

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



TESE DE DOUTORADO

Yasmany Guanche Palenzuela

**ESTUDO DE MECANISMOS DINÂMICOS RESPONSÁVEIS PELA OCORRÊNCIA DE
CHUVAS EXTREMAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO SÃO FRANCISCO**

Campina Grande, março de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS
ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



YASMANY GUANCHE PALENZUELA

**ESTUDO DE MECANISMOS DINÂMICOS RESPONSÁVEIS PELA OCORRÊNCIA
DE CHUVAS EXTREMAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO SÃO
FRANCISCO**

Campina Grande - PB

Março de 2022

Yasmany Guanche Palenzuela

**Estudo de mecanismos dinâmicos responsáveis pela ocorrência de chuvas
extremas na Bacia Hidrográfica do Alto São Francisco**

Trabalho de Tese (Doutorado) apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Doutor em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Subárea: Sinótica-Dinâmica da Atmosfera Tropical

Orientador: Profa. Dra. Magaly de Fatima Correia

Campina Grande – PB

Março de 2022

P156e

Palenzuela, Yasmany Guanche.

Estudo de mecanismos dinâmicos responsáveis pela ocorrência de chuvas extremas na Bacia Hidrográfica do Alto São Francisco / Yasmany Guanche Palenzuela. – Campina Grande, 2023.

126 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. Magaly de Fatima Correia".

Referências.

1. Meteorologia de Meso e Grande Escalas. 2. Análise Sinótica. 3. Chuvas Intensas. 4. WRF. 5. Sinótica-Dinâmica da Atmosfera Tropical. I. Correia, Magaly de Fatima. II. Título.

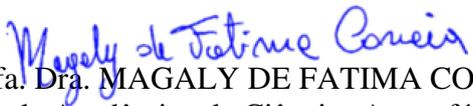
CDU 551.515.6(043)

YASMANY GUANCHE PALENZUELA

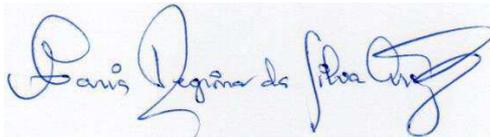
ESTUDO DE MECANISMOS DINÂMICOS RESPONSÁVEIS PELA
OCORRÊNCIA DE CHUVAS EXTREMAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
ALTO SÃO FRANCISCO

TESE APROVADA EM 14/03/2022

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. LINCOLN ELOI DE ARAÚJO
Centro de Ciências Aplicadas e Educação
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Dr. WENDELL RONDINELLI GOMES FARIAS
Universidade Federal de Santa Catarina

À minha mãe, que sempre será meu exemplo de dedicação e conquistas.

Agradecimentos

A minha mãe, por me trazer a esse mundo apaixonante da Meteorologia e ser minha guia espiritual em cada momento da vida.

A minha orientadora Profa. Magaly, pela paciência e dedicação durante todos esses anos de pesquisa. Sem sua ajuda nada disso seria possível, se tornando mais do que uma simples orientadora, também como uma mãe, repassando conhecimento, experiência e muita sabedoria com todos seus orientandos.

A Daniel Antônio, meu filho, que é meu maior tesouro. Desde sua chegada tudo mudou na minha vida. Obrigado por existir!!!

A Dayana, minha esposa, que sempre está comigo em todo momento.

A meu pai e irmão, que a toda hora me ajudaram, desde a distância, com muita saudade, são aquele motor impulsor que toda pessoa precisa para seguir a frente com seus objetivos.

A todos os professores membros da banca, que de uma forma crítica foram partícipes do caminho seguido a partir do Exame de Qualificação até a defesa desse trabalho de Tese.

À secretaria do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, principalmente a Arilene de Almeida Lucena, pelo apoio em todo momento, desde o início da minha caminhada nessa maravilhosa instituição, até o final, ela sempre foi partícipe de uma forma inigualável.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, principalmente todos os professores do núcleo, pela ajuda que brindam de forma incondicional a todos os estudantes do programa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos fornecida.

Resumo

No período de 13 a 20 de dezembro de 2011 um episódio de ZCAS sobre a região sudeste do Brasil ocasionou vários registros de chuvas intensas e persistentes na bacia hidrográfica do Alto São Francisco, com acumulados bem elevados em várias estações meteorológicas. O objetivo fundamental deste trabalho foi detectar os mecanismos, tanto dinâmicos como termodinâmicos, responsáveis pelas precipitações, mediante o uso do modelo numérico WRF. As condições sinóticas predominantes no período do evento foram analisadas através de dados de reanálise da ERA5, entretanto, dados fornecidos pelo modelo GFS foram usados para inicializar o WRF e avaliar a sensibilidade deste para três parametrizações de microfísica de nuvens. Com o uso da técnica de relaxamento espectral foi possível apresentar as estruturas das circulações em grande escala com a melhor precisão possível, sem prejudicar aspectos das escalas menores. A presença de um cavado na região Sul-Sudeste em todos os níveis da troposfera, em conjunto com outros fatores dinâmicos e os efeitos do aquecimento da atmosfera pela liberação de calor latente e o alto conteúdo de umidade, propiciou o episódio de ZCAS. O evento foi o resultado da influência do acoplamento entre a escala convectiva e a grande escala. Os resultados mostram que um dos principais mecanismos responsáveis pela intensidade e manutenção das chuvas intensas no período analisado foi o CISK (Instabilidade Condicional de Segunda Ordem), devido a uma convecção profunda com forte liberação de calor latente, que junto a efeitos topográficos contribuiu para manutenção de circulações ciclônicas nos baixos níveis. A detecção de um Vórtice Ciclônico em Mesoescala (VCM) inserido na região de chuvas estratiformes da ZCAS, em conjunto com forte convergência do vento em níveis médios e baixos da atmosfera, além de transporte de umidade por um jato de baixos níveis também foram considerados como características relevantes para ocorrência das chuvas extremas registradas no período analisado.

