da umidade do solo simulada com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017. A primeira e segunda linha representam, respectivamente, BIAS e RMSE (M21-GLDAS).



FONTE: Elaboração da autora.

7.2.2 Análise de variáveis de superfície e padrões atmosféricos sobre a América do Sul durante o verão de eventos de El Niño e La Niña

Como destacado anteriormente, em grande parte da América do Sul, a nova parametrização de raízes finas inserida à estrutura de modelagem do BAM apresentou melhor desempenho durante o trimestre JJA (inverno na AS). Baseado neste resultado, optou-se por avaliar em mais detalhes o período com grande atividade convectiva na América do Sul (DJF) e entender o efeito da simulação com o BAM-3D-M21.

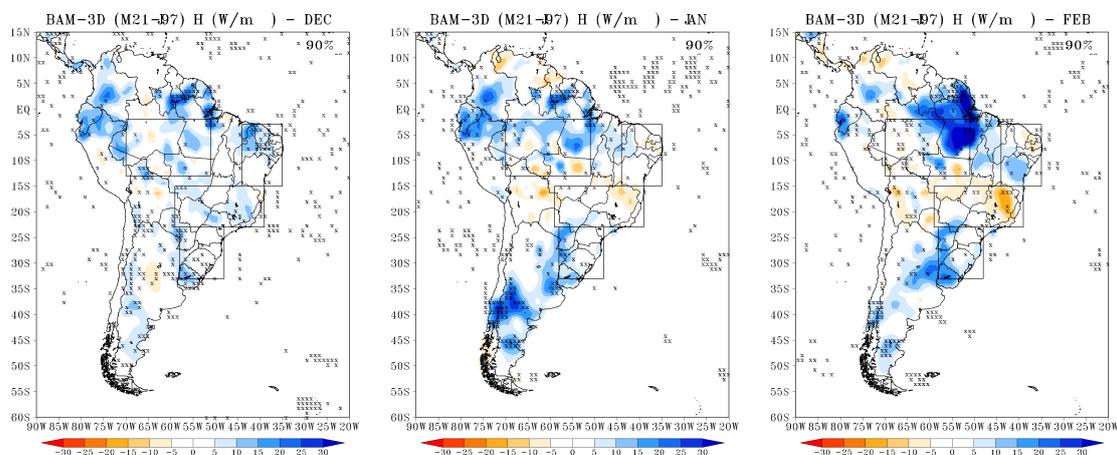
Como os fenômenos de El Niño e La Niña afetam o regime de chuva de diferentes formas na América do Sul, foram selecionados dois casos, o verão de 2014-2015 (El Niño) e 2011-2012 (La Niña). As áreas marcadas com “X” denotam as diferenças daquelas com nível de significância estatística de 90% da diferença das variáveis simuladas (BAM-3D-J97 e BAM-3D-M21) conforme o teste t-Student.

7.2.3 Caso 1: Ano de El Niño no verão da América do Sul (2014/2015)

7.2.3.1 Resposta da superfície continental à nova parametrização de raízes finas

A Figura 7.13 compara as diferenças do fluxo de calor sensível (H) simulado com o BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97, para o verão de 2014/2015 na América do Sul. No subdomínio da AMZ, observa-se diferenças mínimas entre as simulações no mês de dezembro. As diferenças são mais intensas nos meses de janeiro e fevereiro (parte leste do subdomínio). Nas diferenças de magnitudes do H para a região NEB, observa-se o aumento do fluxo de calor sensível na parte oeste em DEZ e no sul em FEV. Na região SDE, as diferenças entre as simulações são mínimas nos meses de dezembro e janeiro. Em FEV, a simulação com o BAM-3D-M21 reduziu o fluxo de calor sensível em quase todo o estado de Minas Gerais. Na região definida como SUL, verifica-se aumento do H no oeste nos meses de janeiro e fevereiro. A simulação de 3 meses com o modelo BAM-3D-M21 apresenta uma redução do fluxo de calor sensível na faixa de latitude entre 10° a 25° S em relação à simulação com o modelo BAM-3D-J97, principalmente para os últimos 2 meses (FEV e MAR). O primeiro mês (DEZ) não se observa a redução do fluxo de calor sensível, devido à proximidade da condição inicial. Este resultado mostra que o modelo BAM-3D-M21 acessa melhor a reserva de água nas camadas de solo mais profundas, assim um menor fluxo de calor sensível é simulado.

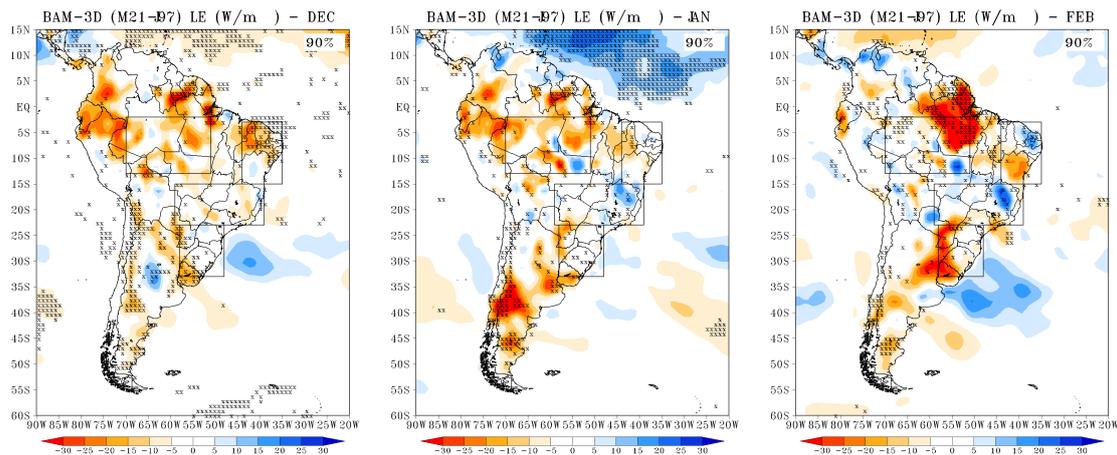
Figura 7.13 - Diferenças dos campos médios mensais do fluxo de calor sensível (H ; Wm^{-2}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.



FONTE: Elaboração da autora.

Na Figura 7.14 são apresentados os campos com as diferenças para o fluxo de calor latente (LE) entre as simulações com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97. Os resultados positivos indicam que o LE da simulação com BAM-3D-M21 foi superior ao LE com BAM-3D-J97, portanto os valores negativos indicam o inverso. A simulação do LE apresentou magnitude contrária do H, ou seja, nas regiões que as simulações com o modelo BAM-3D-M21 aumentou o H ocorreu uma redução do LE, e vice-versa. É importante destacar as diferenças significativas com 90% de confiança sobre os subdomínios do NEB (DEZ e FEV) e AMZ (FEV). Este resultado mostra uma resposta do fluxo calor latente em resposta a variação do fluxo de calor sensível, portanto, a física dos processos de superfície e a partição de energia estão consistentes.

Figura 7.14 - Diferenças dos campos médios mensais do fluxo de calor latente (LE; Wm^{-2}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.

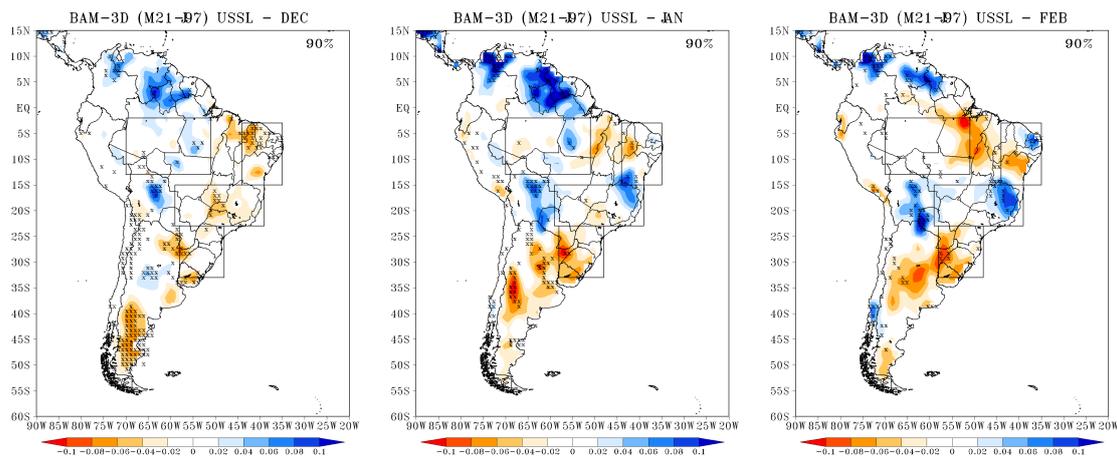


FONTE: Elaboração da autora.

As características da umidade do solo foram avaliadas pelas diferenças das simulações da umidade do solo na camada de superfície (USSL), umidade do solo na zona das raízes (UZRS) e umidade do solo na zona de drenagem (UZDS) (Figuras 7.15, 7.16 e 7.17). As diferenças mais significativas entre as umidades simuladas ocorreu na superfície (USSL). Na região do subdomínio SUL ocorreu uma redução acentuada de umidade do solo de dezembro a fevereiro simulada com o modelo BAM-3D-M21. Na região definida como NEB, ocorreu uma redução da USSL em dezembro – janeiro sobre o estado do Piauí. No mês de fevereiro, observa-se um aumento da umidade

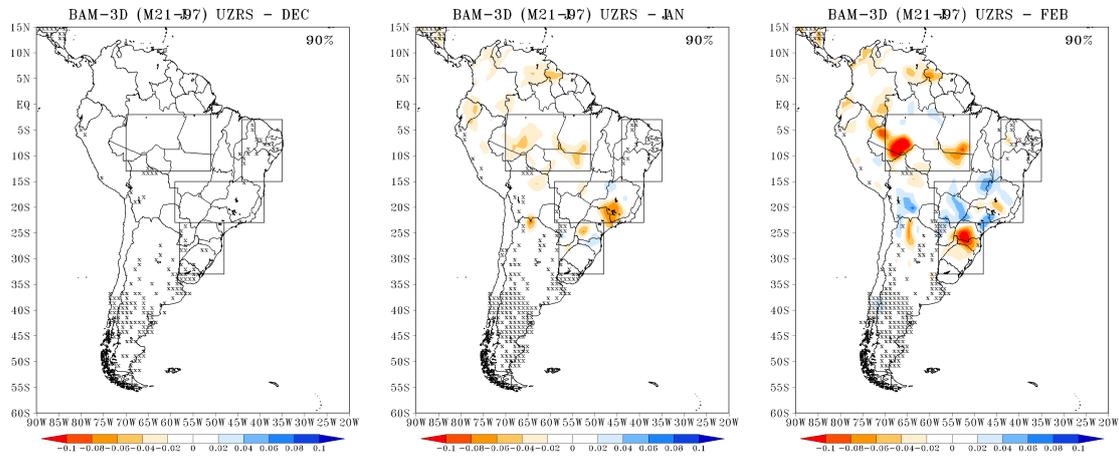
do solo em superfície nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, e uma diminuição no norte da Bahia. Na região definida como SDE, observa-se uma redução da USSL na parte central do subdomínio em DEZ e um aumento a leste em JAN e FEV. No leste do subdomínio da AMZ ocorre uma redução da umidade do solo no mês de FEV. Na zona de raízes (Figura 7.16), as maiores diferenças foram nos subdomínios da AMZ e SUL durante o mês de FEV. Para UZDS, as diferenças foram mínimas em todos os meses. A umidade do solo depende muito da precipitação, entretanto, verifica-se na camada de drenagem que o sinal da umidade do solo é o oposto ao encontrado na camada de superfície. Isso mostra que a simulação com o modelo BAM-3D-M21 a parametrização de raízes finas extrai menos água em relação à simulação com o modelo BAM-3D-J97.

Figura 7.15 - Diferenças dos campos médios mensais da umidade do solo em superfície (USSL) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.



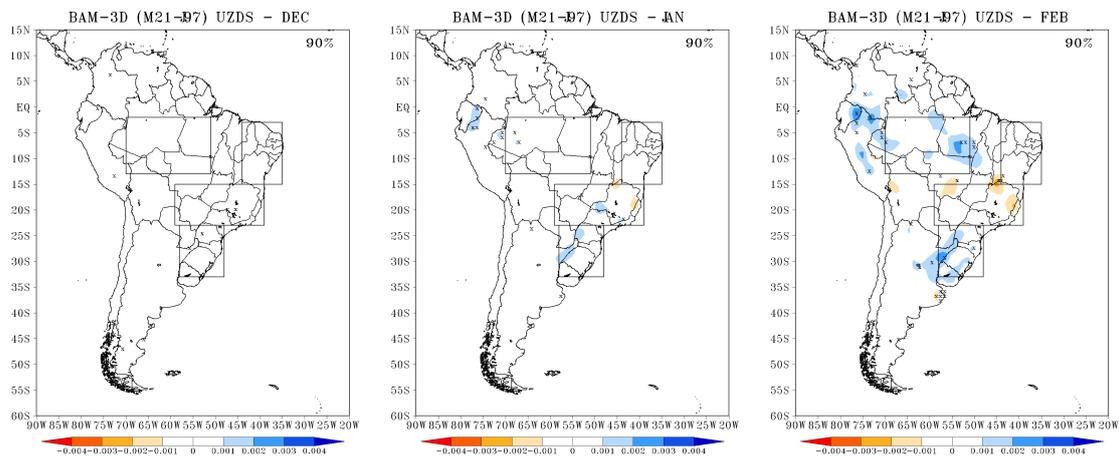
FONTE: Elaboração da autora.

Figura 7.16 - Diferenças dos campos médios mensais da umidade do solo na zona de raízes (UZRS) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014 – 2015.



FONTE: Elaboração da autora.

Figura 7.17 - Diferenças dos campos médios mensais da umidade do solo na zona de drenagem (UZDS) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.

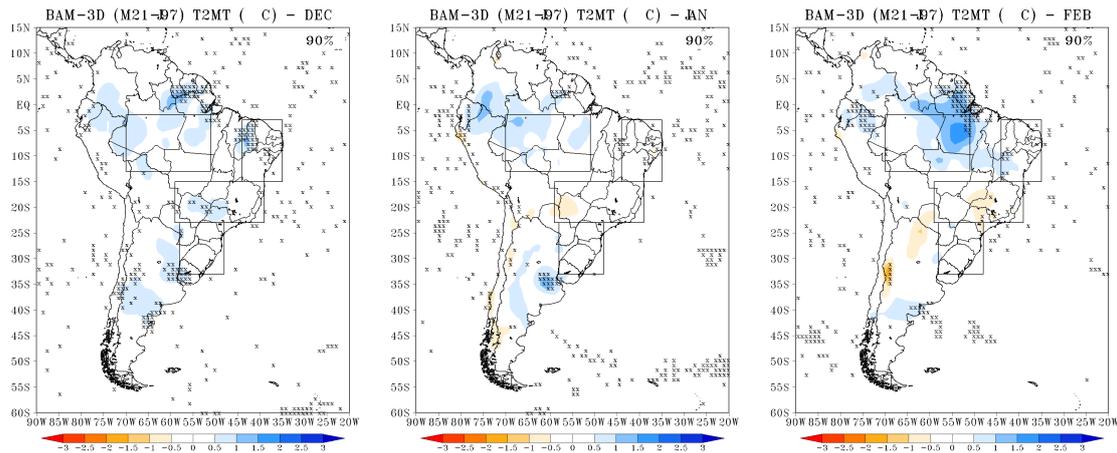


FONTE: Elaboração da autora.

A simulação com o modelo BAM-3D-M21 apresentou um pequeno aumento da T2MT na região da AMZ em todos os meses. Na região definida como SDE, a simulação com o modelo BAM-3D-M21 apresentou uma redução entre -1 °C e -0,5

°C nos meses de janeiro e fevereiro (Figura 7.18). Este resultado é atribuído ao aumento do fluxo de calor sensível nestas regiões.

Figura 7.18 - Diferenças dos campos médios mensais da temperatura do ar a 2 metros da superfície (T2MT; °C) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.



FONTE: Elaboração da autora.

Na Tabela 7.4 temos o resumo do comportamento de algumas variáveis de superfície, em que apresenta os valores médios das diferenças para as áreas dos subdomínios (AMZ, NEB, SDE e SUL). É possível observar que, para o fluxo de calor sensível (H), as menores diferenças foram de $1,188 \text{ Wm}^{-2}$ e $1,854 \text{ Wm}^{-2}$ para o subdomínio do NEB em fevereiro e SUL em dezembro, respectivamente. Os maiores valores encontrados das diferenças de H foram no mês de fevereiro para AMZ ($6,953 \text{ Wm}^{-2}$) e SUL ($8,902 \text{ Wm}^{-2}$). Para o LE, as maiores diferenças no NEB em DEZ ($-9,769 \text{ Wm}^{-2}$) e no SUL em FEV ($-14,811 \text{ Wm}^{-2}$) e as menores diferenças foram verificadas no subdomínio do SDE: $-3,318 \text{ Wm}^{-2}$, $1,258 \text{ Wm}^{-2}$ e $0,987 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente, DEZ, JAN e FEV. As diferenças para as variáveis de umidade do solo (USSL, UZRS e UZDS) apresentaram significância estatística nas duas primeiras camadas (USSL e UZRS). Apesar disso, todas as médias das diferenças dos subdomínios foram próximas de zero. Pouca diferença também foi observada para as simulações da T2MT, onde para o subdomínio da AMZ houveram as maiores diferenças, variando de $0,387 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $0,627 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A conclusão mais relevante apresentada na Tabela 7.4 é que nas regiões AMZ e NEB há um aumento da temperatura a 2 metros da superfície na simulação com o modelo BAM-3D-M21 em relação ao modelo BAM-3D-J97. Para

as regiões definidas como SDE e SUL há uma redução da temperatura (2 metros) na simulação com o modelo BAM-3D-M21.

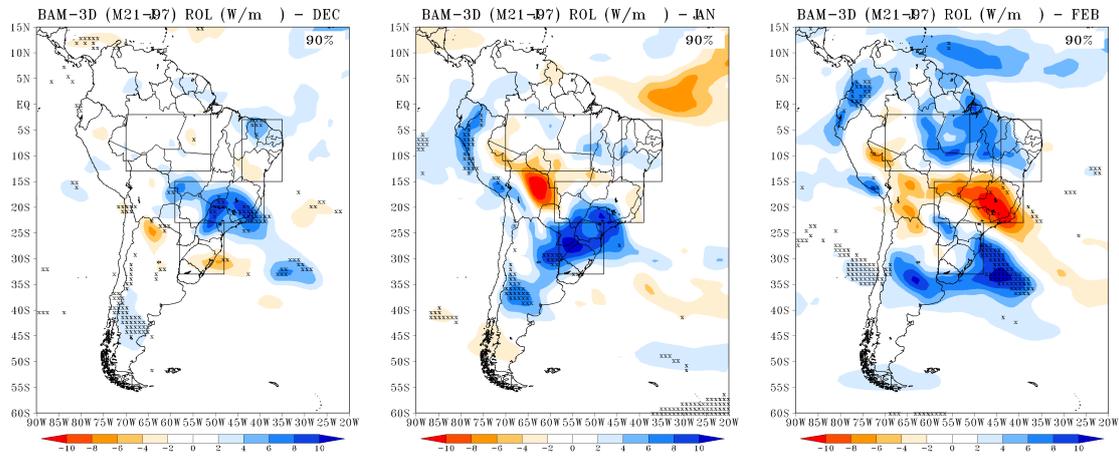
Tabela 7.4 - Diferenças médias das variáveis de superfície referentes ao verão de 2014-2015 para às quatro regiões da América do Sul.

VAR	Unidades	AMZ			NEB		
		DEZ	JAN	FEV	DEZ	JAN	FEV
H	Wm⁻²	3,771	4,554	6,953	5,693	0,894	3,393
LE	Wm⁻²	-8,214	-7,376	-8,272	-9,769	-3,525	-4,301
USSL		0,006	0,001	-0,015	-0,028	-0,003	-0,008
UZRS		0,008	-0,018	-0,019	0,001	0,004	0,002
UZDS	10⁻⁵	5,005	0,000	0,000	1,881	-3,825	-9,137
T2MT	°C	0,432	0,387	0,627	0,191	-0,039	0,185
VAR	Unidades	SDE			SUL		
				FEV	DEZ	JAN	FEV
H	Wm⁻²	4,661	-0,549	-4,356	2,253	6,818	8,902
LE	Wm⁻²	-3,318	1,258	0,987	-4,036	-5,723	-14,811
USSL		-0,019	0,004	0,025	-0,016	-0,040	-0,045
UZRS		0,001	-0,008	0,014	0,002	0,0003	-0,025
UZDS	10⁻⁵	5,697	8,954	0,000	1,744	0,000	0,000
T2MT	°C	0,305	-0,332	-0,296	0,179	-0,043	-0,039

7.2.3.2 Resposta dos padrões atmosféricos à nova parametrização de raízes finas

Na Região da AMZ e NEB não há uma resposta da ROL a nova parametrização de raízes finas nos meses de dezembro e janeiro (Figura 7.19). Em FEV, houve uma tendência positiva da ROL, variando entre 4 – 10 Wm⁻². No subdomínio da região SUL, observa-se que no mês FEV houve um aumento significativo da ROL na inicialização do modelo BAM-3D-M21. A região SDE, no mês FEV, mostra valores negativos expressivos, devido à redução da ROL nesta região.

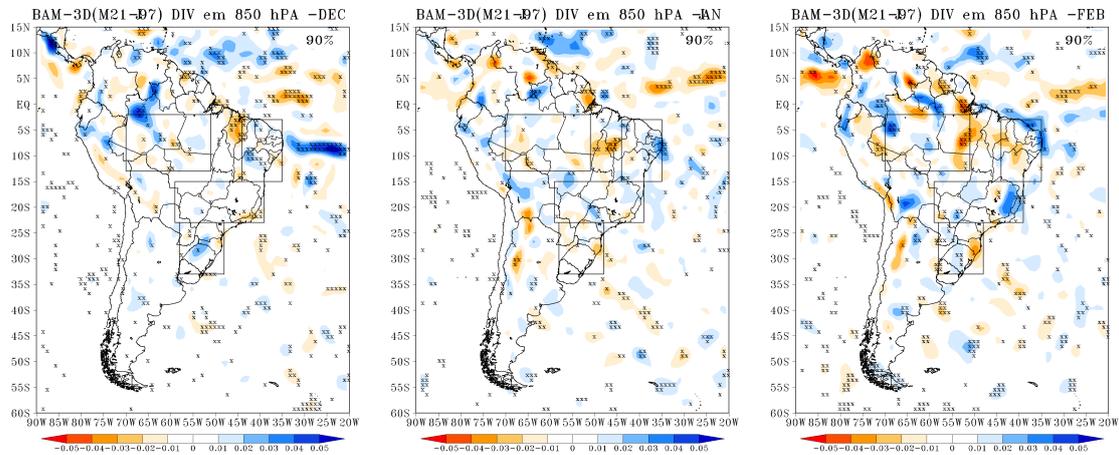
Figura 7.19 - Diferenças dos campos médios mensais da radiação de onda longa (ROL; Wm^{-2}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.



FONTE: Elaboração da autora.

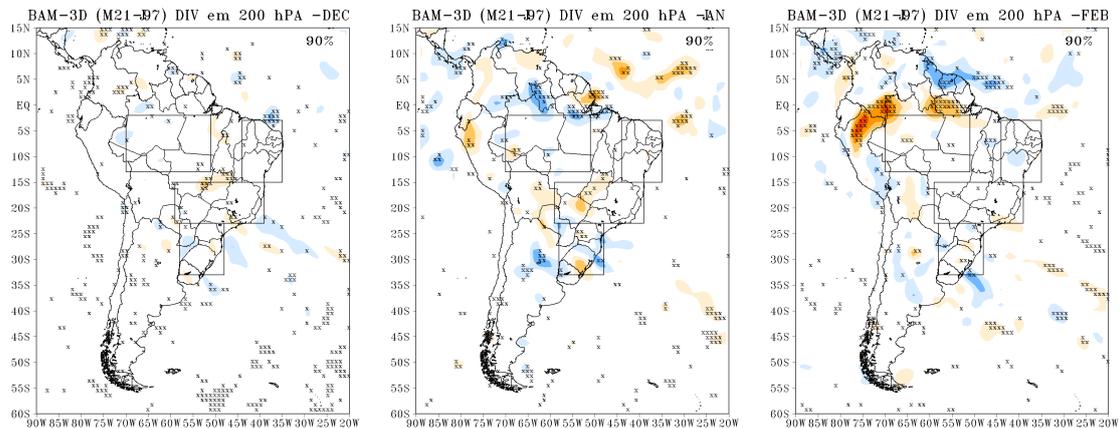
Nas diferenças entre as simulações com BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 para as divergências de umidade em 850 hPa e 200hPa (Figura 7.2010 e 7.21) não há evidências do efeito do novo esquema de raízes finas dinâmico, pois em todos os subdomínios existem pequenos núcleos com aumento e redução. No entanto, verifica-se nos maiores picos (negativos e positivos) uma tendência estatisticamente significativa no nível de confiança de 90%.

Figura 7.20 - Diferenças dos campos médios mensais da divergência de umidade em 850 hPA (DIV850; $*1e6 s^{-1}$) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.



FONTE: Elaboração da autora.

Figura 7.21 - Diferenças dos campos médios mensais da divergência de umidade em 200 hPA (DIV200; $*1e6s^{-1}$) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.

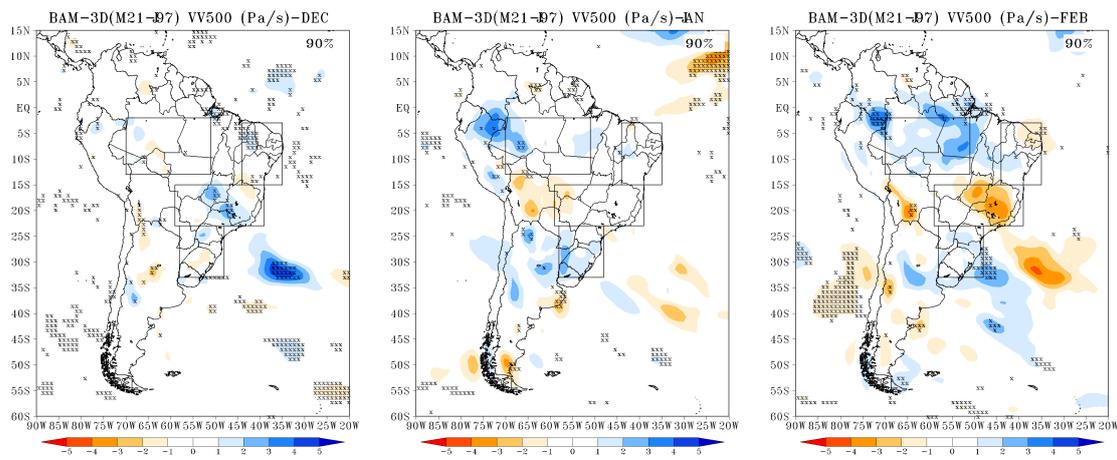


FONTE: Elaboração da autora.

Diferenças positivas na velocidade vertical do vento (VV500) (Figura 7.22) são observadas na região da posição da ZCAS (parte da região central e sudeste do Brasil) no mês de dezembro e valores negativos ocorrem no mês de fevereiro. Além disso,

há uma redução significativa na simulação da VV500 com o modelo BAM-3D-M21 no subdomínio da AMZ em relação ao modelo BAM-3D-J97. No mês de janeiro a oeste e no mês de fevereiro também há uma redução da velocidade vertical a leste da região AMZ.

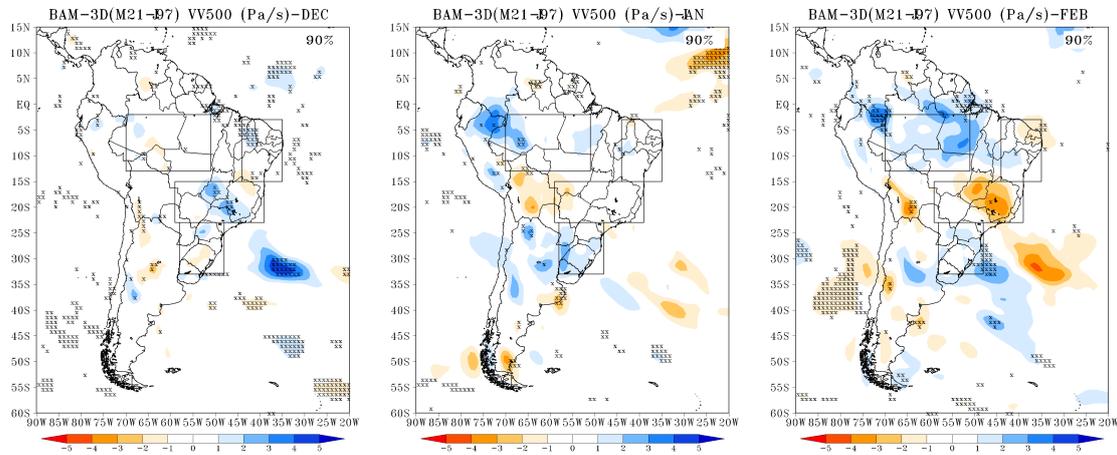
Figura 7.22 - Diferenças dos campos médios mensais da velocidade vertical em 500 hPA (VV500; Pa/s^{-1}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.



FONTE: Elaboração da autora.

Alterações no perfil de raízes finas nas camadas do solo também afetam as simulações de umidade específica (q) (Figura 7.23). Na região da AMZ, valores negativos foram dominantes indicando uma redução da umidade específica na simulação com o modelo BAM-3D-M21, exceto na região oeste do subdomínio em fevereiro. Na região definida como NEB, ocorre um sinal de redução da umidade específica nos meses de DEZ e JAN, entretanto em FEV ocorre um aumento da umidade específica no leste da região NEB simulada com o modelo BAM-3D-M21. Na região do subdomínio SDE, em dezembro há uma diminuição da umidade específica, no mês de janeiro e fevereiro um aumento da umidade específica simulada com o modelo BAM-3D-M21 em relação ao modelo BAM-3D-J97.

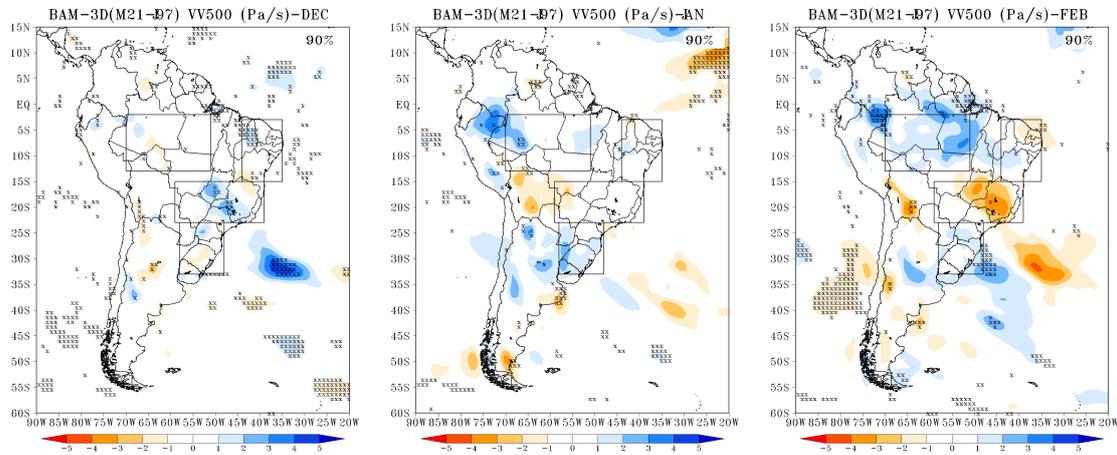
Figura 7.23 - Diferenças dos campos médios mensais da umidade específica em 1000 hPA (q ; gkg^{-1}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.



FONTE: Elaboração da autora.

A cobertura de nuvens (CBNV) simuladas (Figura 7.24) não apresentaram variações significativas na região do subdomínio da AMZ. Os resultados apontam que na região definida como SDE houve uma redução da cobertura de nuvem nos meses de dezembro e janeiro e um aumento no durante o mês de fevereiro simulado com o modelo BAM-3D-M2, em relação ao modelo BAM-3D-J97. Na região do subdomínio do NEB durante o mês de fevereiro, ocorreu uma pequena redução da CBNV sobre o estado da Bahia e oeste do Piauí.

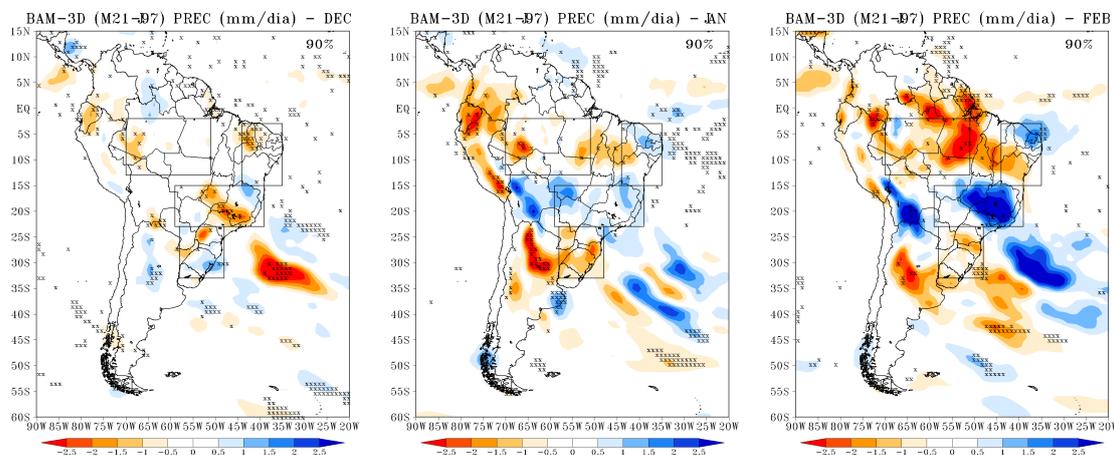
Figura 7.24 - Diferenças dos campos médios mensais da cobertura de nuvem (CBNV) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.



FONTE: Elaboração da autora.

A inclusão da parametrização de raízes finas dinâmica afeta significativamente a simulação da precipitação (PREC) (Figura 7.25), principalmente em regiões da posição climatológica da ZCIT e ZCAS. Na região leste da área AMZ há uma grande redução da PREC e um ligeiro aumento no noroeste da região AMZ durante o mês de fevereiro simulado com o modelo BAM-3D-M21, em relação à simulação com o modelo BAM-3D-J97. Na região do subdomínio SDE, verifica-se uma redução no mês de janeiro e um aumento da precipitação em FEV. Na região definida como NEB observa-se diferenças significativas durante o mês de FEV, uma redução da chuva na parte central e um aumento no extremo norte da região. No SUL observam-se maiores reduções no mês de JAN.

Figura 7.25 - Diferenças dos campos médios mensais da precipitação (PREC; mmdia^{-1}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.



FONTE: Elaboração da autora.

A Tabela 7.5 apresenta um resumo das diferenças médias para todos os subdomínios durante o verão de 2014-2015. Nota-se que os valores das diferenças médias são mínimas para as simulações de DIV850, VV500, umidade específica (q) e cobertura de nuvens (CBNV). As maiores diferenças médias são encontradas na simulação de ROL. Para regiões mais ao norte (AMZ e NEB) apresentam-se as menores diferenças de ROL, enquanto em áreas mais ao sul (SDE e SUL) ocorre o contrário. Em resumo, a Tabela 7.5 mostra que a inclusão da nova parametrização de raízes finas reduz a precipitação em período de El Niño em relação à parametrização de raízes fina original.

Tabela 7.5 - Diferenças médias dos padrões atmosféricos referentes ao verão de 2014 – 2015 para às quatro regiões da América do Sul.

VAR	Unidades	AMZ			NEB		
		DEZ	JAN	FEV	DEZ	JAN	FEV
ROL	Wm⁻²	0,011	2,531	2,531	1,207	2,555	2,555
DIV850	1e6s⁻¹	0,001	-0,001	-0,002	0,003	0,006	-0,006
DIV200	1e6s⁻¹	1,873	-6,588	-6,802	79,413	-1,558	0,000
VV500	s⁻¹	0,000	0,005	0,014	0,002	0,000	0,000
q	gkg⁻¹	-0,0002	-0,0003	0,0000	-0,0002	-0,0002	0,000
CBNV		0,007	0,003	-0,016	0,009	-0,016	-0,032
PREC	mmdia⁻¹	-0,292	-0,466	-1,205	-0,277	0,151	-0,271
VAR	Unidades	SDE			SUL		
		DEZ	JAN	FEV	DEZ	JAN	FEV
ROL	Wm⁻²	4,728	1,668	-5,897	0,556	7,860	2,937
DIV850	1e6s⁻¹	0,001	0,002	0,005	0,001	-0,003	-0,001
DIV200	1e6s⁻¹	-1,541	0,000	-3,560	341,822	4,101	-87,701
VV500	s⁻¹	0,006	-0,005	-0,015	-0,001	0,011	0,008
q	gkg⁻¹	0,000	0,000	0,0002	0,000	-0,0005	-0,001
CBNV		-0,049	-0,039	0,076	0,001	-0,096	-0,055
PREC	mmdia⁻¹	-0,479	0,622	1,396	-0,106	-0,968	-0,712

7.2.4 Caso 2: Ano de La Niña no verão da América do Sul (2011/2012)

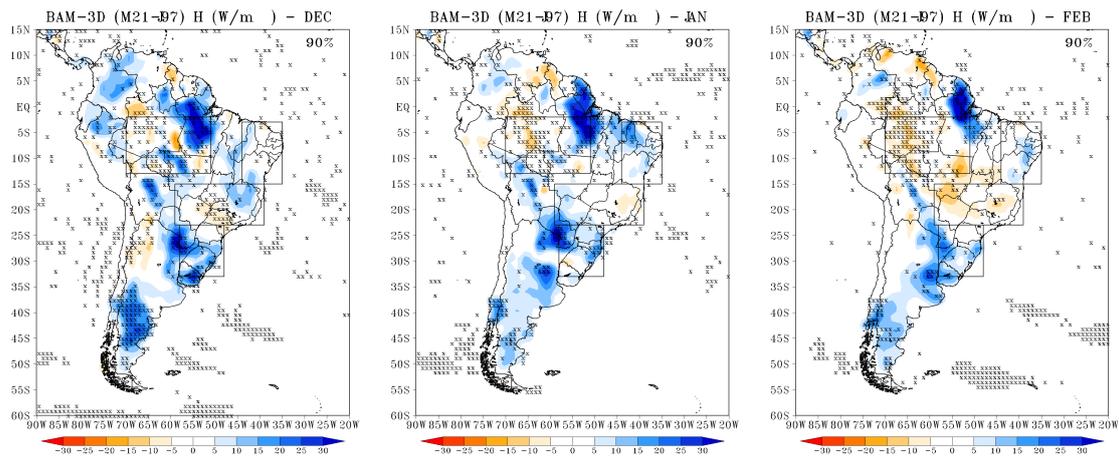
7.2.4.1 Resposta da superfície continental à nova parametrização de raízes finas

Com as simulações para o período chuvoso da América do Sul (verão austral-DJF) em ano de La Niña, podem-se verificar os efeitos da parametrização de raízes finas nas sensibilidades do fluxo de calor sensível (H) (Figura 7.26), fluxo de calor latente (LE) (Figura 20), umidade do solo em superfície (USSL) (Figura 7.28), umidade do solo na zona de raízes (UZRS) (Figura 7.29), umidade do solo na zona de drenagem (UZDS) (Figura 7.30) e na temperatura do ar à 2 metros da superfície (T2MT) (Figura 7.31).

Na região definida como NEB e SDE não há resposta da nova parametrização de raízes finas na simulação do H. Na região definida como AMZ e SUL, ocorre um aumento do H em algumas áreas dos subdomínios (Figura 7.26). Assim como esperado, onde tem um aumento do H há uma redução do LE (Figura 7.27). Conclui-se que a nova parametrização de raízes finas (BAM-3D-M21) possui facilidade em absorver mais água das camadas do solo, em relação à parametrização antiga BAM-3D-J97.