Palavras-chave: análise sinótica; chuvas intensas; WRF

Abstract

In the period from December 13th to 20th, 2011, an episode of SACZ over the southeastern region of Brazil caused several records of intense and persistent rains in the Alto São Francisco watershed, with very high accumulations in several meteorological stations. The fundamental objective of this work was to detect the mechanisms, both dynamic and thermodynamic, responsible for precipitation, using the WRF numerical model. The synoptic conditions prevailing in the event period were analyzed using reanalysis data from ERA5, however data provided by the GFS model were used to initialize the model and evaluate the sensitivity of three cloud microphysics parameterizations. With the use of the spectral relaxation technique, it was possible to correct the simulated circulation on a large scale without harming the smaller scales, resulting in a better behavior of the model in the local scale simulations. The presence of a trough in the South-Southeast region at all levels of the troposphere, together with other dynamic factors and the effects of the warming of the atmosphere by the release of latent heat and the high moisture content, led to the SACZ episode. The event was the result of the coupling influence between the convective scale and the large scale. The main mechanism responsible for the occurrence of extreme rainfall was CISK (Conditional Instability of Second Order), due to a deep convection with strong release of latent heat, which together with topographical effects contributed to the maintenance of cyclonic circulations at low levels. Other mechanisms were identified, resulting in more accentuated instability conditions, such as the presence at some times of a small Mesoscale Cyclonic Vortex, embedded in the stratiform region of the SACZ, together with a strong convergence of the wind at medium and low levels. and the transport of moisture through the Low Level Jet.

Keywords: synoptic analysis, heavy rains, WRF

Lista de Figuras

Figura 1	Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco com as regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco	6
Figura 2	Geração de energia elétrica na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. (A) Hidrelétrica de Sobradinho (BA); (B) Hidrelétrica de Paulo Afonso IV (BA); (C) Usina Solar Fotovoltaica Flutuante no lago de Sobradinho (BA); (D) Parque eólico Pedra do Reino em Sobradinho (BA).....	11
Figura 3	Localização geográfica das estações meteorológicas e aeroportos utilizados.....	26
Figura 4	Domínios utilizados com espaçamentos de grade de 18 km e 6 km, respectivamente, centralizados sobre a região metropolitana de Belo Horizonte.....	30
Figura 5	Acumulados diários de precipitação (mm) registrados em estações meteorológicas do estado de Minas Gerais no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	37
Figura 6	Comparação entre os acumulados de precipitação (mm) registrados em estações meteorológicas do estado de Minas Gerais em dezembro de 2011 (azul) e média climatológica dos últimos 30 anos de cada estação para o mês de dezembro (vermelho).....	38
Figura 7	Imagens de satélite do GOES 13 no período de 15 a 20 de dezembro de 2011 às 00 UTC. (A) 15 de dezembro; (B) 16 de dezembro; (C) 17 de dezembro; (D) 18 de dezembro; (E) 19 de dezembro; (F) 20 de dezembro.....	39
Figura 8	(A) Altura geopotencial (m _g p) e velocidade vertical (Pa s^{-1}) em 500 hPa (apenas movimento ascendente – em cinza); (B) Altura geopotencial (m _g p) e velocidade do vento (m s^{-1}) em 250 hPa; (C) Espessura da camada 1000-500 hPa [isolinhas vermelhas] (m _g p) e PNMM [isolinhas pretas] (hPa) (D) Índice TT ($^{\circ}\text{C}$), durante o período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	40
Figura 9	(A) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e vento (m s^{-1}) a 2m sobre a superfície; (B) Índice K ($^{\circ}\text{C}$); (C) Divergência do vento (10^{-5} s^{-1}) e vento (m s^{-1}) em 850 hPa; (D) Divergência do vento (10^{-5} s^{-1}) e vento (m s^{-1}) em 250 hPa durante o período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	41

Figura 10	(A) Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 1000 hPa; (B) Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) integrado na camada 1000-300 hPa; (C) Advecção de temperatura (10^{-4} K s^{-1}) em 850 hPa; (D) Velocidade do vento (m s^{-1}) e vorticidade relativa (10^{-4} s^{-1}) em 925 hPa durante o período de 13 a 20 de dezembro de 2011....	42
Figura 11	Cartas sinóticas de superfície para o horário de 00 UTC do período de 13 a 20 de dezembro de 2011. (extraído de GPT/CPTEC/INPE)	44
Figura 12	Diagramas termodinâmicos Skew T-log p das sondagens do aeroporto internacional Tancredo Neves (Belo Horizonte) para o horário das 12 UTC dos dias (A) 15 de dezembro de 2011; (B) 16 de dezembro de 2011; (C) 17 de dezembro de 2011; (D) 18 de dezembro de 2011.....	45
Figura 13	Perfis verticais das temperaturas potencial, potencial equivalente e potencial equivalente de saturação no horário das 12UTC dos dias (A) 15 de dezembro de 2011; (B) 16 de dezembro de 2011; (C) 17 de dezembro de 2011; (D) 18 de dezembro de 2011.....	46
Figura 14	Acumulados diários de precipitação (mm) registrados pelas estações meteorológicas da região e interpolado para todo o domínio durante o período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	49
Figura 15	Acumulados diários de precipitação (mm) simulados para o domínio menor (6km) usando a parametrização de microfísica de nuvens Morrison <i>double-moment scheme</i> sem aplicação do método de relaxação newtoniana, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	50
Figura 16	Acumulados diários de precipitação (mm) simulados para o domínio menor (6km) usando a parametrização de microfísica de nuvens Thompson <i>aerosol-aware</i> sem aplicação do método de relaxação newtoniana, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	51
Figura 17	Acumulados diários de precipitação (mm) simulados para o domínio menor (6km) usando a parametrização de microfísica de nuvens <i>ETA-Ferrier</i> sem aplicação do método de relaxação newtoniana, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	52
Figura 18	Acumulados diários de precipitação (mm) simulados para o domínio menor (6km) usando a parametrização de microfísica de nuvens Morrison <i>double-moment scheme</i> com aplicação do método de relaxação newtoniana, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	53
Figura 19	Acumulados diários de precipitação (mm) simulados para o domínio menor (6km) usando a parametrização de microfísica de nuvens Thompson <i>aerosol-aware</i> com aplicação do método de relaxação newtoniana, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011. ...	54

Figura 20	Acumulados diários de precipitação (mm) simulados para o domínio menor (6km) usando a parametrização de microfísica de nuvens <i>ETA-Ferrier</i> com aplicação do método de relaxação newtoniana, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	55
Figura 21	Acumulados nas últimas três horas de precipitação (mm) simulados para o domínio maior (18km) usando a parametrização de microfísica de nuvens <i>Morrison double-moment scheme</i> sem aplicação do método de relaxação newtoniana, nos horários de (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC; (G) 00 UTC; (H) 03 UTC dos dias 15 e 16 de dezembro de 2011.....	56
Figura 22	Acumulados nas últimas três horas de precipitação (mm) simulados para o domínio maior (18km) usando a parametrização de microfísica de nuvens <i>Thompson aerosol-aware</i> sem aplicação do método de relaxação newtoniana, nos horários de (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC; (G) 00 UTC; (H) 03 UTC dos dias 15 e 16 de dezembro de 2011.....	57
Figura 23	Acumulados nas últimas três horas de precipitação (mm) simulados para o domínio maior (18km) usando a parametrização de microfísica de nuvens <i>ETA-Ferrier</i> sem aplicação do método de relaxação newtoniana, nos horários de (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC; (G) 00 UTC; (H) 03 UTC dos dias 15 e 16 de dezembro de 2011.....	58
Figura 24	Acumulados nas últimas três horas de precipitação (mm) simulados para o domínio maior (18km) usando a parametrização de microfísica de nuvens <i>Morrison double-moment scheme</i> com aplicação do método de relaxação newtoniana, nos horários de (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC; (G) 00 UTC; (H) 03 UTC dos dias 15 e 16 de dezembro de 2011.....	59
Figura 25	Acumulados nas últimas três horas de precipitação (mm) simulados para o domínio maior (18km) usando a parametrização de microfísica de nuvens <i>Thompson aerosol-aware</i> com aplicação do método de relaxação newtoniana, nos horários de (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC; (G) 00 UTC; (H) 03 UTC dos dias 15 e 16 de dezembro de 2011.....	60
Figura 26	Acumulados nas últimas três horas de precipitação (mm) simulados para o domínio maior (18km) usando a parametrização de microfísica de nuvens <i>ETA-Ferrier</i> com aplicação do método de relaxação newtoniana, nos horários de (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC; (G) 00 UTC; (H) 03 UTC dos dias 15 e 16 de dezembro de 2011.....	61

Figura 27	Acumulados diários (mm) de cada uma das simulações, comparado com os observados pelas estações meteorológicas de Belo Horizonte, Ibirite e Florestal, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	64
Figura 28	Acumulados diários (mm) de cada uma das simulações, comparado com os observados pelas estações meteorológicas de Sete Lagoas, Divinópolis e Bom Despacho, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	65
Figura 29	Comportamento dos índices estatísticos de desempenho para cada uma das estações meteorológicas usando as diferentes parametrizações de microfísica de nuvens: (A) <i>Morrison double-moment scheme</i> ; (B) <i>Thompson aerosol-aware</i> ; (C) <i>ETA-Ferrier</i> , sem uso do método de relaxamento espectral, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	68
Figura 30	Comportamento dos índices estatísticos de desempenho para cada uma das estações meteorológicas usando as diferentes parametrizações de microfísica de nuvens: (A) <i>Morrison double-moment scheme</i> ; (B) <i>Thompson aerosol-aware</i> ; (C) <i>ETA-Ferrier</i> , com uso do método de relaxamento espectral, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.....	69
Figura 31	Imagens de satélite do GOES 13 para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC.....	72
Figura 32	Comportamento do vento (m/s) e vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica <i>Morrison double-moment</i> sem uso da técnica de spectral nudging.....	73
Figura 33	Comportamento do vento (m/s) e vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica <i>Thompson aerosol-aware</i> sem uso da técnica de spectral nudging.....	74
Figura 34	Comportamento do vento (m/s) e vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica <i>ETA-Ferrier</i> sem uso da técnica de spectral nudging.....	75
Figura 35	Comportamento do vento (m/s) e vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica <i>Morrison double-moment</i> com o uso da técnica de spectral nudging.....	76

Figura 36	Comportamento do vento (m/s) e vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica Thompson aerossol-aware com o uso da técnica de spectral nudging.....	77
Figura 37	Comportamento do vento (m/s) e vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica ETA-Ferrier com o uso da técnica de spectral nudging.....	78
Figura 38	Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica Morrison double-moment sem uso da técnica de spectral nudging.....	81
Figura 39	Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica Thompson aerossol-aware sem uso da técnica de spectral nudging.....	82
Figura 40	Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica ETA-Ferrier sem uso da técnica de spectral nudging.....	83
Figura 41	Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica Morrison double-moment com o uso da técnica de spectral nudging.....	84
Figura 42	Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica Thompson aerossol-aware com o uso da técnica de spectral nudging.....	85
Figura 43	Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica ETA-Ferrier com o uso da técnica de spectral nudging.....	86
Figura 44	Velocidade do vento (m s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica Morrison double-moment sem uso da técnica de spectral nudging.....	87

Figura 45	Velocidade do vento (m s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica <i>Thompson aerosol-aware</i> sem uso da técnica de <i>spectral nudging</i>	88
Figura 46	Velocidade do vento (m s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica <i>ETA-Ferrier</i> sem uso da técnica de <i>spectral nudging</i>	89
Figura 47	Velocidade do vento (m s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica <i>Morrison double-moment</i> com o uso da técnica de <i>spectral nudging</i>	90
Figura 48	Velocidade do vento (m s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica <i>Thompson aerosol-aware</i> com o uso da técnica de <i>spectral nudging</i>	91
Figura 49	Velocidade do vento (m s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica <i>ETA-Ferrier</i> com o uso da técnica de <i>spectral nudging</i>	92