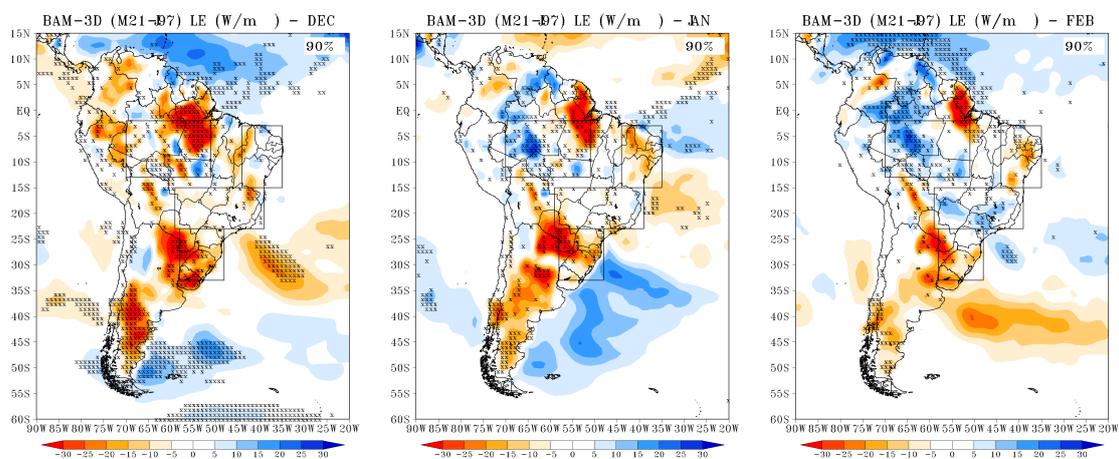
Mesmo em condições úmidas, as simulações com o modelo BAM-3D-M21 apresentaram maiores valores de fluxo de calor latente em relação às simulações com o modelo BAM-3D-J97.

Figura 7.26 - Diferenças dos campos médios mensais do fluxo de calor sensível (H ; Wm^{-2}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.



FONTE: Elaboração da autora.

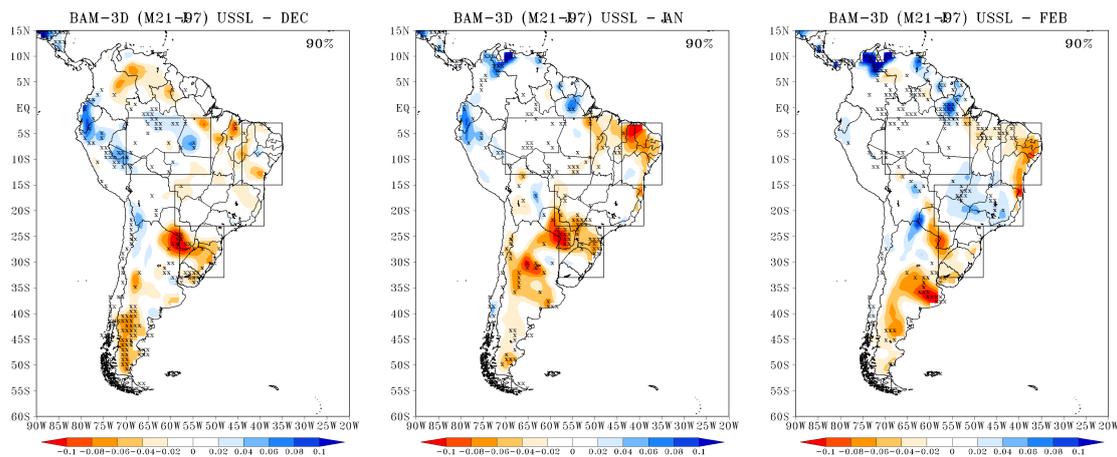
Figura 7.27 - Diferenças dos campos médios mensais do fluxo de calor latente (LE ; Wm^{-2}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.



FONTE: Elaboração da autora.

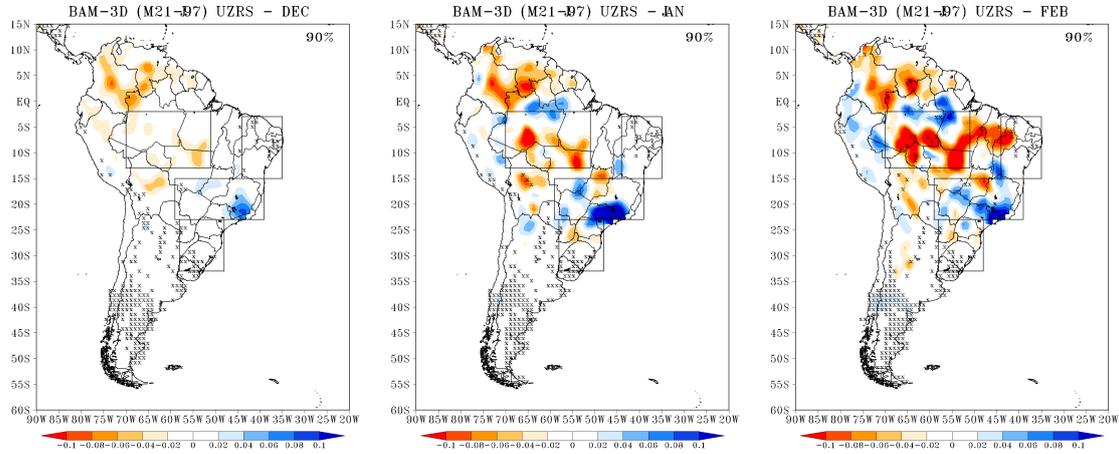
A umidade do solo depende da precipitação e da evapotranspiração, portanto, as diferenças das umidades do solo nas simulações entre os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 na camada superficial (USSL) (Figura 7.28), zona de raízes (UZRS) (Figura 7.29), e zona de drenagem (UZDS) (Figura 7.30) mostrou-se mais significativas nas duas primeiras camadas (USSL e UZRS), isto ocorre devido a uma melhor distribuição de raízes finas nas camadas da vegetação com dossel superior e inferior do modelo BAM-3D-M21. A maior redução de umidade do solo foi na zona de raízes do subdomínio da AMZ durante o mês de fevereiro. Este resultado concorda com a variabilidade dos fluxos de calor sensível, latente e a característica da facilidade de extração de água da nova parametrização de raízes finas em relação à antiga parametrização.

Figura 7.28 - Diferenças dos campos médios mensais da umidade do solo em superfície (USSL) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2014-2015.



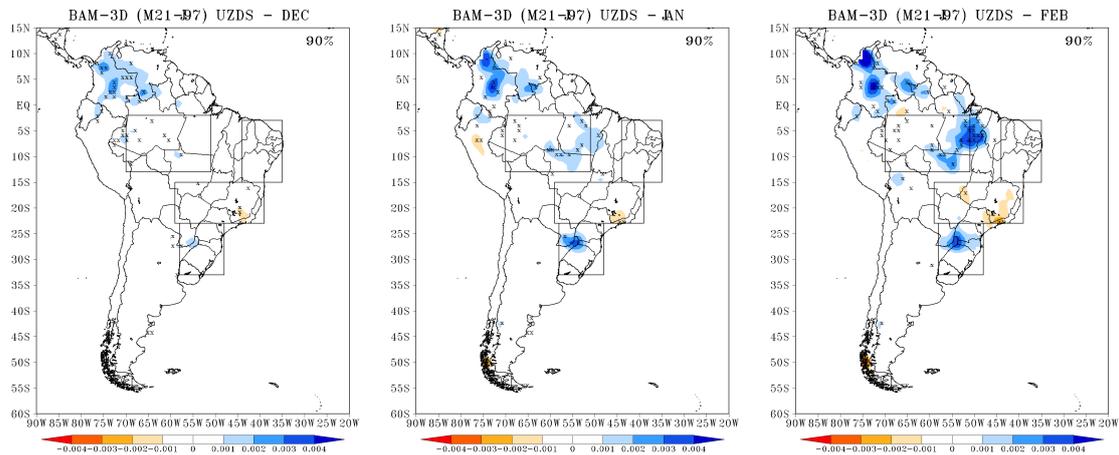
FONTE: Elaboração da autora.

Figura 7.29 - Diferenças dos campos médios mensais da umidade do solo na zona de raízes (UZRS) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.



FONTE: Elaboração da autora.

Figura 7.30 - Diferenças dos campos médios mensais da umidade do solo na zona de drenagem (UZDS) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.

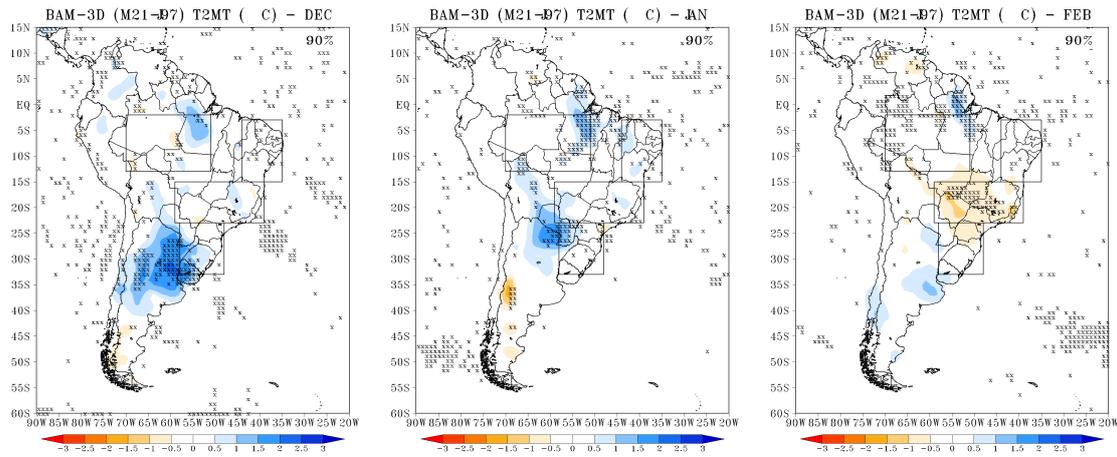


FONTE: Elaboração da autora.

A T2MT para os quatro subdomínios apresentou valores próximos da simulação BAM-3D-J97 em todos os meses (Figura 7.31). A maior e mais significativa redução de temperatura (2 metros) ocorreu na região SDE, no mês de FEV. Em resumo,

na faixa de latitude entre 15° a 30° S a simulação com a nova parametrização de raízes apresenta uma temperatura mais fria em relação à parametrização antiga. Nas demais áreas, a simulação com a nova parametrização mostrou uma maior T2MT em relação à parametrização antiga.

Figura 7.31 - Diferenças dos campos médios mensais da temperatura do ar a 2 metros da superfície (T2MT; °C) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.



FONTE: Elaboração da autora.

A Tabela 7.6 mostra o resumo das diferenças médias entre as simulações com BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97, referentes ao ano de evento de La Niña. Nos quatros subdomínios estudados, a região definida como SUL apresentou as maiores diferenças de H, LE e USSL. As diferenças de UZRS e UZDS foram pequenas em todas as áreas. Para a variável T2MT, todas as diferenças foram menores que 1 °C, onde as menores diferenças ocorreram na área da AMZ durante o mês de dezembro (0,095 °C), e na área do NEB nos meses de dezembro (-0,086 °C) e fevereiro (-0,029 °C). Baseado nas análises da Tabela 7.6 no período do evento da La Niña, a nova parametrização de raízes finas tende a simular uma T2MT menor quando comparada à parametrização antiga após três meses de integração. Este resultado é visto em todas as áreas selecionadas para análise.

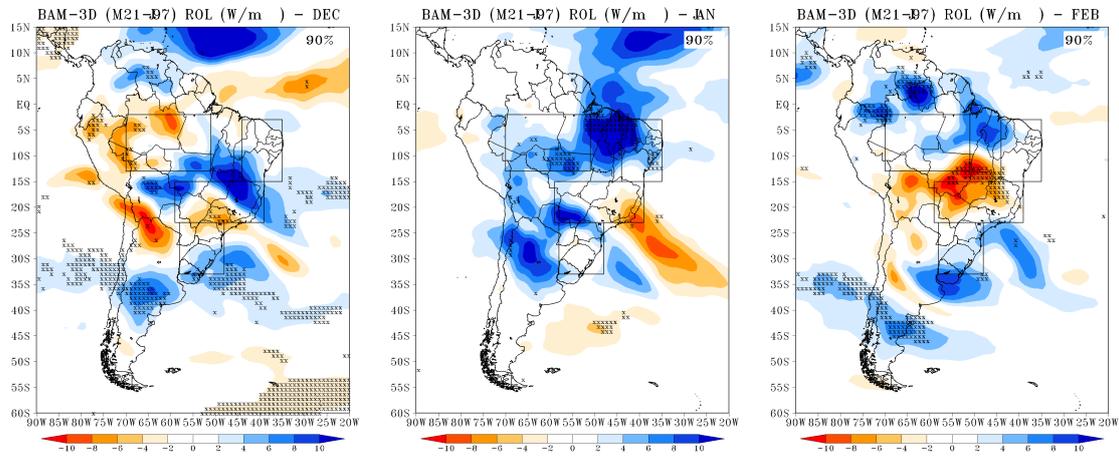
Tabela 7.6 - Diferenças médias das variáveis de superfície referentes ao verão de 2011 – 2012 para às quatro regiões da América do Sul.

VAR	Unidades	AMZ			NEB		
		DEZ	JAN	FEV	DEZ	JAN	FEV
H	Wm⁻²	4,834	2,786	-3,429	1,433	6,559	3,764
LE	Wm⁻²	-9,639	0,431	5,556	-2,425	-9,261	-6,971
USSL		0,007	-0,003	0,002	-0,017	-0,050	-0,044
UZRS		-0,016	-0,024	-0,043	0,004	0,007	-0,013
UZDS		0,0002	0,0005	0,0006	0,000	0,000	0,000
T2MT	°C	0,095	0,218	-0,154	-0,086	0,296	-0,029
VAR	Unidades	SDE			SUL		
		DEZ	JAN	FEV	DEZ	JAN	FEV
H	Wm⁻²	2,193	1,745	-4,853	11,435	9,844	8,638
LE	Wm⁻²	-4,892	-3,186	4,171	-19,394	-19,045	-10,842
USSL		-0,007	-0,014	0,013	-0,041	-0,041	-0,026
UZRS		0,017	0,027	0,021	0,0017	-0,001	-0,002
UZDS		-0,0002	-0,0001	-0,0004	0,0001	0,0007	0,0009
T2MT	°C	0,111	0,332	-0,704	0,507	0,155	-0,285

7.2.4.2 Resposta dos padrões atmosféricos à nova parametrização de raízes finas

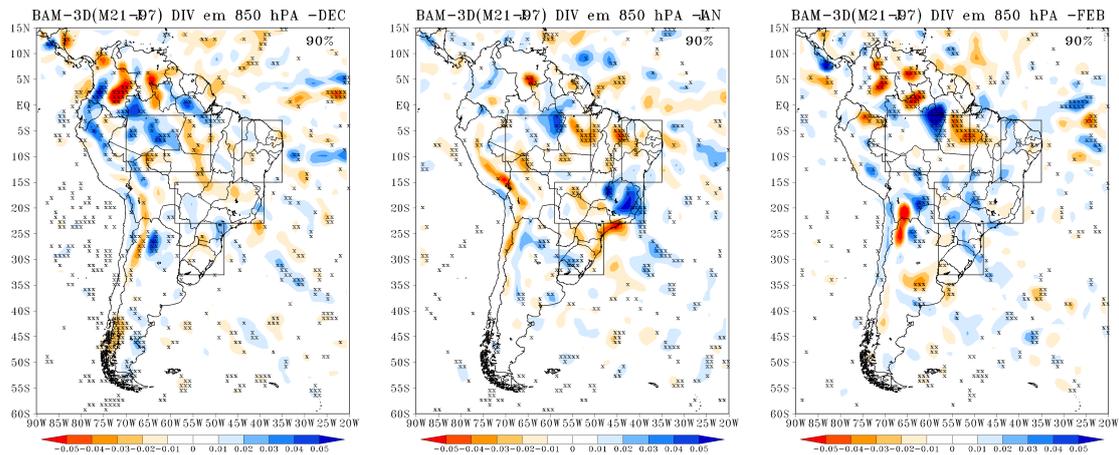
A Figura 7.32 mostra as diferenças médias mensais da radiação de onda longa (ROL) simulada com modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97. O novo esquema de raízes finas tendeu a reduzir a ROL no mês de dezembro e a aumentar nos meses de janeiro e fevereiro. Nota-se que quando há uma redução (aumento) na quantidade de ROL simulada, há um aumento (redução) na quantidade de nuvens nesta região (Figura 7.37). Isto indica que a nova parametrização de raízes finas influencia na simulação de ROL e, conseqüentemente, a quantidade da CBNV simulada. Embora haja uma diminuição de ROL e aumento de CBNV em algumas regiões, as diferenças nas divergências de umidade em 850 hPA (Figura 7.33) e 200 hPA (Figura 7.34) não podem ser explicada pela implementação de uma parametrização de raízes finas dinâmica, em todas as regiões há núcleos com aumento e redução da divergência de umidade.

Figura 7.32 - Diferenças dos campos médios mensais da radiação de onda longa (ROL; Wm^{-2}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.



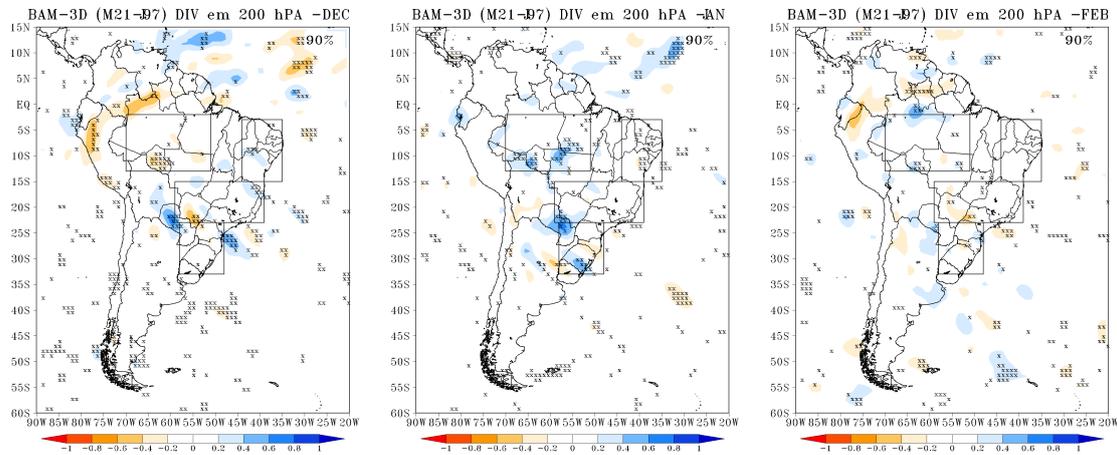
FONTE: Elaboração da autora.

Figura 7.33 - Diferenças dos campos médios mensais da divergência de umidade em 850 hPA (DIV850; $*1e6s^{-1}$) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.



FONTE: Elaboração da autora.

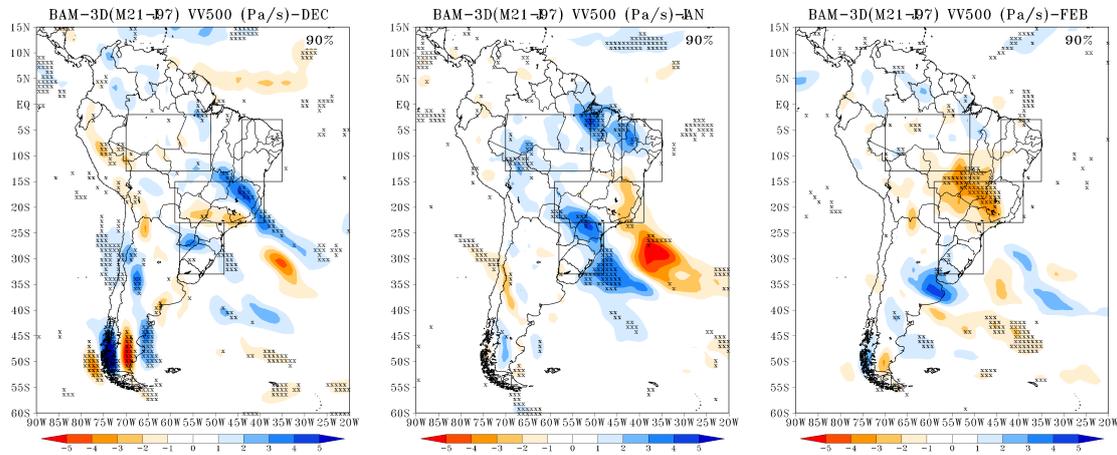
Figura 7.34 - Diferenças dos campos médios mensais da divergência de umidade em 200 hPA (DIV200; $\cdot 1e6s^{-1}$) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012..