Lista de tabelas

Tabela 1	Conjunto de experimentos para testar o comportamento de várias parametrizações de microfísica de nuvens	31
Tabela 2	Conjunto de parametrizações fixas usadas em cada experimento...	31
Tabela 3	Tabela de contingência 2x2.....	35

Lista de abreviaturas e siglas

AL	Alagoas
ARPS	<i>Advanced Regional Prediction System</i>
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
ASF	Alto São Francisco
BA	Bahía
BAM	Modelo Atmosférico Brasileiro
BH	Belo Horizonte
BHRSF	Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
BIAS	Viés
BSF	Baixo São Francisco
CAPE	Energia Potencial Convectiva Disponível
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CISL	<i>Computational and Information Systems Laboratory</i>
CISK	<i>Conditional Instability of the Second Kind</i>
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DSA	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENOS	El Niño Oscilação do Sul
ERA5	<i>ERA-Interim fifth generation</i>

ES	Espiritu Santo
ETS	<i>Equitable Threat Score</i>
FAR	Razão de Alarme Falso
GFS	<i>Global Forecast System</i>
GOES	<i>Global Online Enrollment System</i>
GPT	Grupo de Previsão do Tempo
hPa	hectopascal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JBN	Jato de Baixos Níveis
K	Índice K
KF	Kain Fritsch
Km	quilômetro
MG	Minas Gerais
m	Metros
mm	Milímetros
MM5	<i>Penn State Mesoscale Model</i>
MSF	Médio São Francisco
Mw	Megawatts
Mwp	Megawatts-pico
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i>
NCL	<i>NCAR Command Language</i>
NEB	Nordeste Brasileiro
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NW	Noroeste

PB	Paraíba
PE	Pernambuco
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
PNMM	Pressão a nível médio do mar
POD	Probabilidade de Detecção
q	Umidade específica
RAMS	<i>Regional Atmospheric Modeling System</i>
rh	Umidade relativa
RJ	Rio de Janeiro
RS	Rio Grande do Sul
SC	Santa Catarina
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SE	Sudeste
SF	Sistemas Frontais
SMSF	Submédio do São Francisco
SP	São Paulo
T	Temperatura
Td	Temperatura de ponto de orvalho
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
TT	Índice Total de Totais
u	Componente zonal do vento
UTC	Coordenada do Tempo Universal
v	Componente meridional do vento
VCAN	Vórtices Ciclónicos de Altos Níveis
w	Velocidade vertical
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
WSM3	WRF Single Moment 3-Class

WSM6	WRF Single Moment 6-Class
Z	Altura geopotencial
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência do Intertropical
°C	Graus Celsius
θ	Temperatura potencial
θ_e	Temperatura potencial equivalente
θ_{es}	Temperatura potencial equivalente de saturação
ζ	Vorticidade relativa

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Hipóteses	3
1.2	Objetivo geral	4
1.3	Objetivos específicos	4
2	Revisão de literatura	5
2.1	Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco	5
2.1.1	Importância da bacia hidrográfica.....	7
2.1.2	Uso das energias renováveis na BHRSF.....	9
2.1.3	Ações antrópicas prejudiciais para a bacia hidrográfica.....	13
2.1.4	Revitalização da bacia hidrográfica e segurança hídrica.....	14
2.2	Sistemas e fenômenos meteorológicos atuantes na região do Alto São Francisco.....	15
2.2.1	Zona de Convergência do Atlântico Sul.....	16
2.3	Modelos numéricos usados na simulação de eventos de chuvas intensas.....	18
2.4	Parametrizações de microfísica de nuvens.....	19
2.4.1	<i>ETA microphysics</i> (Ferrier).....	20
2.4.2	<i>Thompson aerosol-aware</i>	20
2.4.3	<i>Morrison double-moment scheme</i>	21
2.5	Simulação de eventos extremos usando o modelo WRF.....	21
2.6	Aplicação da Relaxação Newtoniana e sua importância.....	24
3	Metodologia	26
3.1	Dados utilizados	26

3.2	Análise sinótica	27
3.2.1	Variáveis fornecidas pelo modelo ERA5	27
3.2.2	Variáveis e parâmetros termodinâmicos calculados	28
3.3	Modelagem numérica	29
3.3.1	Modelo e dados	29
3.3.2	Domínios e parametrizações	30
3.4	Método de relaxação newtoniana	32
3.5	Índices Estatísticos de Desempenho	34
3.5.1	Razão de Alarme Falso (<i>False Alarm Ratio</i> – FAR)	35
3.5.2	Probabilidade de Detecção (<i>Probability of Detection</i> -POD)	35
3.5.3	VIÉS (BIAS)	36
3.5.4	<i>Equitable Threat Score</i> (ETS)	36
4	Resultados	37
4.1	Análise em Escala Sinótica e Local	37
4.2	Simulação numérica do evento	46
4.3	Desempenho do modelo	66
4.4	Mecanismos dinâmicos responsáveis pela ocorrência do evento	70
5	Conclusões	93
6	Referências bibliográficas	95
Anexo 1	113
Anexo 2	122

1 Introdução

Durante os últimos anos, desastres causados por fenômenos naturais aumentaram consideravelmente, sendo responsáveis por expressivos danos e perdas de caráter social, econômico e ambiental. Vários são os fatores que contribuem para a ocorrência deste tipo de tragédia, se destacando as precipitações como um dos mais importantes, principalmente as chuvas classificadas como intensas e persistentes (KOBAYAMA et al., 2006, ALVARENGA, 2012).

São consideradas como chuvas intensas as precipitações pluviais que podem acumular grande quantidade de água na superfície em um curto período de tempo, impedindo que os sistemas de drenagem naturais ou artificiais escoem toda a chuva (HARNACK et al., 1999; TEIXEIRA, 2009), enquanto as persistentes são as que perduram por períodos de tempo consideráveis, acarretando acumulados bem significativos, impedindo que o solo possa drenar toda a água precipitada (BRANDÃO, 2009; PRIETO, 2016; TEIXEIRA e PRIETO, 2020). As principais consequências desse tipo de evento extremo são as enchentes, inundações, enxurradas e alagamentos, as quais podem ainda ser agravadas por outros fenômenos como ventos fortes, granizos, entre outros (TEIXEIRA, 2004).

Devido à importância que representa para o planeta, atualmente se faz necessário aproveitar da melhor forma possível toda a precipitação que ocorre como consequência de sistemas meteorológicos, tanto de forma local como numa área maior. Nas bacias hidrográficas o regime hidrológico, ou também conhecido como produção de água é determinado por diversos fatores de natureza climática, tais como precipitação, evaporação, temperatura, umidade do ar e vento, assim como por fatores físicos, geológicos e topográficos (TUCCI, 2004).

Ao se tratar a questão hídrica no Brasil, torna-se imperativa a abordagem sobre a situação da bacia hidrográfica do rio São Francisco, devido a que, apesar da existência de uma grande quantidade de água acumulada em todos os reservatórios do país em termos quantitativos, ela não é uniformemente distribuída, sendo a região Nordeste e sua população os mais prejudicados (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2017). Nesse sentido, o “Velho Chico”, como é popularmente conhecido o rio São Francisco, apresenta um papel fundamental, porque o uso das suas águas é de enorme relevância, tanto na economia quanto na sociedade em toda a região.

Como as sub-bacias do Médio, Submédio e Baixo São Francisco encontram-se numa região árida de pouca precipitação, boa parte da situação hídrica de toda a bacia depende do comportamento hidrológico do Alto São Francisco e da vazão do reservatório de Três Marias (BARRETO et al., 2020). É por isso que um estudo da variabilidade espacial e temporal das precipitações nessa sub-bacia é muito importante para entender o comportamento e necessidade pluviométrica de cada região na qual está dividida a bacia (NOBREGA et al., 2021).

Durante o período de 13 a 20 de dezembro de 2011 ocorreram vários episódios de chuvas intensas e persistentes em grande parte do estado de Minas Gerais (MG), com acumulados bem elevados, trazendo consequências devastadoras para as principais cidades da região, mas hidrológicamente teve impactos positivos no volume dos reservatórios situados ao longo do Alto São Francisco, principalmente Três Marias. Estes eventos meteorológicos levaram à Defesa Civil Estadual a decretar o estado de emergência em 21 municípios, devido ao transbordamento de rios, rompimentos de barragens e alagamentos em várias cidades (G1, 2011). Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o mês de dezembro de 2011 resultou ser o mais chuvoso na história de MG, com recorde de precipitação para a capital mineira, Belo Horizonte (BH), que durante o período registrou um total de 720 mm de chuva (a marca anterior era de 601,3 mm em 2008) e ainda em 2022 não foi superado.

Devido à importância das precipitações na sub-bacia do Alto São Francisco, pelo que representa para o comportamento hídrico em toda a bacia, se faz necessário realizar uma análise mais detalhada sobre os sistemas meteorológicos que acontecem na região. Tentar compreender e simular da forma mais exata possível a interação de fenômenos meteorológicos de diferentes escalas é uma problemática atual na Meteorologia, já que é conhecido que sistemas de escala sinótica propiciam de

forma geral as condições básicas para a ocorrência de precipitações em uma determinada área, mas é a interação com situações específicas de escala local, além de outros fatores como o relevo e a vegetação, que trazem como consequência que os acumulados sejam diferentes em lugares próximos (FAGGIANI et al., 2020).

Devido a que a grande maioria dos eventos meteorológicos extremos são determinados por fluxos de grande escala, é essencial que um modelo numérico regional descreva adequadamente tal circulação. Para garantir isso, Waldron et al. (1996) propuseram uma técnica de *spectral nudging* que vem sendo muito utilizada nos últimos anos, devido às vantagens que apresenta. Baseia-se na ideia de que as variáveis atmosféricas em escala regional são condicionadas pela interação entre as condições atmosféricas globais e as características locais, como cadeias de montanhas e mares adjacentes (VON STORCH et al., 2000). O principal objetivo dela é corrigir a circulação simulada em larga escala sem prejudicar as escalas menores (GUO e ZHONG, 2017; DI LEONI et al., 2018). É por isso que se faz muito importante seu uso na simulação de eventos de chuvas intensas e persistentes numa determinada região.

1.1 Hipóteses

No presente trabalho parte-se de várias hipóteses para tentar entender o comportamento da escala local em um sistema meteorológico de maior escala, que gerou tantos acumulados de precipitação:

- Pela quantidade de dias com elevados acumulados de chuvas em todas as estações meteorológicas da região, parte-se da hipótese que foi produto da influência de uma Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que gerou toda essa situação sinótica;
- Espera-se que apesar de ser um sistema meteorológico praticamente estacionário, e como os acumulados das chuvas não foram uniformemente distribuídos em todas as localidades, a contribuição de mecanismos dinâmicos e termodinâmicos em menor escala seja fundamental;
- Considera-se que o principal mecanismo para a ocorrência do evento seja o CISK (Instabilidade Condicional de Segunda Ordem), em conjunto com outros fatores como pequenos mesovórtices formados nas áreas de

maiores precipitações, além da presença marcada de um Jato de Baixos Níveis transportando umidade suficiente para a região.

1.2 Objetivo geral

Detectar os mecanismos, tanto dinâmicos como termodinâmicos, responsáveis pelos episódios de chuvas intensas e persistentes, mediante o uso do modelo numérico Weather Research and Forecasting (WRF), escolhido por ser um dos de melhor desempenho para a simulação desse tipo de eventos a escala regional.