FONTE: Elaboração da autora.

Os resultados da velocidade vertical (500hPa) para o caso 2 são mostrados na Figura 7.35. Há uma redução significativa das diferenças de VV500 simulada pelo modelo BAM-3D-M21 em relação ao BAM-3D-J97, mostrando uma redução da velocidade vertical ascendente no subdomínio SDE em dezembro. Nos meses de janeiro e fevereiro no subdomínio SDE há um aumento da velocidade vertical ascendente, com grande área de significância estatística de 90% de confiança em fevereiro. Além disso, as diferenças de VV500 oscilam bastante, em DEZ houve um aumento na mesma região. No SUL e AMZ, durante o mês de JAN há um aumento das diferenças da velocidade vertical em pequenas áreas com diferenças estatisticamente significativas, indicando que a nova parametrização de raízes finas influencia as simulações reduzindo a velocidade vertical ascendente em regiões de intensa atividade convectiva.

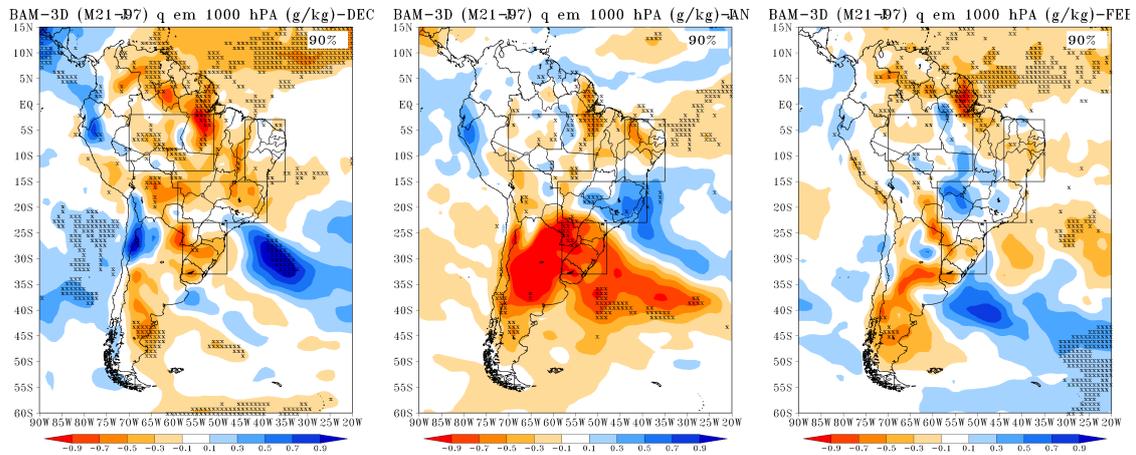
Figura 7.35 - Diferenças dos campos médios mensais da velocidade vertical em 500 hPA (VV500 Pa/s) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.



FONTE: Elaboração da autora.

Com relação à umidade específica em 1000 hPA (Figura 7.36), observa-se diferenças negativas em grande parte de todos os subdomínios, com áreas de maior diferença significativa estatisticamente sobre o AMZ (em dezembro) e SUL (em janeiro). No subdomínio do SDE foi observado diferença com sinal positivo, em janeiro e fevereiro. É importante destacar a grande significância estatística nas diferenças das áreas relacionadas à posição climatológica da ZCIT. Este resultado está consistente com as análises anteriores, pois a redução da velocidade vertical e da nebulosidade indica uma redução da intensidade da atividade convectiva sobre a América do Sul.

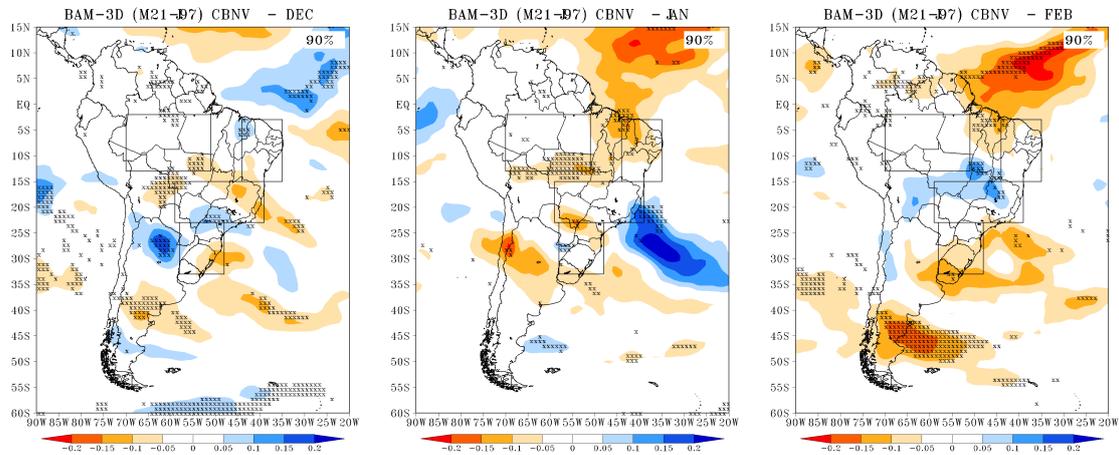
Figura 7.36 - Diferenças dos campos médios mensais da umidade específica em 1000 hPA (q ; $g\ kg^{-1}$) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.



FONTE: Elaboração da autora.

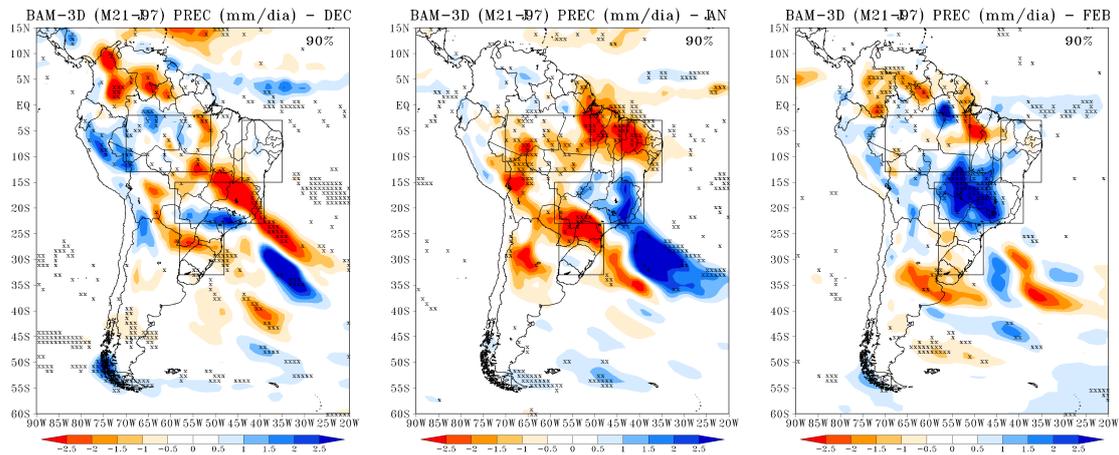
No SDE, a precipitação simulada (Figura 7.38) aponta um aumento na região correspondente à posição da ZCAS em janeiro e em fevereiro. Este resultado é compatível com o aumento da velocidade vertical ascendente, mostrando aumento da atividade convectiva. Em dezembro, há um aumento de precipitação no sul do subdomínio SDE, e uma redução de precipitação na posição climatológica da ZCAS simulada pelo modelo BAM-3D-M21. Portanto, conclui-se que a nova parametrização de raízes finas altera a atividade convectiva na região das ZCAS em relação à parametrização antiga, aumentando a precipitação na região sudeste do Brasil. No subdomínio SUL, há uma redução da precipitação em todos os meses. No NEB as maiores diferenças significativas ocorreram no mês de janeiro, o sinal é de redução da precipitação. Na região da AMZ as maiores diferenças nas simulações ocorreram no mês de janeiro, com uma redução da precipitação simulada com o modelo BAM-3D-M21. Além disso, nas regiões que tiveram uma redução de CBNV ocorreu uma redução da precipitação. Isso indica que a nova parametrização é sensível a estações chuvosas e secas.

Figura 7.37 - Diferenças dos campos médios mensais da cobertura de nuvem (CBNV) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.



FONTE: Elaboração da autora.

Figura 7.38 - Diferenças dos campos médios mensais da precipitação (PREC; mm dia^{-1}) entre os experimentos com os modelos BAM-3D-M21 e BAM-3D-J97 durante o verão (DJF) de 2011-2012.



FONTE: Elaboração da autora.

A Tabela 7.7 apresenta as diferenças médias dos padrões atmosféricos associados ao evento de La Niña (2011-2012). A partir da Tabela 5 observa-se que as diferenças de DIV850, DIV200, VV500, q e CBNV foram muito pequenas, entretanto em algumas

áreas foram significativas estatisticamente. As maiores diferenças médias entre os modelos foram apresentadas na simulação da ROL, entre 4-6 Wm^{-2} , nos meses de janeiro (AMZ e NEB) e fevereiro (AMZ e SDE). A precipitação simulada apresentou as maiores diferenças em torno de 1,5 mmdia^{-1} . Em geral, todas as variáveis apresentaram reduções e aumentos sem um padrão definido. Portanto, sobre a condição de La Niña, a Tabela 7.7 mostra que a parametrização de raízes finas impacta na redução da simulação de precipitação nos dois primeiros meses de integração do modelo BAM, porém o modelo aumenta a intensidade de precipitação a partir do 3 mês de integração. Estes resultados são importantes para a previsão sazonal, pois agrega informações que podem ser úteis na avaliação da previsão.

Tabela 7.7 - Diferenças médias dos padrões atmosféricos referentes ao verão de 2011 – 2012 para às quatro regiões da América do Sul.

VAR	Unidades	AMZ			NEB		
		DEZ	JAN	FEV	DEZ	JAN	FEV
ROL	Wm^{-2}	-1,369	4,559	1,214	1,878	5,858	1,069
DIV850	$1\text{e}6\text{s}^{-1}$	0,002	-0,0028	0,000	-0,001	-0,0034	0,005
DIV200	$1\text{e}6\text{s}^{-1}$	-4,776	8,758	6,269	6,643	-6,235	-4,258
VV500	s^{-1}	0,000	0,011	-0,003	0,0003	0,009	-0,003
q	gkg^{-1}	-0,0003	0,000	0,000	-0,0001	-0,0002	-0,0002
CBNV		-0,004	-0,030	-0,012	0,003	-0,069	-0,038
PREC	mmdia^{-1}	-0,017	-1,126	0,116	-0,007	-1,517	0,049
VAR	Unidades	SDE			SUL		
		DEZ	JAN	FEV	DEZ	JAN	FEV
ROL	Wm^{-2}	2,284	0,635	-4,545	0,648	1,786	2,415
DIV850	$1\text{e}6\text{s}^{-1}$	-0,001	0,006	0,004	-0,0015	-0,005	0,001
DIV200	$1\text{e}6\text{s}^{-1}$	3,218	6,472	-5,861	0,000	7,740	2,098
VV500	s^{-1}	0,003	-0,0003	-0,018	0,007	0,015	0,005
q	gkg^{-1}	-0,0002	0,0001	0,0002	-0,0003	-0,0008	-0,0002
CBNV		-0,016	-0,017	0,029	0,002	-0,037	-0,064
PREC	mmdia^{-1}	-0,727	0,227	1,676	-0,727	-1,504	-0,308

7.2.5 Discussão

A parametrização de raízes finas de Jackson et al. (1997) formula as raízes finas de forma constante para todos os tipos de funcionais de plantas (PFTs). Neste contexto, a profundidade das raízes em modelos de superfície continental é muito baixa e a escassez de raízes profundas é uma razão de indefinições na simulação da transpiração das plantas (PAPASTEFANOU et al., 2020; PAN et al., 2020). Visando melhorar

essas simulações e torná-las consistentes com as observações, foi desenvolvida neste trabalho uma parametrização de raízes finas dinâmica capaz de responder às condições climáticas da região, com máxima fração de raízes finas em camadas mais profundas do solo.

Para analisar melhor a sensibilidade da nova parametrização de raízes finas, foram analisados o verão da América do Sul em anos com eventos de El Niño (2014-2015) e La Niña (2011-2012). Diferenças entre as umidades do solo simuladas são explicadas devido à alteração da profundidade do solo e a distribuição de raízes em cada camada. A transpiração das plantas modeladas é controlada pela umidade do solo de camada mais profunda devido a maior distribuição na fração de raízes finas. Tanto para regiões chuvosas e secas, houveram redução das USSL e UZRS com a nova parametrização de raízes finas. No entanto, para o ano de El Niño verifica-se que um aumento de USSL no norte do continente, evidenciando que a umidade do solo está relacionada com a precipitação associada à ZCIT. Cai et al. (2020) observou que a ZCIT predomina mais ao sul em anos de El Niño e mais ao norte em anos de La Niña.

A umidade do solo influencia na simulação dos fluxos de superfície (ISHOLA et al., 2020), devido às trocas de calor e umidade entre o sistema solo-vegetação-atmosfera (KNIST et al., 2017). As respostas do H e LE com o modelo BAM-3D-M21 mostram um impacto proporcional nos anos de El Niño e La Niña, com diferentes regiões úmidas e secas sobre a América do Sul. Indicando que regiões úmidas (secas) apresentam um aumento (redução) do LE levando a um aumento (redução) da precipitação. É importante destacar que nos dois casos, o subdomínio do SDE apresentou um aumento da precipitação podendo ser associado ao transporte de umidade do oceano para a costa brasileira. Koné et al. (2022) também observaram que a precipitação tendeu a aumentar em anos chuvosos e secos, ocorrendo aumento da precipitação na estação seca devido ao transporte de umidade do oceano para a costa ocidental do Sahel e da Guiné. Concluíram que a física interna do modelo é importante para determinar o clima do modelo de superfície.

Além disso, nas regiões chuvosas referentes aos eventos de El Niño e La Niña, o aumento do H e a redução de LE não foi considerável para o aumento da temperatura do ar (2 metros). Este resultado também foi encontrado por Domingues (2015) que associa a redução da temperatura com o aumento do albedo.

Os padrões de chuvas nos dois casos (El Niño e La Niña) foram influenciados pela dinâmica das raízes finas com uma redução da precipitação simuladas sobre regiões

de grandes atividades convectivas, principalmente nos meses de janeiro de ambos os anos. Isto concorda com o apresentado na Figura 7.4, a qual mostra uma melhora na subestimativa da precipitação simulada pelo BAM-3D-M21 nessas regiões.

A nova parametrização de raízes finas pode influenciar a simulação da umidade específica (q). O vapor d'água atmosférico é diretamente proporcional a umidade do solo. Vapor d'água e calor sensível são transportados do solo para o ar através de difusão turbulenta na camada limite atmosférica (FLORES-ROJAS et al., 2019).

Em resumo, a resposta da nova parametrização de raízes finas aos padrões de superfície e atmosférico mostrou um ganho nas simulações com o modelo BAM-3D, principalmente durante os períodos secos de cada região, o modelo consegue simular de forma mais realista as partições do balanço de energia à superfície (H e LE) e padrões atmosféricos.

7.2.6 Impacto da inicialização da umidade do solo na precipitação e temperatura do ar (2 metros)

A inicialização da umidade do solo em modelos globais pode afetar significativamente o desempenho das previsões meteorológicas sazonais (SEO et al., 2019; ZHANG et al., 2020; KOSTER et al., 2020). Os efeitos da umidade do solo na geração de chuvas são especialmente importantes em regiões secas e úmidas (XIANG et al., 2018). Diante disso, foi avaliada as médias mensais para a precipitação e T2MT simuladas com a nova parametrização de raízes finas para entender os efeitos entre os dois casos (El Niño e La Niña) com diferentes inicializações de umidade do solo (Figuras 7.39 e 7.40).

No caso 1 (El Niño), a precipitação média simulada da área da AMZ aumenta consideravelmente com a umidade inicial do solo nos meses de DEZ e JAN. Em fevereiro, observa-se que na simulação com a umidade do solo a 60% ocorreu a menor média da precipitação. Em março, apesar da alteração de umidade do solo inicial, as médias das precipitações simuladas apresentaram valores próximo. No caso 2 (La Niña), entre janeiro e março, houve um aumento da precipitação com a inicialização de umidade do solo a 40% e 60% quando comparada com a simulação da umidade do solo a 100%. Conforme Nieto et al. () os ventos alísios oriundos do Atlântico equatorial são a principal fonte de transporte de umidade para a Amazônia. Além disso, a evapotranspiração proveniente da Floresta Amazônica corresponde a uma das principais fontes de vapor d'água e desempenha um papel fundamental no ciclo hidrológico da região. De acordo com Rocha et al. (2017), durante o verão austral, a

atividade convectiva e a precipitação da Amazônia, estão relacionadas a acentuada convergência de umidade sobre a região.

No subdomínio do NEB, a precipitação foi variável ao longo dos meses, atingindo o pico em março com a umidade do solo a 40% nos dois casos (Figuras 7.39 e 7.40). Cabe ressaltar que o aumento da precipitação com a diminuição da umidade do solo foi predominante nesta região, ou seja, a umidade do solo inicial a 40% apresentou os maiores valores médios de precipitação em todos os meses para o caso de La Niña e os maiores em FEV – MAR para o evento de El Niño. Este mecanismo é refletido da profundidade de raízes no solo, já que a vegetação consegue absorver água de camadas mais profundas, conseguindo realizar o processo de transpiração independente das condições superficiais do solo (úmido ou seco) (CHENG et al., 2021). Outro fator importante diz respeito às condições de transporte de umidade do oceano Atlântico em direção ao continente, que podem contribuir para a ocorrência de chuva, principalmente no litoral leste (REBOITA et al., 2016). Além disso, as inicializações de umidade inicial do solo seco induz a uma convecção térmica mais intensa (devido ao forte aquecimento da superfície) e levar a convecção profunda e, finalmente, a uma correlação negativa de umidade do solo e precipitação (LIN; CHENG, 2016).

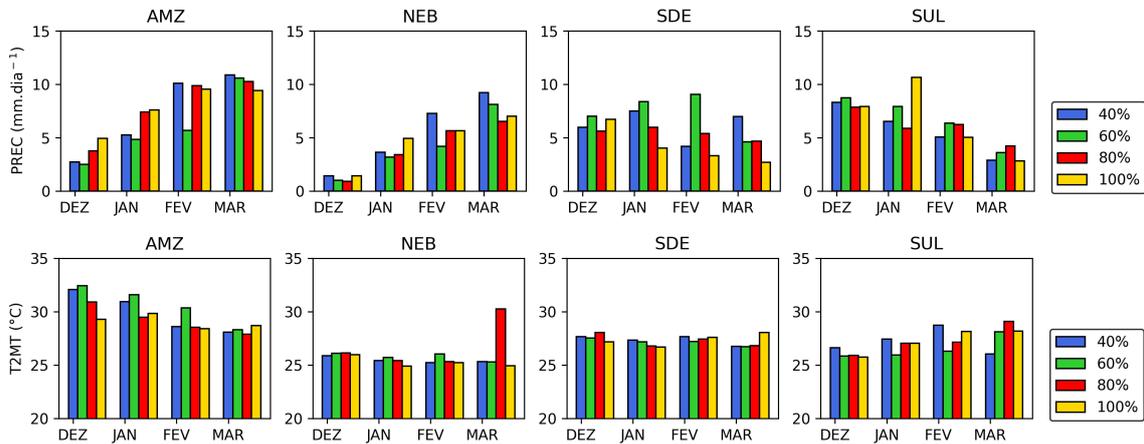
No SDE, durante o evento de El Niño nos meses de janeiro a março, houve um aumento das precipitações simuladas com a redução da umidade do solo. Nas simulações do ano de La Niña, a resposta da precipitação ao aumento da umidade inicial foi inversa ao caso de El Niño, ocorreu um aumento da precipitação com o aumento da inicialização da umidade do solo. Este resultado pode estar relacionado com o transporte de umidade da Amazônia para o sudeste brasileiro, através do jato de baixos níveis (JBN) canalizado da Cordilheira dos Andes (LEMES et al., 2020). As médias das precipitações para a área do SUL durante o El Niño são apresentadas na Figura 7.39 (primeira linha), o modelo BAM-3D-M21 com inicialização de umidade do solo a 40% e 60%, mostram um aumento da precipitação com o aumento da umidade do solo, sugerindo uma relação positiva entre a geração de chuvas e a umidade do solo inicial. No entanto, as simulações com a umidade do solo inicial a 80% e 100% não apresentam um padrão de precipitação definido. No caso de evento de La Niña (Figura 7.40), a partir do mês de janeiro houve uma redução da precipitação com o aumento da umidade do solo inicial, apresentando pico em março com a umidade do solo inicial de 40%. Os sistemas frontais são um dos principais responsáveis por grande parte dos acumulados de precipitação da região sul do Brasil (MURARA et al., 2019). Portanto, o efeito da nova parametrização de raízes finas na precipitação sobre esta região não pôde ser observado, devido às chuvas associadas a sistemas

frontais.