1.3 Objetivos específicos

- a) Analisar as condições sinóticas e identificar o(s) sistema(s) que possibilitaram a ocorrência do fenômeno na região do Alto São Francisco (ASF);
- b) Simular o evento mediante uso do WRF para determinar o desempenho do modelo com diferentes opções de microfísica de nuvens;
- c) Avaliar como o processo de relaxação newtoniana impacta os resultados com o modelo numérico WRF em uma aplicação para esse evento.
- d) Determinar estatisticamente o comportamento de cada simulação, comparado com os dados de chuva reportados pelas estações meteorológicas;
- e) Analisar a situação a escala local simulada pelo WRF para encontrar os mecanismos responsáveis com o surgimento e manutenção das chuvas intensas e persistentes.

2 Revisão de literatura

2.1 Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF) (Figura 1) é uma das doze regiões hidrográficas do Brasil, e possui grande importância para o país, pois além do enorme volume de água que transporta em toda a sua extensão, também tem um enorme potencial hídrico que é aproveitado de muitas maneiras. Possui uma área de 638.883 km², percorrendo um total de 2697 km em sete estados brasileiros, e atingindo mais de 521 municípios com uma rede de drenagem de 121.657 km. Na região da BHRSF, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE- (2017) a população aproximada é de 14 milhões de habitantes, o que equivale o 7% da população atual de todo o Brasil. A bacia é dividida em quatro sub-regiões, denominados regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco (CBHSF, 2022).

O Alto São Francisco estende-se desde as cabeceiras na Serra da Canastra, no município de São Roque de Minas, até a foz do rio das Velhas, abaixo da cidade de Pirapora, com aproximadamente 100076 km², ou 16% da área da bacia hidrográfica. A topografia é moderadamente acidentada, com vales e terrenos ondulados de altitudes entre 600 m e 1600 m, apresentando uma vegetação constituída de Cerrado e fragmentos de Mata Atlântica. O clima é tropical úmido e subtropical, com abundantes precipitações, principalmente no verão, e uma temperatura média de 23 °C.

O Médio São Francisco (MSF) compreende o trecho desde as imediações de Pirapora (MG) até a cidade de Remanso (BA), com aproximadamente 402531 km², ou 63% da área da bacia. A topografia, similar ao ASF, é moderadamente acidentada, com elevações entre 1000 m e 1500 m, apresentando uma vegetação dos tipos Cerrado e Caatinga, salvo algumas pequenas matas serranas. Suas

condições climáticas vão se tornando mais características de uma região tropical semiárida e sub-úmido seco, com uma temperatura média anual de 24 °C e precipitação entre 1000 mm e 1600 mm anuais.



Figura 1: Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco com as regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco.

Fonte: Adaptado de Agência Brasil (<https://agenciabrasil.ebc.com.br/>)

O Submédio da bacia do São Francisco (SMSF) abrange áreas dos estados da Bahia (BA) e Pernambuco (PE), estendendo-se desde Remanso (BA) até a cidade de Paulo Afonso (BA), com 110446 km², ou 17% da área da bacia. A região é caracterizada por uma topografia ondulada, com vales bem abertos devido a uma menor resistência à erosão dos xistos e outras rochas de baixo grau de metamorfismo, com elevações de 200 m a 800 m e uma vegetação do tipo Caatinga predominante em quase toda a sua extensão. O clima é considerado como semiárido com uma temperatura média anual de 27 °C e uma precipitação que chega a 400 mm na região de Juazeiro/Petrolina.

O Baixo São Francisco (BSF) estende-se de Paulo Afonso (BA) até a sua foz, entre Sergipe e Alagoas (AL), no Oceano Atlântico, com 25523 km², ou 4% da área

da bacia. A topografia da região é geralmente plana, principalmente mais perto da costa, variando entre o nível do mar e 200 m, embora algumas serras atinjam até 500 m, com uma vegetação do tipo Caatinga no trecho mais alto, e mata atlântica, manguezais e restingas na região costeira. O clima é considerado tropical semiúmido, apresentando uma temperatura média anual de 25 °C e uma precipitação que varia entre 500 mm e 1300 mm anuais.

2.1.1 Importância da bacia hidrográfica

A Bacia Hidrográfica do rio São Francisco é uma região com uma grande importância socioeconômica devido aos usos múltiplos da água, entre os que destacam o enorme potencial energético, agropecuário, industrial, turístico, cultural, ecológico, entre outros. A sua localização é estratégica, já que possibilita um meio de ligação entre as regiões Sudeste do Brasil (região com a maior densidade populacional e desenvolvimento industrial do país) e Nordeste (abriga um dos maiores polos agroindustriais).

O polo de irrigação mais desenvolvido do Vale está situado em torno das cidades de Juazeiro (BA) e Petrolina (PE). A região apresenta grande potencialidade para a aquicultura e dispõe da Estação de Piscicultura do Bebedouro. Os principais produtos e empreendimentos agrícolas e agroindustriais privados desse polo são: frutas (incluindo uva), vinhos, vinagre, álcool, mel de abelhas, piscicultura, e muitos outros (SILVA, 2014). Vários estudos mostram como as atividades antrópicas, principalmente aquelas associadas às mudanças no uso do solo, representam fatores importantes para o aumento ou redução da umidade atmosférica na região, principalmente o aumento das áreas irrigadas e a construção de barragens, que traz como consequências o incremento ou diminuição da umidade e a evapotranspiração em algumas áreas do semiárido, como também a queda da temperatura nas camadas mais baixas da atmosfera (CORREIA et. al, 2006; MELO et al., 2014; BARBIERI et al., 2017; CABRAL JUNIOR et al., 2019).