Conforme os resultados simulados de T2MT sob diferentes condições iniciais de umidade do solo (40%, 60%, 80% e 100%), a umidade do solo pode afetar a temperatura do ar a 2 metros significativamente e lentamente (Figura 7.39 e 7.40, segunda linha). Os resultados indicam que a T2MT diminui com o aumento da umidade do solo e aumento de precipitação. À medida que a umidade do solo aumenta, o vapor d'água atmosférico aumenta, conseqüentemente, o aumento da umidade específica leva à redução da temperatura (ZHANG et al., 2020).

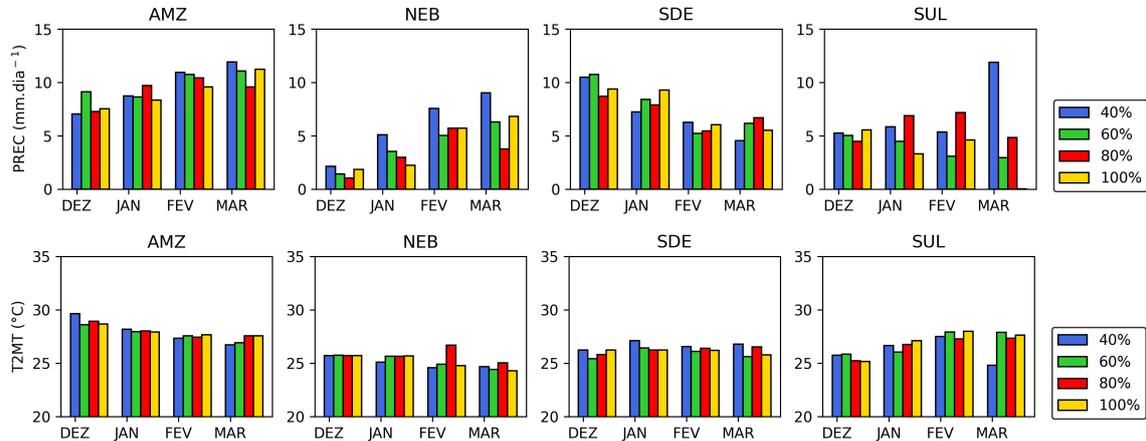
Com a implementação do esquema de raízes finas dinâmico nas simulações, a máxima fração de raízes finas atinge camadas mais profundas e/ou mais úmidas do solo. Com isso, melhora a simulação dos fluxos de superfície, conseqüentemente, a simulação da precipitação e temperatura. Os resultados são consistentes com os trabalhos de Zhou e Geerts (2013) e Zhang et al. (2020).

Figura 7.39 - Médias mensais da precipitação (primeira linha) e temperatura do ar em 2 metros (segunda linha) das simulações com o modelo BAM-3D-M21 sob diferentes condições iniciais de umidade do solo, referentes ao evento de El Niño (CASO 1). As inicializações de umidade do solo foram de 40%, 60%, 80% e 100%, foram representadas por barras azuis, verdes, vermelhas e amarelas, respectivamente.



FONTE: Elaboração da autora.

Figura 7.40 - Médias mensais da precipitação (primeira linha) e temperatura do ar em 2 metros (segunda linha) das simulações com o modelo BAM-3D-M21 sob diferentes condições iniciais de umidade do solo, referentes ao evento de La Niña (CASO 2). As inicializações de umidade do solo foram de 40%, 60%, 80% e 100%, foram representadas por barras azuis, verdes, vermelhas e amarelas,



FONTE: Elaboração da autora.

7.3 Conclusão

A primeira parte desta seção analisou o BIAS e o RMSE da precipitação (PREC), temperatura do ar (2 metros; T2MT), escoamento do vento em 850 hPa (V850) e 200 hPa (V200), e umidade do solo (US) simuladas pelos modelos BAM-3D-J97 e BAM-3D-M21, para o período de 1997 – 2017. Portanto, foi avaliada abrangentemente a capacidade do modelo BAM em reproduzir os padrões observados das variáveis em toda América do Sul. As representações dos campos médios mostraram que o modelo BAM simula as variações sazonais e espaciais de todas as variáveis na América do Sul. Em geral, o modelo BAM-3D-M21 foi mais preciso em simular as variações sazonais, embora ainda exista subestimativa e superestimativa em algumas regiões. Evidentemente, a saída do modelo BAM-3D-M21 resultou em melhores estimativas durante o inverno (JJA) e no período seco de cada região.

A precipitação simulada pelo modelo BAM-3D-M21 é superestimada na Bacia do Prata e subestimada na região central da América do Sul nos trimestres DJF e SON. Embora o modelo BAM-3D-M21 seja capaz de representar a precipitação associada à ZCAS durante o verão, verifica-se uma subestimativa da precipitação sobre a região central do continente. Para todos os trimestres, a T2MT foi superestimada na região central do continente e subestimada no Nordeste e parte da Argentina.

A simulação do escoamento do vento em 850 hPa foi bem reproduzida pelo modelo BAM-3D-M21, mostrou a circulação associada com as altas subtropicais.

Na simulação do escoamento do vento em 200 hPa durante DJF, o modelo BAM-3D conseguiu reduzir a superestimativa na região da Alta da Bolívia e a subestimativa do Norte e Nordeste do continente. O modelo BAM com a nova parametrização de raízes finas, reduziu a superestimativa da umidade do solo simulada na região norte da Argentina e centro do nordeste até o sudeste brasileiro durante JJA e SON. Logo, conclui-se que o modelo BAM-3D-M21 apresentou um ganho nas simulações, reduzindo as superestimativas e/ou subestimativas do V200 em diversas regiões. Para o verão da América do Sul (DJF), a nova parametrização de raízes finas influencia nas simulações das variáveis significativamente. Além disso, nesse trimestre foi apresentado os maiores RMSE médio do continente. Em resposta à análise detalhada da simulação do verão da América do Sul em anos de El Niño e La Niña, os resultados mostram sensibilidade do modelo BAM-3D-M21 nas simulações dos processos de superfície e padrões atmosféricos. As maiores áreas com diferenças significativamente estatísticas (90% de confiabilidade) foram nas simulações de H e LE.

Analisando as características locais associadas aos eventos de El Niño e La Niña de cada subdomínio, nota-se uma maior redução da precipitação em regiões secas. Por exemplo, na região definida para o SUL, no mês de janeiro observa-se uma redução da precipitação em ano de El Niño e, uma redução ainda maior durante as simulações em ano de La Niña. Portanto, o modelo BAM-3D-M21 é sensível em capturar padrões dos eventos de El Niño e La Niña selecionados.

Dado que a umidade do solo desempenha um papel importante nas interações de energia e água entre o sistema superfície-atmosfera, foi analisada o efeito da inicialização da umidade do solo com o modelo BAM-3D-M21 nas simulações da precipitação e temperatura do ar (2 metros). Em geral, os resultados mostraram que a precipitação não apresenta um padrão definido com a redução/aumento da umidade do solo inicial. No entanto, quando o aumento da umidade do solo inicial está associada a uma redução da precipitação, este resultado pode ser explicado através do transporte de umidade para a região, tais como, o transporte de umidade da Amazônia para o sudeste, ou transporte de umidade do oceano para o continente (NEB). A T2MT apresentou um padrão definido, onde com o aumento da umidade do solo e precipitação ocorre uma redução da temperatura.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo dessa tese foi propor uma nova parametrização de raízes finas em função da biomassa de raízes finas, profundidade do solo e condições ambientais. Visando melhorar as limitações da parametrização de raízes finas proposta por Jackson et al. (1997). A influência desses perfis de raízes nas simulações dos processos que ocorrem no solo-superfície-atmosfera foram discutidas. Em geral, a habilidade da nova parametrização em obter diferentes perfis de raízes em função das condições ambientais de cada região e sua máxima fração de raízes finas (FRF) concentradas em camadas mais profundas do solo, mostraram uma possível melhora nas simulações dos processos de superfície influenciados pelas raízes finas.

Após a implementação da nova parametrização de raízes finas no modelo IBIS (*offline*), e sucessão de rodadas de modo a testar a sensibilidade do modelo para diferentes tipos de PFTs e regiões geográficas. Os resultados mostraram que uma maior quantidade de água é absorvida pelas raízes das plantas e, à vista disso, na estação seca é possível reduzir o estresse hídrico do solo, e como efeito, um ganho significativo nas simulações dos fluxos de superfície.

O modelo BAM integrado com a nova parametrização de raízes finas (BAM-3D-M21) apresentou um bom desempenho em simular os principais padrões atmosféricos sobre a América do Sul. Durante todo o período, o modelo BAM-3D-M21 reduziu as superestimativas e as subestimativas apresentadas pelo BAM-3D-J97, principalmente durante o inverno (JJA). O efeito do modelo BAM-3D-M21 nas simulações dos processos de superfície e padrões atmosféricos foi evidenciado com base em anos de eventos de El Niño e La Niña durante o verão, os resultados apresentaram diferença significativas nas simulações em ambos os casos, o que indica que a nova parametrização de raízes finas é sensível a períodos secos e chuvosos.

Portanto, as questões elaboradas no Capítulo 1 podem ser respondidas, resumidamente:

- a) **Quais os efeitos diretos e indiretos de variáveis climáticas e parâmetros da vegetação na dinâmica de raízes finas?** As condições ambientais e parâmetros da vegetação afetam diretamente a produção de biomassa de raízes finas, os resultados das seções 5.2.2 e 5.2.3 mostraram que a umidade do solo (US) é o principal fator de alteração da BRF, a temperatura da superfície (TEMP) também é importante para o aumento ou redução da BRF, assim como, a precipitação (PREC) e a Produtividade

Primária Líquida (NPP) que apresentaram correlações significativas com a BRF. Os efeitos indiretos impacta a biomassa de raízes finas através das estratégias de sobrevivência das plantas. Além disso, os efeitos indiretos podem amplificar ou neutralizar os efeitos diretos na dinâmica de raízes finas. Por exemplo, sugere-se que a umidade solo é o principal fator de alteração da BRF. À medida que vários fatores interagem (TEMP, PREC, NPP, etc) e sucede alguma mudança que pode alterar a umidade do solo, afetará o comportamento da BRF indiretamente através da umidade do solo.

- b) **Como e até que ponto uma boa representação da distribuição de raízes finas contribui para um melhor entendimento da umidade do solo?** No modelo IBIS, o cálculo da umidade do solo (US) depende da absorção de água pelas raízes, então as novas distribuições de raízes finas para cada PFTs foram essenciais para entender o comportamento da umidade do solo. No tópico 6.2.1 foi mostrado que perfis verticais mais realistas de raízes finas afetaram diretamente as simulações de umidade do solo, uma maior fração de raízes finas em camadas mais profundas do solo significou uma maior absorção de umidade do solo nessas camadas. Portanto, uma representação mais realista do perfil de raízes do solo permitiu identificar quando e onde há maior consumo de água pelas plantas, as camadas de solo onde a água está mais disponível e apontar os efeitos nos padrões atmosféricos devido o conteúdo de água no solo (Capítulo 7).
- c) **Como a variabilidade das trocas de energia entre superfície-atmosfera, induzida pela dinâmica de enraizamento, pode influenciar os fenômenos meteorológicos, principalmente os sistemas convectivos?** A nova parametrização de raízes finas foi desenvolvida para se adaptar as condições ambientais. Desta maneira, qualquer alteração na distribuição de raízes finas afeta o teor de água no solo disponível para o processo de transpiração das plantas (parte dessa água é liberada para o ar através do processo de transpiração das plantas). Em função dos fluxos de superfície atuarem no transporte e distribuição de calor e umidade entre solo-vegetação-atmosfera, os resultados do Capítulo 7 mostraram que a dinâmica de raízes finas pode realizar uma forte influência nas simulações dos sistemas convectivos. Devido a uma descrição mais realista da distribuição de raízes finas, foi apresentado um ganho nas simulações do impacto do estresse de umidade do solo e do conteúdo de água armazenado

nas camadas inferiores (utilizada para a transpiração das plantas). Consequentemente, contribuiu para uma melhora nas simulações dos fluxos de energia em superfície e padrões atmosféricos associados às atividades convectivas.

Como linhas de pesquisa para trabalhos futuros, sugerem-se:

- a) Um ajuste nas distribuições de raízes finas para os Tipos Funcionais de Plantas (PFTs) de solos rasos;
- b) Analisar o comportamento das raízes finas sob diferentes tipos de solo;
- c) Avaliar as novas distribuições de raízes finas e suas relações com a evapotranspiração para diferentes biomas;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, R.; SAPIANO, M.; HUFFMAN, G.; BOLVIN, D.; GU, G.; WANG, J.; NELKIN, E.; XIE, P.; CHIU, L.; FERRARO, R.; SHIN, D. **The new version 2.3 of the Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly analysis product**. [S.l.: s.n.], 2016. 1072–1084 p. 17

AMIRI, R.; WENG, Q.; ALIMOHAMMADI, A.; ALAVIPANAH, S. K. Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 12, p. 2606–2617, 2009. 43

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T.; VIEGAS, J.; OLIVEIRA, S. S. de; SOUZA, R. A. F. de; GARCIA, S. R.; REGO, W. H. T.; OLIVEIRA, M. B. L. de. Effects of two different La Niña types on the south american rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 3, p. 1415–1428, 2019. 10

ANGELINI, L. P.; SILVA, P. C. B. S.; FAUSTO, M. A.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Balanço de energia nas condições de mudanças de uso do solo na região sul do estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 353–363, 2017. 67

BAKER, J. C.; CASTILHO, D. S.; KUBOTA, P. Y.; BUERMANN, W.; COELHO, C. A.; ANDREWS, M. B.; GLOOR, M.; GARCIA-CARRERAS, L.; FIGUEROA, S. N.; SPRACKLEN, D. V. An assessment of land-atmosphere interactions over south america using satellites, reanalysis, and two global climate models. **Journal of Hydrometeorology**, v. 22, n. 4, p. 905–922, 2021. 77

BIUDES, M. S.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; NOGUEIRA, J. d. S.; SANCHES, L. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 2, p. 56–64, 2009. 66

BOONE, A.; HABETS, F.; NOILHAN, J.; CLARK, D.; DIRMEYER, P.; FOX, S.; GUSEV, Y.; HADDELAND, I.; KOSTER, R.; LOHMANN, D.; MAHANAMA, S.; MITCHELL, K.; NASONOVA, O.; NIU, G.-Y.; PITMAN, A.; POLCHER, J.; SHMAKIN, A. B.; TANAKA, K.; HURK, B. van den; VÉRANT, S.; VERSEGHY, D.; VITERBO, P.; YANG, Z.-L. The rhône-aggregation land surface scheme intercomparison project: an overview. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p.

187–208, 2004. Disponível em:

<[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0187:TRLSSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0187:TRLSSI>2.0.CO;2)>. 2

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, 2009. 78

BRÖNNIMANN, S. Weather extremes in an ensemble of historical reanalyses. In: **Historical Weather Extremes in Reanalyses**. Geographica Bernensia, 2017. p. 7–22. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4480/GB2017.G92.01>>. 17

BRUNKE, M. A.; BROXTON, P.; PELLETIER, J.; GOCHIS, D.; HAZENBERG, P.; LAWRENCE, D. M.; LEUNG, L. R.; NIU, G.-Y.; TROCH, P. A.; ZENG, X. Implementing and evaluating variable soil thickness in the community land model, version 4.5 (clm4. 5). **Journal of Climate**, v. 29, n. 9, p. 3441–3461, 2016. 16

CAI, W.; MCPHADEN, M. J.; GRIMM, A. M.; RODRIGUES, R. R.; TASCHETTO, A. S.; GARREAUD, R. D.; DEWITTE, B.; POVEDA, G.; HAM, Y.-G.; SANTOSO, A.; BENJAMIN, N.; ANDERSON, W.; WANG, G.; GENG, T.; JO, H.; MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; OSMAN, M.; LI, S.; WU, L.; KARAMPERIDOU, C.; TAKAHASHI, K.; VERA, C. Climate impacts of the El Niño–southern oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 215–231, 2020. 10, 129

CAI, W. et al. Changing el niño–southern oscillation in a warming climate. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 2, n. 9, p. 628–644, 2021. 9

CANADELL, J.; JACKSON, R. B.; EHLERINGER, J. B.; MOONEY, H. A.; SALA, O. E.; SCHULZE, E.-D. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. **Oecologia**, v. 108, n. 4, p. 583–595, Dec 1996. ISSN 1432-1939. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00329030>>. 2, 50, 51

CANDIDO, L. A. **Impacto da condição inicial de água no solo na previsão de verão da América do Sul**. 224 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2002. 12

CAO, R.; JIA, X.; HUANG, L.-M.; ZHU, Y.; WU, L.; SHAO, M. Deep soil water storage varies with vegetation type and rainfall amount in the Loess Plateau of China. **Scientific Reports**, v. 8, 08 2018. 21, 50

CAVALCANTI, I. F.; SILVEIRA, V. P.; FIGUEROA, S. N.; KUBOTA, P. Y.; BONATTI, J. P.; SOUZA, D. C. de. Climate variability over South

America-regional and large scale features simulated by the Brazilian Atmospheric Model (BAM-v0). **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 5, p. 2845–2869, 2020. [77](#)

CAVALCANTI, I. F. d. A.; RAIÁ, A. Lifecycle of South American monsoon system simulated by CPTEC/INPE AGCM. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 878–896, 2017. [77](#)

CHAN, S. C.; KENDON, E. J.; FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S.; FERRO, C. A.; STEPHENSON, D. B. Does increasing the spatial resolution of a regional climate model improve the simulated daily precipitation? **Climate Dynamics**, v. 41, n. 5, p. 1475–1495, 2013. [95](#)

CHEN, M.; SHI, W.; XIE, P.; SILVA, V. B.; KOUSKY, V. E.; HIGGINS, R. W.; JANOWIAK, J. E. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 113, n. D4, 2008. [15](#)

CHEN, X.; DING, Q.; BŁASZKIEWICZ, Z.; SUN, J.; SUN, Q.; HE, R.; LI, Y. Phenotyping for the dynamics of field wheat root system architecture. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–11, 2017. [1](#)

CHENG, Y.; ZHAN, H.; YANG, W.; JIANG, Q.; WANG, Y.; GUO, F. An ecohydrological perspective of reconstructed vegetation in the semi-arid region in drought seasons. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106488, 2021. [131](#)

CHOU, M.; SUAREZ, M. **A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies**. [S.l.]: NASA Tech. Memo, 1999. [81](#)

CHOU, S. C.; DERECZYNSKI, C.; GOMES, J. L.; PESQUERO, J. F.; AVILA, A.; RESENDE, N. C.; ALVES, L. F.; RUIZ-CARDENAS, R.; SOUZA, C. R. D.; BUSTAMANTE, J. F. F. Ten-year seasonal climate reforecasts over South America using the Eta regional climate model. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, 2020. [91](#)

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 05, p. 438, 2014a. [91](#)

CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.-P.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J.-P.; LAMBAIS, G. R.; MAIRE, G. L. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, v. 31, n. 2, p. 509–519, 2017. 49, 61