Embora o maior volume de águas seja ofertado principalmente pelos maiores afluentes localizados em áreas do Cerrado, são as represas de Três Marias (21 bilhões de m³) e Sobradinho (34 bilhões de m³) as que atualmente garantem a regularidade de vazão do São Francisco, mesmo durante a estação seca, de maio a outubro (ZELLHUBER e SIQUEIRA, 2016). Atividades agrícolas, ocupação urbana, aproveitamentos hidrelétricos, abastecimento, irrigação, entre outros usos, estão

ocasionando alterações no ciclo hidrológico e, conseqüentemente, no regime hidrológico da bacia (MARTINS et al., 2011; DOS SANTOS, 2016; SOUZA et al., 2018, FERREIRA et al., 2021).

A precipitação média anual é maior na nascente e vai diminuindo no sentido da foz, até as proximidades do limite entre o SMSF e o BSF, voltando a crescer até a foz devido à proximidade com o litoral (PEREIRA et al., 2007). A atuação dos VCAN (Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis) e as ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) tem um papel significativo no comportamento das chuvas em toda a bacia, pelo que se faz necessário compreender da melhor maneira possível o surgimento, intensificação, deslocamento e as regiões de atuação desses sistemas (DOS SANTOS, 2016; DANTAS e OLIVEIRA, 2021). Durante os meses de verão e outono, em todo o nordeste brasileiro, a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), em conjunto com os VCAN são responsáveis em grande medida pelas precipitações da região, incluindo as regiões fisiográficas do Submédio e Baixo São Francisco (UVO, 1989; CARDOSO, 2019).

Os eventos hidrológicos críticos na bacia podem ser caracterizados pelas enchentes, principalmente nos afluentes do ASF, além de ocorrências na região metropolitana de BH e outras cidades da área como Pirapora, Janaína e Manga. As secas e estiagens são fenômenos caracterizados pela ausência, escassez, frequência reduzida, quantidade limitada e má distribuição das precipitações pluviométricas (DOS SANTOS e CORREIA, 2011; DOS SANTOS, 2012). As secas são consideradas como desastres provocados por um fenômeno natural extremo de pouca pluviosidade que afetam áreas econômicas, sociais, técnicas e políticas, sendo imprevisíveis o início, fim e severidade, o que a define como um fenômeno aleatório (SANTOS, 2018; TORRES et al., 2020). As secas e estiagens ocorrem principalmente na região do Médio e Submédio, provocando perdas na produção agrícola, aumentando o êxodo rural e agravando o ritmo do crescimento urbano (CASTRO e PEREIRA, 2017, FONSECA et. al, 2020).

Em função das elevadas temperaturas e dos baixos índices de nebulosidade, a evapotranspiração potencial é muito alta, principalmente na região do Submédio, onde algumas estações registram valores de até 3 mil mm/ano. A elevada evapotranspiração potencial não compensada pelas chuvas afeta expressivamente o balanço hídrico dos solos (IORIS, 2001; MELO et al., 2014). Outros fatores que contribuem com a redução da taxa de infiltração da água no solo, principalmente nas regi-

ões do MSF e SMSF são a degradação da vegetação e a erosão do solo, que apesar de ser processos normais, por se encontrar numa região semiárida, o uso indiscriminado dos recursos pelo homem contribui para aumentar ainda mais esses problemas (SILVA et al., 2017; TEIXEIRA et al., 2018).

Além da sua utilização para a agricultura mediante a irrigação, a navegação e a pesca são uma fonte muito importante de renda e consumo para os ribeirinhos. Segundo Castro e Pereira (2017), o São Francisco apresenta um total de 1670 km navegáveis na calha do rio, ao que se pode acrescentar outros 700 km nos seus afluentes, sendo os trechos mais importantes os transitados entre Pirapora (MG) e Juazeiro (BA) (1312 km de extensão), além do Piranhas (AL) - foz do rio (208 km). Além disso é grande o potencial para o desenvolvimento da pesca, estimando-se em 600 mil hectares a superfície do espelho d'água do curso principal, dos afluentes, dos reservatórios das hidrelétricas e das barragens públicas e privadas.

Outra característica importante da região é o projeto da transposição das suas águas, empreendimento de grande porte desenvolvido com o objetivo principal de aumentar a disponibilidade do volume de água a ser transportado para o semiárido nordestino, mas sem deixar de lado a segurança hídrica da bacia como um todo (SOUSA, 2019). Regiões do sertão nordestino, caracterizadas por climas de grande aridez e episódios severos de seca vem sofrendo muito nos últimos anos pela falta do valioso líquido. O projeto não é novo, mas começou a ser executado em 2011, sendo que em março de 2017 foi inaugurada a primeira fase com a chegada nos estados de PE e Paraíba (PB), inaugurando a maior obra de transposição hídrica do Brasil e da América Latina (FERREIRA, 2017). O objetivo fundamental dessa transposição é a segurança hídrica para mais de 390 municípios do Nordeste Setentrional, região que enfrenta atualmente sérios problemas com a seca, principalmente para o consumo humano e animal, e dessa forma garantir o abastecimento de água de grandes centros urbanos da região e de centenas de pequenas e médias cidades inseridas no semiárido nordestino.

2.1.2 Uso das energias renováveis na BHRSF

Além dos usos já mencionados, o rio São Francisco tem um enorme potencial elétrico que pode ser bastante aproveitado, com diversas usinas hidrelétricas, eólicas e solares, instaladas ao longo da bacia (Figura 2). As principais fontes de geração de energia atualmente são as hidrelétricas de Sobradinho, Luiz Gonzaga, Três

Marias, Paulo Afonso IV e Xingó, representando a base para o suprimento da eletricidade em grande parte do Nordeste brasileiro (VILAR et al., 2020). A geração elétrica na região se comporta de forma estável graças ao aporte destas hidrelétricas, sendo que a causa principal de falhas na transmissão ocorre durante os meses de verão devido ao desenvolvimento de atividade convectiva intensa, principalmente devido à ação de VCAN (FARIAS e CORREIA, 2008).