CHRISTOFFERSEN, B. O.; RESTREPO-COUBE, N.; ARAIN, M. A.; BAKER, I. T.; CESTARO, B. P.; CIAIS, P.; FISHER, J. B.; GALBRAITH, D.; GUAN, X.; GULDEN, L.; HURK, B.; ICHII, K.; IMBUZEIRO, H.; JAIN, A.; LEVINE, N.; MIGUEZ-MACHO, G.; POULTER, B.; ROBERTI, D.; SAKAGUCHI, K.; SAHOO, A.; SCHAEFER, K.; SHI, M.; VERBEECK, H.; YANG, Z.-L.; ARAUJO, A.; KRUIJT, B.; MANZI, A.; ROCHA, H.; RANDOW, C.; MUZA, M.; BORAK, J.; COSTA, M.; GONÇALVES, G.; ZENG, X.; SALESKA, S. Mechanisms of water supply and vegetation demand govern the seasonality and magnitude of evapotranspiration in Amazonia and Cerrado. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 191, p. 33–50, 2014. 61

COELHO, C. A.; SOUZA, D. C. de; KUBOTA, P. Y.; COSTA, S.; MENEZES, L.; GUIMARÃES, B. S.; FIGUEROA, S. N.; BONATTI, J. P.; CAVALCANTI, I. F.; SAMPAIO, G. et al. Evaluation of climate simulations produced with the brazilian global atmospheric model version 1.2. **Climate Dynamics**, v. 56, n. 3, p. 873–898, 2021. 81

COELHO, C. A.; SOUZA, D. C. de; KUBOTA, P. Y.; CAVALCANTI, I. F.; BAKER, J. C.; FIGUEROA, S. N.; FIRPO, M. A.; GUIMARÃES, B. S.; COSTA, S. M.; GONÇALVES, L. J.; BONATTI, J. P.; SAMPAIO, G.; KLINGAMAN, N. P.; CHEVUTURI, A.; ANDREWS, M. B. Assessing the representation of South American monsoon features in Brazil and UK climate model simulations. **Climate Resilience and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. e27, 2022. 77

CUI, Z.; WU, G.-L.; HUANG, Z.; LIU, Y. Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils. **Journal of Hydrology**, v. 578, p. 124023, 2019. 48, 50

CUNHA, J.; NÓBREGA, R. L.; RUFINO, I.; ERASMI, S.; GALVÃO, C.; VALENTE, F. Surface albedo as a proxy for land-cover clearing in seasonally dry forests: evidence from the brazilian caatinga. **Remote Sensing of Environment**, v. 238, p. 111250, 2020. 67

DECHARME, B.; DELIRE, C.; MINVIELLE, M.; COLIN, J.; VERGNES, J.-P.; ALIAS, A.; SAINT-MARTIN, D.; SÉFÉRIAN, R.; SÉNÉSI, S.; VOLDOIRE, A. Recent changes in the ISBA-CTRIP land surface system for use in the

CNRM-CM6 climate model and in global off-line hydrological applications. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 5, p. 1207–1252, 2019. 2

DIAS, C. G. **Validação de previsões climáticas sazonais sobre o Brasil: Modelos globais e regionall**. 104 p. Dissertação de mestrado — Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, 2017. 79

DIRO, G.; SUSHAMA, L.; SCINOCCA, J.; JIAO, Y. Impact of soil moisture on the dominant modes of North American temperature variability. **Climate Dynamics**, v. 56, n. 5, p. 1359–1370, 2021. 2

DOMINGUES, I. L. P. **Representação dos efeitos de heterogeneidades da superfície sobre o clima local em uma região de paisagem fragmentada na Amazônia utilizando o modelo ETA/NOAH-MP**. 208 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015. 129

DORMAN, J.; SELLERS, P. J. A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the Simple Biosphere Model (SiB). **Journal of Applied Meteorology**, v. 28, n. 9, p. 833–855, 1989. 19

DU, E.; FANG, J. Linking belowground and aboveground phenology in two boreal forests in northeast China. **Oecologia**, v. 176, n. 3, p. 883–892, 2014. 63

DUARTE, L. G.; ROMERA, K. S.; SABINO, M.; CURADO, L. F. A.; PALÁCIOS, R. da S.; NOGUEIRA, J. de S. Dynamics of heat fluxes by Bowen and matmnxflx and noah fldas products in the Pantanal of Mato Grosso. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 46, n. 3, p. 07–19, 2019. 69

DUNBABIN, V. M.; POSTMA, J. A.; SCHNEPF, A.; PAGÈS, L.; JAVAUX, M.; WU, L.; LEITNER, D.; CHEN, Y. L.; RENGEL, Z.; DIGGLE, A. J. Modelling root–soil interactions using three–dimensional models of root growth, architecture and function. **Plant and Soil**, v. 372, n. 1, p. 93–124, Nov 2013. ISSN 1573-5036. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11104-013-1769-y>>. 2

FAN, J.; MCCONKEY, B.; WANG, H.; JANZEN, H. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. **Field Crops Research**, v. 189, p. 68 – 74, 2016. ISSN 0378-4290. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429016300399>>. 8

FARQUHAR, G. D.; CAEMMERER, S. v. von; BERRY, J. A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. **Planta**, v. 149, n. 1, p. 78–90, 1980. 19

FERNANDES, E. F. de L.; ANUNCIÇÃO, V. S. da. Impactos hidrometeoricos no alfa do Pantanal sul-mato-grossense/Brasil. **Territorium**, n. 25, p. 23–38, 2018. 67

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115–146, 2009. 42

FIGUEROA, S. N.; BONATTI, J. P.; KUBOTA, P. Y.; GRELL, G. A.; MORRISON, H.; BARROS, S. R.; FERNANDEZ, J. P.; RAMIREZ, E.; SIQUEIRA, L.; LUZIA, G. et al. The brazilian global atmospheric model (bam): performance for tropical rainfall forecasting and sensitivity to convective scheme and horizontal resolution. **Weather and Forecasting**, v. 31, n. 5, p. 1547–1572, 2016. 77

FIGUEROA, S. N.; SATYAMURTY, P.; DIAS, P. L. D. S. Simulations of the summer circulation over the south american region with an eta coordinate model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 10, p. 1573–1584, 1995. 77, 78

FINÉR, L.; OHASHI, M.; NOGUCHI, K.; HIRANO, Y. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 11, p. 2008–2023, 2011. ISSN 0378-1127. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112711005342>>. 33

FLORES-ROJAS, J. L.; CUXART, J.; PIÑAS-LAURA, M.; CALLAÑAUPA, S.; SUÁREZ-SALAS, L.; KUMAR, S.; MOYA-ALVAREZ, A. S.; SILVA, Y. Seasonal and diurnal cycles of surface boundary layer and energy balance in the central Andes of Peru, Mantaro valley. **Atmosphere**, v. 10, n. 12, p. 779, 2019. 130

FOLEY, J.; KUCHARIK, C.; POLZIN, D. **Integrated Biosphere Simulator Model (IBIS), Version 2.5**. 2005. Disponível em: <http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=808>. 19, 20

FOLEY, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, n. 4, p. 603–628, 1996. 19, 20

FREITAS, I. G. F. d.; GOMES, H. B.; MARIANO, G. L.; SILVA, M. C. L. d.; LYRA, M. J. A.; NOVA, T. S. V.; SILVA, F. D. d. S.; RIBEIRO, L. E.; OLIVEIRA, C. P. d. Downscaling dinâmico através do modelo regcm para diferentes inicializações utilizando dados do cfsv2. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 813–821, 2020. [79](#), [85](#)

FRENCH, N. H.; WHITLEY, M. A.; JENKINS, L. K. Fire disturbance effects on land surface albedo in Alaskan tundra. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 121, n. 3, p. 841–854, 2016. [66](#)

FREY, C.; RIGO, G.; PARLOW, E. Urban radiation balance of two coastal cities in a hot and dry environment. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 12, p. 2695–2712, 2007. [67](#)

FU, X.; XU, C.; GENG, Q.; MA, X.; ZHANG, H.; CAI, B.; HU, G.; XU, X. Effects of nitrogen application on the decomposition of fine roots in temperate forests: a meta-analysis. **Plant and Soil**, v. 472, n. 1, p. 77–89, 2022. [24](#)

GALE, M. R.; GRIGAL, D. F. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 17, n. 8, p. 829–834, 1987. [7](#), [8](#)

GARRIGUES, S.; OLIOSO, A.; CARRER, D.; DECHARME, B.; CALVET, J.-C.; MARTIN, E.; MOULIN, S.; MARLOIE, O. Impact of climate, vegetation, soil and crop management variables on multi-year ISBA-A-gs simulations of evapotranspiration over a mediterranean crop site. **Geoscientific Model Development**, v. 8, 10 2015. [2](#)

GARUMA, G. F. Review of urban surface parameterizations for numerical climate models. **Urban Climate**, v. 24, p. 830–851, 2018. [2](#)

GERMON, A.; LACLAU, J.-P.; ROBIN, A.; JOURDAN, C. Tamm review: deep fine roots in forest ecosystems: why dig deeper? **Forest Ecology and Management**, v. 466, p. 118135, 2020. [46](#), [61](#), [65](#)

GREEN, J. K.; SENEVIRATNE, S. I.; BERG, A. M.; FINDELL, K. L.; HAGEMANN, S.; LAWRENCE, D. M.; GENTINE, P. Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake. **Nature**, v. 565, n. 7740, p. 476–479, 2019. [2](#)

- GRELL, G. A.; DÉVÉNYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 14, p. 38–1, 2002. 81
- GUIMARÃES, B. S.; COELHO, C. A.; WOOLNOUGH, S. J.; KUBOTA, P. Y.; BASTARZ, C. F.; FIGUEROA, S. N.; BONATTI, J. P.; SOUZA, D. C. de. Configuration and hindcast quality assessment of a brazilian global sub-seasonal prediction system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 728, p. 1067–1084, 2020. 77, 81
- GUO, F.-X.; WANG, Y.-P.; HOU, T.-T.; ZHANG, L.-S.; MU, Y.; WU, F.-y. Variation of soil moisture and fine roots distribution adopts rainwater collection, infiltration promoting and soil anti-seepage system (RCIP-SA) in hilly apple orchard on the Loess Plateau of China. **Agricultural Water Management**, v. 244, p. 106573, 2021. 24
- GöBEL, L.; CONERS, H.; HERTEL, D.; WILLINGHÖFER, S.; LEUSCHNER, C. The role of low soil temperature for photosynthesis and stomatal conductance of three graminoids from different elevations. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 2019. ISSN 1664-462X. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2019.00330>. 49
- HAFNER, B.; TOMASELLA, M.; HÄBERLE, K.; GOEBEL, M.; MATYSSEK, R.; GRAMS, T. Hydraulic redistribution under moderate drought among English oak, European beech and Norway spruce determined by deuterium isotope labeling in a split-root experiment. **Tree Physiology**, v. 37, n. 7, p. 950–990, 07 2017. 35
- HAFNER, B. D.; TOMASELLA, M.; HÄBERLE, K.-H.; GOEBEL, M.; MATYSSEK, R.; GRAMS, T. E. Hydraulic redistribution under moderate drought among english oak, european beech and norway spruce determined by deuterium isotope labeling in a split-root experiment. **Tree Physiology**, v. 37, n. 7, p. 950–960, 2017. 64
- 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, 2011. 81
- HARTMANN, P.; WILPERT, K. von. Fine-root distributions of central european forest soils and their interaction with site and soil properties. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 44, n. 1, p. 71–81, 2014. 1, 8

- HOFFMANN, R. **Análise de regressão: uma introdução à econometria**. [S.l.: s.n.], 2016. 30, 40
- HOLTSLAG, A.; BOVILLE, B. Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model. **Journal of Climate**, v. 6, n. 10, p. 1825–1842, 1993. 21
- HUANG, J.; DOOL, H. M. van den; GEORGARAKOS, K. P. Analysis of model-calculated soil moisture over the united states (1931–1993) and applications to long-range temperature forecasts. **Journal of Climate**, v. 9, n. 6, p. 1350–1362, 1996. 15
- HUI, D.; YU, C.-L.; DENG, Q.; DZANTOR, E. K.; ZHOU, S.; DENNIS, S.; SAUVE, R.; JOHNSON, T. L.; FAY, P. A.; SHEN, W.; LUO, Y. Effects of precipitation changes on switchgrass photosynthesis, growth, and biomass: a mesocosm experiment. **PloS One**, v. 13, n. 2, p. e0192555, 2018. 67
- HUSAIN, S. Z.; BÉLAIR, S.; LEROYER, S. Influence of soil moisture on urban microclimate and surface-layer meteorology in Oklahoma city. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, n. 1, p. 83–98, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0156.1>>. 11
- 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: Atmospheres**, v. 113, n. D13, 2008. 81
- ISHOLA, K. A.; MILLS, G.; FEALY, R. M.; CHONCUBHAIR, Ó. N.; FEALY, R. Improving a land surface scheme for estimating sensible and latent heat fluxes above grasslands with contrasting soil moisture zones. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 294, p. 108151, 2020. 129
- IVERSEN, C. M. Using root form to improve our understanding of root function. **New Phytologist**, v. 203, n. 3, p. 707–709, 2014. Disponível em: <<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/nph.12902>>. 7
- IVERSEN, C. M.; MCCORMACK, M. L.; POWELL, A. S.; BLACKWOOD, C. B.; FRESCHET, G. T.; KATTGE, J.; ROUMET, C.; STOVER, D. B.; SOUDZILOVSKAIA, N. A.; VALVERDE-BARRANTES, O. J.; BODEGOM, P. M.; VIOLLE, C. A global fine-root ecology database to address below-ground challenges in plant ecology. **New Phytologist**, v. 215, n. 1, p. 15–26, 2017. Disponível em:

<<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/nph.14486>>. 8, 23

JACKSON, R. B.; CANADELL, J.; EHLERINGER, J.; MOONEY, H.; SALA, O. E.; SCHULZE, E. D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. **Oecologia**, v. 108, p. 389–411, 11 1996. 1, 7

JACKSON, R. B.; MOONEY, H. A.; SCHULZE, E.-D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 94, n. 14, p. 7362–7366, 1997. ISSN 0027-8424. Disponível em: <<http://www.pnas.org/content/94/14/7362>>. xi, xv, xxiv, 1, 5, 7, 21, 23, 33, 45, 47, 49, 50, 51, 57, 80, 85, 103, 128, 135

JOLLIFFE, I. T. **Principal component analysis for special types of data**. [S.l.: s.n.], 2002. 27

KIM, D.-H.; KIM, J.-H.; PARK, J.-H.; EWANE, E. B.; LEE, D.-H. Correlation between above-ground and below-ground biomass of 13-year-old pinus densiflora s. et z. planted in a post-fire area in samcheok. **Forest Science and Technology**, v. 12, n. 3, p. 115–124, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/21580103.2015.1107627>>. 49

KNIST, S.; GOERGEN, K.; BUONOMO, E.; CHRISTENSEN, O. B.; COLETTE, A.; CARDOSO, R. M.; FEALY, R.; FERNÁNDEZ, J.; GARCÍA-DÍEZ, M.; JACOB, D. et al. Land-atmosphere coupling in EURO-CORDEX evaluation experiments. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 1, p. 79–103, 2017. 129

KONÉ, B.; DIEDHIOU, A.; DIAWARA, A.; ANQUETIN, S.; BAMBA, A.; KOBEA, A. T. Influence of initial soil moisture in a regional climate model study over west Africa–part 1: Impact on the climate mean. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 26, n. 3, p. 711–730, 2022. 129

KOSTER, R. D.; MAHANAMA, S. P. P.; YAMADA, T. J.; BALSAMO, G.; BERG, A. A.; BOISSERIE, M.; DIRMEYER, P. A.; DOBLAS-REYES, F. J.; DREWITT, G.; GORDON, C. T.; GUO, Z.; JEONG, J.-H.; LAWRENCE, D. M.; LEE, W.-S.; LI, Z.; LUO, L.; MALYSHEV, S.; MERRYFIELD, W. J.; SENEVIRATNE, S. I.; STANELLE, T.; HURK, B. J. J. M. van den; VITART, F.; WOOD, E. F. Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment. **Geophysical Research**

Letters, v. 37, n. 2, 2010. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009GL041677>>. 12

KOSTER, R. D.; SCHUBERT, S. D.; DEANGELIS, A. M.; MOLOD, A. M.; MAHANAMA, S. P. Using a simple water balance framework to quantify the impact of soil moisture initialization on subseasonal evapotranspiration and air temperature forecasts. **Journal of Hydrometeorology**, v. 21, n. 8, p. 1705–1722, 2020. 130

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. [S.l.: s.n.], 1995. 48

KUBOTA, P. Y. **Variabilidade de energia armazenada na superfície e seu impacto na definição do padrão de precipitação na América do Sul**. 285 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012. 21, 60, 78, 81

KUCHARIK, C. J.; FOLEY, J. A.; DELIRE, C.; FISHER, V. A.; COE, M. T.; LENTERS, J. D.; YOUNG-MOLLING, C.; RAMANKUTTY, N.; NORMAN, J. M.; GOWER, S. T. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, n. 3, p. 795–825, 2000. 19, 20, 42, 53, 54

KUO, H.-L. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 22, n. 1, p. 40–63, 1965. 79

LAWSTON-PARKER, P.; JR, J. A. S.; KUMAR, S. V. Understanding the impacts of land surface and pbl observations on the terrestrial and atmospheric legs of land–atmosphere coupling. **Journal of Hydrometeorology**, v. 22, n. 9, p. 2241–2258, 2021. 89

LEMES, M. d. C. R.; OLIVEIRA, G.; FISCH, G. Analysis of moisture transport from amazonia to southeastern brazil during the austral summer. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 06, p. 2650–2670, 2020. 131

LEUNG, L. R.; HUANG, M.; QIAN, Y.; LIANG, X. Climate–soil–vegetation control on groundwater table dynamics and its feedbacks in a climate model. **Climate Dynamics**, v. 36, n. 1, p. 57–81, Jan 2011. ISSN 1432-0894. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00382-010-0746-x>>. 12

- LEUNING, R. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for c3 plants. **Plant, Cell & Environment**, v. 18, n. 4, p. 339–355, 1995. 20
- LEUSCHNER, C.; BACKES, K.; HERTEL, D.; SCHIPKA, F.; SCHMITT, U.; TERBORG, O.; RUNGE, M. Drought responses at leaf, stem and fine root levels of competitive fagus sylvatica l. and quercus petraea (matt.) Liebl. trees in dry and wet years. **Forest Ecology and Management**, v. 149, n. 1, p. 33–46, 2001. ISSN 0378-1127. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112700005430>>. 48
- LI, H.; SI, B.; MA, X.; WU, P. Deep soil water extraction by apple sequesters organic carbon via root biomass rather than altering soil organic carbon content. **Science of the Total Environment**, v. 670, p. 662–671, 2019. 48
- LIMA, I. T. **O início da estação chuvosa na América do Sul e processos atmosféricos e de superfície associados**. 177 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2021. 77
- LIMA, M. V.; NUNES, A. B. Comportamento climático do balanço do vento térmico na América do Sul de acordo com os eventos ENOS: estudo preliminar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 03, p. 728–744, 2018. 10
- LIN, J.; QIAN, T. A new picture of the global impacts of El Nino-southern oscillation. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–7, 2019. 9
- LIN, T.-S.; CHENG, F.-Y. Impact of soil moisture initialization and soil texture on simulated land–atmosphere interaction in Taiwan. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, n. 5, p. 1337–1355, 2016. 131
- LINDEN, E. C. V. D.; HAARSMA, R. J.; SCHRIER, G. V. D. Impact of climate model resolution on soil moisture projections in central-western Europe. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 1, p. 191–206, 2019. 2
- LIU, L.; GAN, Y.; BUECKERT, R.; REES, K. V. Rooting systems of oilseed and pulse crops. ii: vertical distribution patterns across the soil profile. **Field Crops Research**, v. 122, n. 3, p. 248 – 255, 2011. ISSN 0378-4290. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429011001146>>. 2
- LIU, Y.; LIU, S.; WAN, S.; WANG, J.; WANG, H.; LIU, K. Effects of experimental throughfall reduction and soil warming on fine root biomass and its decomposition

- in a warm temperate oak forest. **Science of The Total Environment**, v. 574, p. 1448–1455, 2017. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716318113>>. 48
- LLOPART, M.; ROCHA, R. P. da; REBOITA, M.; CUADRA, S. Sensitivity of simulated South America climate to the land surface schemes in RegCM4. **Climate Dynamics**, v. 49, n. 11, p. 3975–3987, 2017. 86, 88
- LU, H.; YUAN, W.; CHEN, X. A processes-based dynamic root growth model integrated into the ecosystem model. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 12, p. 4614–4628, 2019. 49
- LÜTTSCHWAGER, D.; JOCHHEIM, H. Drought primarily reduces canopy transpiration of exposed beech trees and decreases the share of water uptake from deeper soil layers. **Forests**, v. 11, n. 5, p. 537, 2020. 23
- MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S.; ANGELINI, L. P.; MÜTZENBERG, D. M. d. S.; NASSARDEN, D. C. S.; BILIO, R. d. S.; SILVA, T. J. A. d.; NEVES, G. A. R.; ARRUDA, P. H. Z. d.; NOGUEIRA, J. d. S. Sazonalidade do balanço de energia e evapotranspiração em área arbustiva alagável no pantanal mato-grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 82–91, 2016. 67
- MACLEOD, D.; CLOKE, H.; PAPPENBERGER, F.; WEISHEIMER, A. Evaluating uncertainty in estimates of soil moisture memory with a reverse ensemble approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 7, p. 2737–2743, 2016. Disponível em: <<https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/20/2737/2016/>>. 13
- MAKOSSO-KALLYTH, S.; DIDAY, E. Adaptation of interval pca to symbolic histogram variables. **Advances in Data Analysis and Classification**, v. 6, n. 2, p. 147–159, 2012. 27
- MALAWI, M. J. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, v. 24, n. 3, p. 69–71, 2012. 30
- MATAMALA, R.; STOVER, D. B. Introduction to a virtual special issue: modeling the hidden half – the root of our problem. **New Phytologist**, v. 200, n. 4, p. 939–942, 2013. Disponível em: <<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/nph.12583>>. 7
- MCFARLANE, N. A. The effect of orographically excited gravity wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere. **Journal of the**

Atmospheric Sciences, v. 44, n. 14, p. 1775–1800, 1987. Disponível em:
<[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1987\)044<1775:TE00EG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<1775:TE00EG>2.0.CO;2)>.

78

MCMURTRIE, R. E.; DEWAR, R. C. New insights into carbon allocation by trees from the hypothesis that annual wood production is maximized. **New Phytologist**, v. 199, n. 4, p. 981–990, 2013. 49

MEDEIROS, R. M. de; FRANÇA, M. V. de; SABOYA, L. M. F.; NETO, F. C. R.; HOLANDA, R. M. de; ARAÚJO, W. R. de. Influência do El niño e La niña na precipitação em São Bento do Una-Pernambuco, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 12, p. e29791211074–e29791211074, 2020. 11

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics**, v. 20, n. 4, p. 851–875, 1982. 78

MENG, L.; QUIRING, S. M. Examining the influence of spring soil moisture anomalies on summer precipitation in the u.s. great plains using the community atmosphere model version 3. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D21, 2010. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2010JD014449>>. 12

MONTAGNOLI, A.; DUMROESE, R. K.; TERZAGHI, M.; ONELLI, E.; SCIPPA, G. S.; CHIATANTE, D. Seasonality of fine root dynamics and activity of root and shoot vascular cambium in a quercus ilex l. forest (italy). **Forest Ecology and Management**, v. 431, p. 26–34, 2019. ISSN 0378-1127. Roots and Rhizospheres in Forest Ecosystems. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112718301324>>. 49

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BONETTI, J. d. A.; LEVIEN, R.; SCHNEPF, A.; LEITNER, D. Mechanical and hydric stress effects on maize root system development at different soil compaction levels. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 2019. ISSN 1664-462X. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2019.01358>>. 48

MORRISON, H.; CURRY, J.; KHVOROSTYANOV, V. 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, 2005. 81

MOURA, M. M.; SANTOS, A. R. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; ALEXANDRE, R. S.; SILVA, S. F. da; PIMENTEL, S. M.; ANDRADE, M. S. S. de; SILVA, F. G. R.; BRANCO, E. R. F.; MOREIRA, T. R.; SILVA, R. G.; CARVALHO, J. R. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 1639–1651, 2019. 10

MOURA, R. G. d.; CORREIA, F. W. S.; VEIGA, J. A. P.; CAPISTRANO, V. B.; KUBOTA, P. Y. Avaliação do brazilian global atmospheric model na simulação dos componentes do balanço de água na bacia amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 23–37, 2020. 89

MOURÃO, C. E. F. **A influência das áreas alagáveis no balanço hídrico da Bacia do Prata e implicações na agricultura em cenários futuros de mudanças climáticas**. 116 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015. 91

MURARA, P.; ACQUAOTTA, F.; GARZENA, D.; FRATIANNI, S. Daily precipitation extremes and their variations in the Itajaí River Basin, Brazil. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 131, n. 4, p. 1145–1156, 2019. 131

MYHRE, G.; SAMSET, B. H.; HODNEBROG, Ø.; ANDREWS, T.; BOUCHER, O.; FALUVEGI, G.; FLÄSCHNER, D.; FORSTER, P.; KASOAR, M.; KHARIN, V.; KIRKEVÅG, A.; LAMARQUE, J. F.; OLIVIER, D.; RICHARDSON, T. B.; SHAWKI, D.; SHINDELL, D.; SHINE, K. P.; STJERN, C. W.; TAKEMURA, T.; VOULGARAKIS, A. Sensible heat has significantly affected the global hydrological cycle over the historical period. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2018. 64

NEUMANN, M.; GODBOLD, D. L.; HIRANO, Y.; FINÉR, L. Improving models of fine root carbon stocks and fluxes in European forests. **Journal of Ecology**, v. 108, n. 2, p. 496–514, 2020. 9

NEVES, M. E. N. das; PINHEIRO, D. P.; ALMEIDA, A. C. Estudo sobre a disponibilidade de radiação solar na região de Castanhal, PA. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 8, n. 1, 2021. 89

NIETO, R.; DRUMOND, A.; GIMENO, L. The role of Amazon Basin on the atmospheric branch of the hydrological cycle. In: **AGU SPRING MEETING**. [S.l.]: American Geophysical Union. v. 2013. 130

NOBRE, P.; MALAGUTTI, M.; URBANO, D. F.; ALMEIDA, R. A. F. de; GIAROLLA, E. Amazon deforestation and climate change in a coupled model simulation. **Journal of Climate**, v. 22, n. 21, p. 5686–5697, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/2009JCLI2757.1>>. 78

NOBRE, P.; SIQUEIRA, L. S. P.; ALMEIDA, R. A. F. de; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; BOTTINO, M. J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S. N.; COSTA, M. C.; BAPTISTA, M.; IRBER, L.; MARCONDES, G. G. Climate simulation and change in the brazilian climate model. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6716–6732, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00580.1>>. 78

OGAWA, F.; SPENGLER, T. Prevailing surface wind direction during air–sea heat exchange. **Journal of Climate**, v. 32, n. 17, p. 5601–5617, 2019. 89

OORSCHOT, F. van; ENT, R. J. van der; HRACHOWITZ, M.; ALESSANDRI, A. Climate-controlled root zone parameters show potential to improve water flux simulations by land surface models. **Earth System Dynamics**, v. 12, n. 2, p. 725–743, 2021. 49

PAN, S.; PAN, N.; TIAN, H.; FRIEDLINGSTEIN, P.; SITCH, S.; SHI, H.; ARORA, V. K.; HAVERD, V.; JAIN, A. K.; KATO, E.; LIENERT, S.; LOMBARDOZZI, D.; NABEL, J. E. M. S.; OTTLÉ, C.; POULTER, B.; ZAEHLE, S.; RUNNING, S. W. Evaluation of global terrestrial evapotranspiration using state-of-the-art approaches in remote sensing, machine learning and land surface modeling. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 3, p. 1485–1509, 2020. Disponível em: <<https://hess.copernicus.org/articles/24/1485/2020/>>. 128

PAPASTEFANO, P.; ZANG, C. S.; PUGH, T. A.; LIU, D.; GRAMS, T. E.; HICKLER, T.; RAMMIG, A. A dynamic model for strategies and dynamics of plant water-potential regulation under drought conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 373, 2020. 128

PARTON, W. J.; SCURLOCK, J. M. O.; OJIMA, D. S.; GILMANOV, T. G.; SCHOLLES, R. J.; SCHIMMEL, D. S.; KIRCHNER, T.; MENAUT, J.-C.; SEASTEDT, T.; MOYA, E. G.; KAMNALRUT, A.; KINYAMARIO, J. I. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 7, n. 4, p. 785–809, 1993. Disponível em:

<<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/93GB02042>>. 21

PASTORELLO, G. et al. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 1–27, 2020. 16, 55

PAVÃO, V. M.; QUERINO, C. A. S.; BENEDITTI, C. A.; PAVÃO, L. L.; QUERINO, J. K. A. da S.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. (nota de pesquisa) temperatura e albedo da superfície por imagens tm LANDSAT 5 em diferentes usos do solo no sudoeste da Amazônia brasileira. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, 2015. 66

PETERMAN, W.; BACHELET, D.; FERSCHWEILER, K.; SHEEHAN, T. Soil depth affects simulated carbon and water in the mc2 dynamic global vegetation model. **Ecological Modelling**, v. 294, p. 84–93, 2014. 16

PITMAN, A. J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 5, p. 479–510, 2003. Disponível em: <<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.893>>. 1

POLLARD, D.; THOMPSON, S. L. Use of a land-surface-transfer scheme (lsx) in a global climate model: the response to doubling stomatal resistance. **Global and Planetary Change**, v. 10, n. 1, p. 129 – 161, 1995. ISSN 0921-8181. Results from the Model Evaluation Consortium for Climate Assessment. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0921818194000237>>. 19

POORTER, H.; NIKLAS, K. J.; REICH, P. B.; OLEKSYN, J.; POOT, P.; MOMMER, L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, v. 193, n. 1, p. 30–50, 2012. Disponível em: <<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>>. 34

PRIETO, I.; ARMAS, C.; PUGNAIRE, F. I. Water release through plant roots: new insights into its consequences at the plant and ecosystem level. **New Phytologist**, v. 193, n. 4, p. 830–841, 2012. 48

PURDY, A. J.; FISHER, J. B.; GOULDEN, M. L.; COLLIANDER, A.; HALVERSON, G.; TU, K.; FAMIGLIETTI, J. S. Smap soil moisture improves

global evapotranspiration. **Remote Sensing of Environment**, v. 219, p. 1–14, 2018. 3

QUERINO, C. A. S.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; QUERINO, J. K. A. da S.; NETO, L. A. S.; SILVA, M. J. G. da; ARRUDA, P. H. Z. de; NOGUEIRA, J. de S. Balanço de ondas curtas sobre floresta sazonalmente alagável do Pantanal mato-grossense. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, 2017. 66

RADVILLÉ, L.; MCCORMACK, M. L.; POST, E.; EISSENSTAT, D. M. Root phenology in a changing climate. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 12, p. 3617–3628, 2016. 61

RAHMAN, M. M.; LU, M.; KYI, K. H. Variability of soil moisture memory for wet and dry basins. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 107 – 118, 2015. ISSN 0022-1694. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415000505>>. 12

RANGARAJAN, H.; POSTMA, J. A.; LYNCH, J. P. Co-optimization of axial root phenotypes for nitrogen and phosphorus acquisition in common bean. **Annals of Botany**, v. 122, n. 3, p. 485–499, 2018. 48

REBOITA, M. S.; CAMPOS, B.; SANTOS, T.; GAN, M. A.; CARVALHO, V. S. Análise sinótica e numérica de um VCAN no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 41–59, 2017. 96

REBOITA, M. S.; DIAS, C. G.; DUTRA, L. M. M.; ROCHA, R. P. d.; LLOPART, M. Previsão climática sazonal para o Brasil obtida através de modelos climáticos globais e regional. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 207–224, 2018. 79

REBOITA, M. S.; FERNANDEZ, J. P. R.; LLOPART, M. P.; ROCHA, R. P. da; PAMPUCH, L. A.; CRUZ, F. T. Assessment of RegCM4. 3 over the CORDEX South America domain: sensitivity analysis for physical parameterization schemes. **Climate Research**, v. 60, n. 3, p. 215–234, 2014. 88

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. d. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **TerrÆ Didática**, v. 8 (1), p. 34–50, 2012. 79

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; ARMANDO, R.; FREITAS, C.; MARTINS, D.; MILLER, G. Causas da semi-aridez do sertão nordestino (the causes of semi-aridity in the northeast “sertão”). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, 2016. 131

RESENDE, N. C. **Influência das condições do solo na previsão sazonal de extremos climáticos**. 192 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014. 12, 13

REYNOLDS, R. W.; RAYNER, N. A.; SMITH, T. M.; STOKES, D. C.; WANG, W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. **Journal of Climate**, v. 15, n. 13, p. 1609–1625, 2002. 17

REYNOLDS, R. W.; SMITH, T. M.; LIU, C.; CHELTON, D. B.; CASEY, K. S.; SCHLAX, M. G. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 20, n. 22, p. 5473–5496, 2007. 17

RICHARDS, J. H.; CALDWELL, M. M. Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by artemisia tridentata roots. **Oecologia**, v. 73, n. 4, p. 486–489, 1987. 64

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, v. 1, n. 5, p. 318–333, 1931. 42

RICHTER, I.; XIE, S.-P. On the origin of equatorial atlantic biases in coupled general circulation models. **Climate Dynamics**, v. 31, n. 5, p. 587–598, 2008. 85

ROCHA, V. M.; CORREIA, F. W. S.; SILVA, P. R. T. d.; GOMES, W. B.; VERGASTA, L. A.; MOURA, R. G. d.; TRINDADE, M. d. S. P.; PEDROSA, A. L.; SILVA, J. J. S. d. Reciclagem de precipitação na Bacia Amazônica: o papel do transporte de umidade e da evapotranspiração da superfície. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 387–398, 2017. 130

RODELL, M.; HOUSER, P.; JAMBOR, U.; GOTTSCHALCK, J.; MITCHELL, K.; MENG, C.-J.; ARSENAULT, K.; COSGROVE, B.; RADAKOVICH, J.; BOSILOVICH, M.; ENTIN, J. K.; WALKER, J. P.; LOHMANN, D. AND TOLL, D. The global land data assimilation system. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 85, n. 3, p. 381–394, 2004. 17

ROSS, S. M. **Introduction to probability and statistics for engineers and scientists**. [S.l.: s.n.], 2004. 26

ROUNDY, J. K.; FERGUSON, C. R.; WOOD, E. F. Temporal variability of land–atmosphere coupling and its implications for drought over the southeast United States. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, n. 2, p. 622–635, 2013. 13

SANTANELLO, J. A.; PETERS-LIDARD, C. D.; KUMAR, S. V. Diagnosing the sensitivity of local land–atmosphere coupling via the soil moisture–boundary layer interaction. **Journal of Hydrometeorology**, v. 12, n. 5, p. 766–786, 2011.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JHM-D-10-05014.1>>. 11

SANTOS, E. B.; FREITAS, E. D. de; RAFEE, S. A. A.; FUJITA, T.; RUDKE, A. P.; MARTINS, L. D.; SOUZA, R. A. F.; MARTINS, J. A. Spatio-temporal variability of wet and drought events in the Paraná river basin—Brazil and its association with the El Niño—southern oscillation phenomenon. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 10, p. 4879–4897, 2021. 11

SCHENK, H. J.; JACKSON, R. B. The global biogeography of roots. **Ecological Monographs**, v. 72, n. 3, p. 311–328, 2002. 8

_____. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. **Journal of Ecology**, p. 480–494, 2002. 1, 63

SCHRAPFFE, A.; POLCHER, J.; SÖRENSON, A.; FITA, L. Floodplains representation in Land Surface Model : toward higher resolution. In: **EGU GENERAL ASSEMBLY CONFERENCE**. [S.l.]: EGU General Assembly Conference Abstracts, 2021. p. EGU21–9735. 65

SCHWINGSHACKL, C.; HIRSCHI, M.; SENEVIRATNE, S. I. A theoretical approach to assess soil moisture–climate coupling across cmip5 and glace-cmip5 experiments. **Earth System Dynamics**, v. 9, n. 4, p. 1217–1234, 2018. 2

SCHWINNING, S.; EHLERINGER, J. R. Water use trade-offs and optimal adaptations to pulse-driven arid ecosystems. **Journal of Ecology**, v. 89, n. 3, p. 464–480, 2001. 63

SEE, C. R.; MCCORMACK, M. L.; HOBBIE, S. E.; FLORES-MORENO, H.; SILVER, W. L.; KENNEDY, P. G. Global patterns in fine root decomposition: climate, chemistry, mycorrhizal association and woodiness. **Ecology Letters**, v. 22, n. 6, p. 946–953, 2019. 24, 36

SELLERS, P.; MINTZ, Y.; SUD, Y. e. a.; DALCHER, A. A simple biosphere model (sib) for use within general circulation models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 43, n. 6, p. 505–531, 1986. 78

SELLERS, P.; RANDALL, D.; COLLATZ, G.; BERRY, J.; FIELD, C.; DAZLICH, D.; ZHANG, C.; COLLELO, G.; BOUNOUA, L. A revised land surface

parameterization (sib2) for atmospheric gcms. part i: Model formulation. **Journal of Climate**, v. 9, n. 4, p. 676–705, 1996. 78

SELLERS, P. J.; RANDALL, D. A.; COLLATZ, G. J.; BERRY, J. A.; FIELD, C. B.; DAZLICH, D. A.; ZHANG, C.; COLLELO, G. D.; BOUNOUA, L. A revised land surface parameterization (sib2) for atmospheric gcms. part i: Model formulation. **Journal of Climate**, v. 9, n. 4, p. 676–705, 1996. ISSN 08948755, 15200442. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/26201333>>. 78

SEO, E.; LEE, M.-I.; JEONG, J.-H.; KOSTER, R. D.; SCHUBERT, S. D.; KIM, H.-M.; KIM, D.; KANG, H.-S.; KIM, H.-K.; MACLACHLAN, C.; SCAIFE, A. A. Impact of soil moisture initialization on boreal summer subseasonal forecasts: mid-latitude surface air temperature and heat wave events. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 3, p. 1695–1709, 2019. 13, 130

SHANGGUAN, W.; HENGL, T.; JESUS, J. M. de; YUAN, H.; DAI, Y. Mapping the global depth to bedrock for land surface modeling. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 9, n. 1, p. 65–88, 2017. 16, 44

SHEN, J.; BATCHELOR, W. D.; JONES, J. W.; RITCHIE, J. T.; KANWAR, R. S.; MIZE, C. W. Incorporation of a subsurface tile drainage component into a soybean growth model. **Transactions of the ASAE**, v. 41, n. 5, p. 1305, 1998. 59

SILVA, C. M. S.; FREITAS, S. R. d. Impacto de um mecanismo de disparo da convecção na precipitação simulada com o modelo regional brams sobre a bacia amazônica durante a estação chuvosa de 1999. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, p. 145–157, 2015. 85

SILVA, G.; MACÊDO, M.; SILVA, R. Caracterização espaço-temporal das tipologias vegetais em ambiente de caatinga degradada: quantificação por meio de variáveis biofísicas. **Ateliê Geográfico**, v. 13, n. 2, p. 92–110, 2019. 67

SILVA, J. B. da; JUNIOR, L. C. G. V.; FARIA, T. O.; MARQUES, J. B.; DALMAGRO, H. J.; NOGUEIRA, J. S.; VOURLITIS, G. L.; RODRIGUES, T. R. Temporal variability in evapotranspiration and energy partitioning over a seasonally flooded scrub forest of the brazilian pantanal. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 308, p. 108559, 2021. 69

SILVA, J. B. da; LUIZ JUNIOR, C. G. V.; FARIA, T. O.; MARQUES, J. B.; DALMAGRO, H. J.; NOGUEIRA, J. S.; VOURLITIS, G. L.; RODRIGUES, T. R. Temporal variability in evapotranspiration and energy partitioning over a

seasonally flooded scrub forest of the brazilian Pantanal. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 308, p. 108559, 2021. 66

SIVANDRAN, G.; BRAS, R. L. Dynamic root distributions in ecohydrological modeling: a case study at walnut gulch experimental watershed. **Water Resources Research**, v. 49, n. 6, p. 3292–3305, 2013. 49, 103

SMITHWICK, E. A.; LUCASH, M. S.; MCCORMACK, M. L.; SIVANDRAN, G. Improving the representation of roots in terrestrial models. **Ecological Modelling**, v. 291, p. 193–204, 2014. 49

SOLMAN, S. A.; SANCHEZ, E.; SAMUELSSON, P.; ROCHA, R. P. da; LI, L.; MARENGO, J.; PESSACG, N. L.; REMEDIO, A.; CHOU, S.; BERBERY, H.; TREUT, H. L.; CASTRO, M.; JACOB, D. Evaluation of an ensemble of regional climate model simulations over South America driven by the ERA-Interim reanalysis: model performance and uncertainties. **Climate Dynamics**, v. 41, n. 5, p. 1139–1157, 2013. 88

SONG, Y.; WANG, Z.; QI, L.; HUANG, A. Soil moisture memory and its effect on the surface water and heat fluxes on seasonal and interannual time scales. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 124, n. 20, p. 10730–10741, 2019. 12

SOUZA, D.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S.; RAMIREZ-GUTIERREZ, E.; COELHO, C. Impacto da resolução horizontal na simulação dos jatos de baixos níveis na américa do sul usando o modelo global do CPTEC. In: **Estudos Interdisciplinares nas Ciências Exatas e da Terra e Engenharias 4**. [S.l.]: Atena Editora, 2019. p. 205–217. 77, 81

SPIEGEL, M. R.; STEPHENS, L. J. **Estatística: coleção Schaum**. [S.l.: s.n.], 2000. 59, 83

SU, X.; YAN, X.; TSAI, C.-L. Linear regression. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 4, n. 3, p. 275–294, 2012. 31

SÖRENSSON, A. A.; BERBERY, E. H. A note on soil moisture memory and interactions with surface climate for different vegetation types in the la plata basin. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 2, p. 716–729, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0102.1>>. 1, 11

TAQUES, L. d. M. **Caracterização da evapotranspiração no Pantanal Mato-Grossense fundamentada pela teoria dos sistemas complexos**. 58 p.

Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) — Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2018. 69

TIMMERMANN, A. et al. El Niño–southern oscillation complexity. **Nature**, v. 559, n. 7715, p. 535–545, 2018. 9

VALDIVIESO, M.; HAINES, K.; BALMASEDA, M.; CHANG, Y.-S.; DREVILLON, M.; FERRY, N.; FUJII, Y.; KÖHL, A.; STORTO, A.; TOYODA, T.; WANG, X.; WATERS, J.; XUE, Y.; YIN, Y.; BARNIER, B.; HERNANDEZ, F.; KUMAR, A.; LEE, T.; MASINA, S.; PETERSON, A. K. An assessment of air–sea heat fluxes from ocean and coupled reanalyses. **Climate Dynamics**, v. 49, n. 3, p. 983–1008, 2017. 96

VALLIS, G. K.; ZURITA-GOTOR, P.; CAIRNS, C.; KIDSTON, J. Response of the large-scale structure of the atmosphere to global warming. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 141, n. 690, p. 1479–1501, 2015. 96

VANDEBORGHT, J.; COUVREUR, V.; MEUNIER, F.; SCHNEPF, A.; VERECKEN, H.; BOUDA, M.; JAVAUX, M. From hydraulic root architecture models to macroscopic representations of root hydraulics in soil water flow and land surface models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 9, p. 4835–4860, 2021. 50

VERBERNE, E.; HASSINK, J.; WILLIGEN, P. D.; GROOT, J.; VEEN, J. V. Modelling organic matter dynamics in different soils. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v. 38, p. 221–238, 1990. 21

VOGEL, M. M.; ZSCHEISCHLER, J.; SENEVIRATNE, S. I. Varying soil moisture–atmosphere feedbacks explain divergent temperature extremes and precipitation projections in central europe. **Earth System Dynamics**, v. 9, n. 3, p. 1107–1125, 2018. 2

VOGT, K. A.; VOGT, D. J.; PALMIOTTO, P. A.; BOON, P.; ASBJORNSEN, J. O. eHeidi. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. **Plant Soil**, v. 187, p. 159–219, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00017088>>. 33

VRETTAS, M. D.; FUNG, I. Y. Toward a new parameterization of hydraulic conductivity in climate models: simulation of rapid groundwater fluctuations in northern California. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 7, n. 4, p. 2105–2135, 2015. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015MS000516>>. 1, 8

_____. Sensitivity of transpiration to subsurface properties: exploration with a 1-d model. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 9, n. 2, p. 1030–1045, 2017. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016MS000901>>. 1, 8

WAN, Z.; HOOK, S.; HULLEY, G. **OD11C3 MODIS/Terra land surface temperature/emissivity monthly L3 global 0.05Deg CMG V006 [Data set]**. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11C3.006>. 15

WANG, C.; CHEN, Z.; BRUNNER, I.; ZHANG, Z.; ZHU, X.; LI, J.; YIN, H.; GUO, W.; ZHAO, T.; ZHENG, X.; WANG, S.; GENG, Z.; SHEN, S.; JIN, D.; LI, M. Global patterns of dead fine root stocks in forest ecosystems. **Journal of Biogeography**, v. 45, n. 6, p. 1378–1394, 2018. 33

WANG, C.; CHEN, Z.; YIN, H.; GUO, W.; CAO, Y.; WANG, G.; SUN, B.; YAN, X.; LI, J.; ZHAO, T.-H.; BRUNNER, I.; DAI, G.; ZHENG, Y.; ZHENG, Y.; ZU, W.; LI, M.-H. The responses of forest fine root biomass/necromass ratio to environmental factors depend on mycorrhizal type and latitudinal region. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 123, n. 5, p. 1769–1788, 2018. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2017JG004308>>. 35

WANG, P.; HEIJMANS, M. M. P. D.; MOMMER, L.; RUIJVEN, J. van; MAXIMOV, T. C.; BERENDSE, F. Belowground plant biomass allocation in tundra ecosystems and its relationship with temperature. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 5, p. 055003, may 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/055003>>. 34, 50

WANG, P.; HUANG, K.; HU, S. Distinct fine-root responses to precipitation changes in herbaceous and woody plants: a meta-analysis. **New Phytologist**, v. 225, n. 4, p. 1491–1499, 2020. 48

WANG, P.; JAGER, J. de; NAUTA, A.; HUISSTEDEN, J. van; TROFIM, M. C.; LIMPENS, J. Exploring near-surface ground ice distribution in patterned-ground tundra: correlations with topography, soil and vegetation. **Plant Soil**, v. 444, p. 251–265, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11104-019-04276-7>>. 34

WANG, Y.; XIE, Z.; JIA, B. Incorporation of a dynamic root distribution into CLM4.5: evaluation of carbon and water fluxes over the Amazon. **Advances in**

- Atmospheric Sciences**, v. 33, n. 9, p. 1047–1060, Sep 2016. ISSN 1861-9533.
Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00376-016-5226-8>>. 1, 2, 8, 71
- WARREN, J. M.; HANSON, P. J.; IVERSEN, C. M.; KUMAR, J.; WALKER, A. P.; WULLSCHLEGER, S. D. Root structural and functional dynamics in terrestrial biosphere models—evaluation and recommendations. **The New Phytologist**, v. 205 1, p. 59–78, 2015. 1, 2
- WEIBULL, W. Wide applicability. **Journal of Applied Mechanics**, v. 103, n. 730, p. 293–297, 1951. xv, 31, 32, 44
- WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. [S.l.: s.n.], 2011. 83
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985. 59
- WU, L.; BREIVIK, Ø.; RUTGERSSON, A. Ocean-wave-atmosphere interaction processes in a fully coupled modeling system. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 11, p. 3852–3874, 2019. 89
- XIANG, T.; VIVONI, E. R.; GOCHIS, D. J. Influence of initial soil moisture and vegetation conditions on monsoon precipitation events in northwest México. **Atmósfera**, v. 31, n. 1, p. 25–45, 2018. 130
- XU, S.; JI, X.; JIN, B.; ZHANG, J. Root distribution of three dominant desert shrubs and their water uptake dynamics. **Journal of Plant Ecology**, v. 10, n. 5, p. 780–790, 08 2016. ISSN 1752-9921. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jpe/rtw079>>. 35
- XU, Y.; CUI, G. Influence of spectral characteristics of the Earth's surface radiation on the greenhouse effect: principles and mechanisms. **Atmospheric Environment**, v. 244, p. 117908, 2021. 89
- XUE, Y.; SELLERS, P.; KINTER, J.; SHUKLA, J. A simplified biosphere model for global climate studies. **Journal of Climate**, v. 4, n. 3, p. 345–364, 1991. 78
- YANG, B.; QIAN, Y.; BERG, L. K.; MA, P.-L.; WHARTON, S.; BULAEVSKAYA, V.; YAN, H.; HOU, Z.; SHAW, W. J. Sensitivity of turbine-height wind speeds to parameters in planetary boundary-layer and

surface-layer schemes in the weather research and forecasting model.

Boundary-Layer Meteorology, v. 162, n. 1, p. 117–142, 2017. 93

YANG, Y.; TURNER, R.; CAREY-SMITH, T.; UDDSTROM, M. A comparison of three model output statistics approaches for the bias correction of simulated soil moisture. **Meteorological Applications**, v. 27, n. 6, p. e1970, 2020. 103

YANG, Y.; UDDSTROM, M.; DUNCAN, M. Effects of short spin-up periods on soil moisture simulation and the causes over New Zealand. **Journal of**

Geophysical Research: Atmospheres, v. 116, n. D24, 2011. Disponível em:

<[https:](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011JD016121)

[//agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011JD016121](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011JD016121)>. 12

YI, L.; QUANJIU, W.; WENYAN, W. et al. Mathematical simulation of soil water movement under infiltration, redistribution and evaporation. **Journal of**

Irrigation and Drainage, v. 26, n. 1, p. 5–8, 2007. 42

YU, K.; D'ODORICO, P. Climate, vegetation, and soil controls on hydraulic redistribution in shallow tree roots. **Advances in Water Resources**, v. 66, p.

70–80, 2014. 65

YUAN, Z.; CHEN, H. Y. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate,

fertility, and stand age: literature review and meta-analyses. **Critical Reviews in**

Plant Sciences, v. 29, n. 4, p. 204–221, 2010. 36

ZAITCHIK, B. F.; SANTANELLO, J.; KUMAR, S.; PETERS-LIDARD, C.

Representation of soil moisture feedbacks during drought in nasa unified wrf

(nu-wrf). **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, p. 360–367, 02 2013. 11

ZAMPIERI, M.; SERPETZOGLOU, E.; ANAGNOSTOU, E.; NIKOLOPOULOS, E.;

PAPADOPOULOS, A. Improving the representation of river–groundwater

interactions in land surface modeling at the regional scale: observational evidence

and parameterization applied in the community land model. **Journal of**

Hydrology, v. 420-421, p. 72 – 86, 2012. ISSN 0022-1694. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411008262>>. 12

ZENG, X. Global vegetation root distribution for land modeling. **Journal of**

Hydrometeorology, v. 2, n. 5, p. 525–530, 2001. Disponível em:

<[https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2001\)002<0525:GVRDFL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2001)002<0525:GVRDFL>2.0.CO;2)>. 1,

7

ZHANG, H.; LIU, J.; LI, H.; MENG, X.; ABLIKIM, A. The impacts of soil moisture initialization on the forecasts of weather research and forecasting model: a case study in xinjiang, china. **Water**, v. 12, n. 7, p. 1892, 2020. [13](#), [130](#), [132](#)

ZHENG, Z.; WANG, G. Modeling the dynamic root water uptake and its hydrological impact at the reserva jaru site in amazonia. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 112, n. G4, 2007. [21](#)

ZHONGMING, Z. et al. **Another La Niña impacts temperatures and precipitation—but not climate change**. [S.l.: s.n.], 2021. [9](#)

ZHOU, S.; WILLIAMS, A. P.; BERG, A. M.; COOK, B. I.; ZHANG, Y.; HAGEMANN, S.; LORENZ, R.; SENEVIRATNE, S. I.; GENTINE, P. Land–atmosphere feedbacks exacerbate concurrent soil drought and atmospheric aridity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 38, p. 18848–18853, 2019. [2](#)

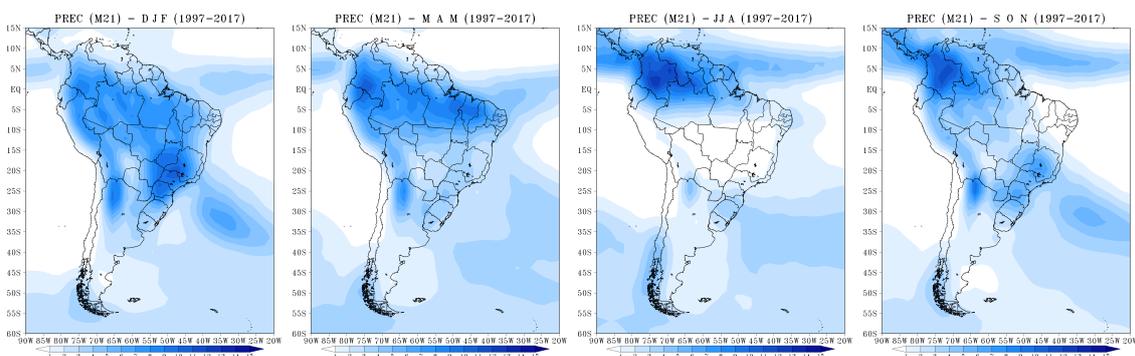
ZHOU, S.; WILLIAMS, A. P.; LINTNER, B. R.; BERG, A. M.; ZHANG, Y.; KEENAN, T. F.; COOK, B. I.; HAGEMANN, S.; SENEVIRATNE, S. I.; GENTINE, P. Soil moisture–atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 1, p. 38–44, 2021. [2](#)

ZHOU, X.; GEERTS, B. The influence of soil moisture on the planetary boundary layer and on cumulus convection over an isolated mountain. part i: observations. **Monthly Weather Review**, v. 141, n. 3, p. 1061–1078, 2013. [132](#)

ZHOU, X.; RAY, P.; BARRETT, B. S.; HSU, P.-C. Understanding the bias in surface latent and sensible heat fluxes in contemporary agcms over tropical oceans. **Climate Dynamics**, v. 55, n. 11, p. 2957–2978, 2020. [95](#)

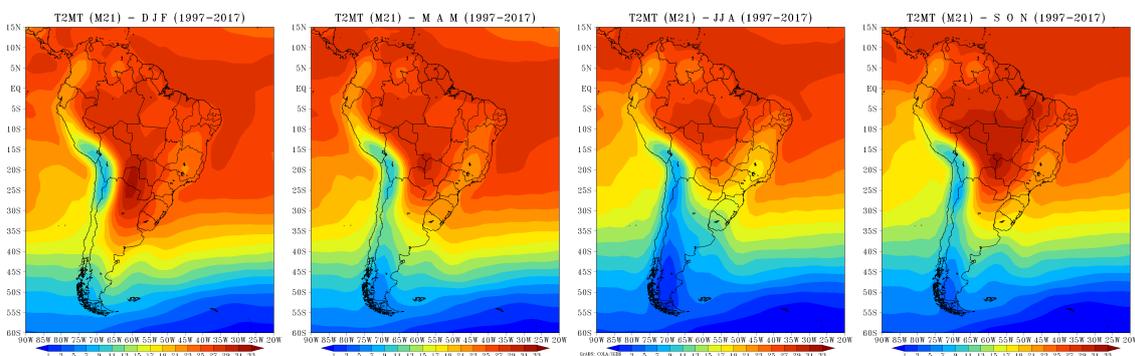
APÊNDICE A - CAMPOS MÉDIOS SAZONAIS SIMULADOS COM O MODELO BAM-3D-M21

Figura A.1 - Precipitação média sazonal (mmdia^{-1}) simulada com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017.



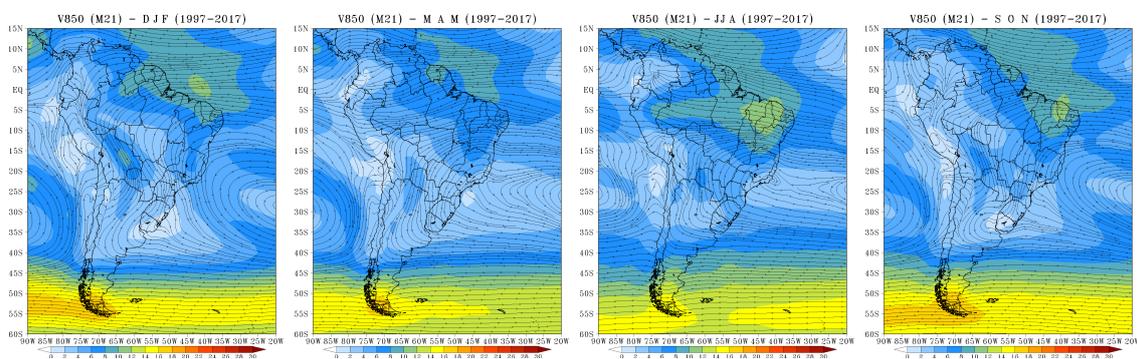
FONTE: Elaboração da autora.

Figura A.2 - Temperatura a 2 metros da superfície média sazonal ($^{\circ}\text{C}$) simulada com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017.



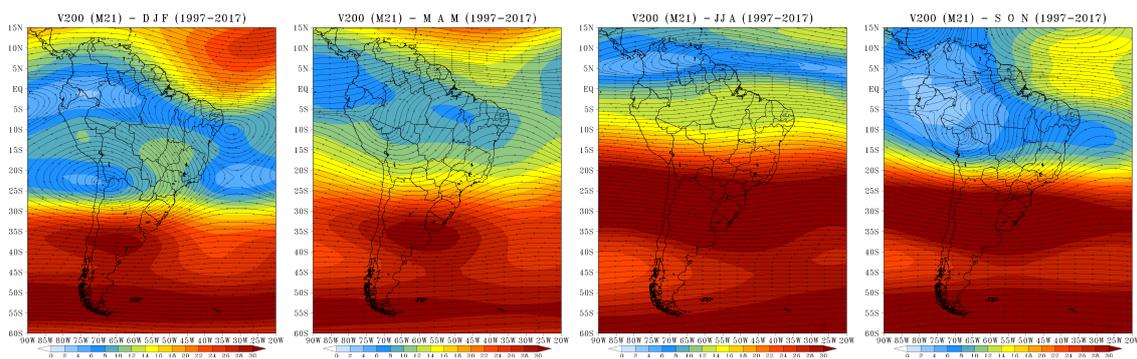
FONTE: Elaboração da autora.

Figura A.3 - Escoamento do vento em 850 hPa médio sazonal (ms^{-1}) simulado com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017.



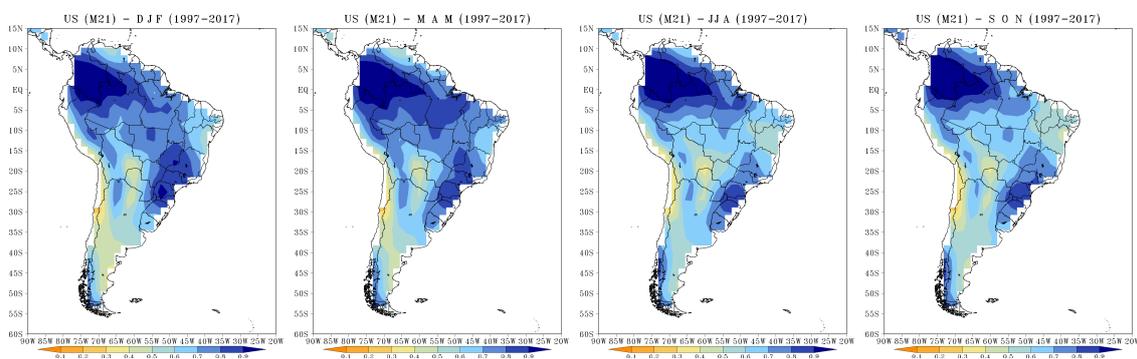
FONTE: Elaboração da autora.

Figura A.4 - Escoamento do vento em 200 hPa médio sazonal (ms^{-1}) simulado com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017.



FONTE: Elaboração da autora.

Figura A.5 - Umidade do solo média sazonal simulada com o modelo BAM-3D-M21 para o período de 1997-2017.



FONTE: Elaboração da autora.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.