Na região do Alto São Francisco o reservatório mais importante é o de Três Marias, que atua como importante fonte de produção energética para o país, além de contribuir para as reservas hídricas dos reservatórios de Sobradinho, Paulo Afonso e Xingó, maior complexo hidrelétrico do Nordeste. A Barragem da represa hidrelétrica de Três Marias foi construída em 1957 e inaugurada em 1961, com a finalidade de aproveitar o potencial hidroelétricos do rio e regularizar o curso das águas nas cheias, evitando a ocorrência de enchentes (ALMEIDA e THE, 2010). Sua operação começou no ano de 1962, após cinco anos de construção, tendo uma potência instalada de 396 MW e um reservatório de 19.528 hm³. Sua barragem é constituída por 2.700 m de comprimento e uma altura máxima de 75 m, sendo, para a época de sua construção, o maior reservatório existente em todo o Brasil e um dos maiores do mundo. Hoje em dia, sua potência instalada não é tão significativa para o Brasil, podendo abastecer cerca de 1,1 milhão de habitantes, porém a sua importância vai muito além da geração elétrica, pois seu reservatório é o principal responsável pelo abastecimento de água para os municípios, além de aquecer a economia e o turismo da região (PEREIRA, 2021). Para a saúde da bacia, o reservatório constitui um ponto de enorme importância, devido a que a saúde hídrica do rio praticamente vem determinada pelas suas condições. Uma vazão estável do nível de água no Alto São Francisco, determinado pela represa de Três Marias, condiciona consideravelmente melhores condições hídricas para o restante da bacia (TREISTMAN, 2015).

O reservatório de Sobradinho, um dos principais de toda a bacia, foi construído entre 1973 e 1979 pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), sendo um dos maiores lagos artificiais do mundo e servindo como reservatório de regularização plurianual., Localiza-se no SMSF, aproximadamente a 40 km à montante das cidades de Juazeiro e Petrolina (CORREIA e SILVA DIAS, 2003), com 6 máquinas geradoras e uma potência instalada de 1050 MW (MARTINS et al., 2011).

As usinas de energia eólica também ganharam espaço e contribuem para atividade econômica da região. Situam-se praticamente em todo o trecho do MSF, no

entorno do Lago de Sobradinho (SILVA, 2017). A velocidade do vento nessa região geralmente é muito intensa, devido à influência dos ventos alísios, principalmente no período seco (MELO et al., 2013; SILVA et al., 2016), que muitas vezes, em combinação com circulações locais, associadas ao acoplamento entre a brisa terrestre (lacustre) e os ventos catabáticos (anabáticos) durante a madrugada-início da manhã (final da tarde-início da noite) fazem com que a velocidade do vento seja maior. Mas esse processo não acontece em todo momento, em várias situações ocorre em sentido oposto, contribuindo com a redução da intensidade do vento. Os meses de junho, julho e agosto apresentam menos variabilidade na direção do vento, favorecendo um melhor aproveitamento das turbinas eólicas (SILVA et al., 2016).



Figura 2: Geração de energia elétrica na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **(A)** Hidrelétrica de Sobradinho (BA); **(B)** Hidrelétrica de Paulo Afonso IV (BA); **(C)** Usina Solar Fotovoltaica Flutuante no lago de Sobradinho (BA); **(D)** Parque eólico Pedra do Reino em Sobradinho (BA).

Fonte: Agência Brasil (<https://agenciabrasil.ebc.com.br/>)

Apesar do grande potencial eólico, muitas usinas carecem de autonomia plena, pois praticamente não há controle da quantidade de energia gerada a partir dos

ventos. Por isso é essencial a ligação com fontes que possuem capacidade de armazenamento de energia, como as hidrelétricas e em menor medida também as térmicas. Uma característica positiva das usinas eólicas é a sua relação de complementariedade com o regime hidrológico, havendo maior geração durante o período seco do ano e, como consequência, é possível economizar água dos reservatórios (BRACIER, 2018).

O Rio São Francisco é utilizado também para geração de energia solar por meio de uma Usina Solar Fotovoltaica Flutuante (AGÊNCIA BRASIL, 2018). O primeiro experimento foi instalado pela CHESF no reservatório da Usina Hidrelétrica de Sobradinho, entrando em operação em dezembro de 2018. A plataforma flutuante já instalada tem 7,3 mil módulos de placas solares, uma área total de 10 mil metros quadrados e capacidade de gerar 1 megawatt-pico (MWp). O projeto permite aproveitar as subestações e as linhas de transmissão das hidrelétricas, além das áreas sobre a lâmina d'água dos reservatórios, evitando desapropriação de terras (BACELAR, 2019).

A bacia hidrográfica tem praticamente todos os ingredientes necessários para gerar uma quantidade muito considerável de energia em quase toda a sua extensão (volume de água considerável -principalmente nos reservatórios-, fortes ventos em algumas regiões e intensa radiação solar durante grande parte do ano), mas na prática muitos fatores climáticos, em conjunto com atividades realizadas de forma indiscriminada pelo homem, impedem que isso ocorra da forma ideal., Um dos principais problemas é a desigual distribuição de chuvas, tanto em cada região fisiográfica quanto também pela época do ano. Castigados por uma estiagem que perdurou por mais de 5 anos entre 2012 e 2017, vários reservatórios chegaram a contar com quase metade do mínimo de água que suas barragens deveriam liberar, ficando com restrições tanto na navegação quanto na geração de energia durante quase todo o período (INMET, 2017).

Além do regime pluviométrico como causa fundamental, a escassez hídrica depende de outros fatores como consumo e má gestão dos recursos hídricos existentes (CHENG et al., 2017). Durante os meses da estação seca (maio a outubro) a necessidade maior do uso da irrigação na agricultura, em conjunto com a pouca quantidade de precipitação trazem como consequência que a geração de energia seja muito menor do que na estação chuvosa (novembro a abril). No entanto, como mencionado anteriormente, é exatamente esse o período de maior contribuição das

eólicas no subsistema Nordeste devido principalmente a maior intensidade dos ventos alísios nessa época do ano (MELO et al., 2013; SILVA et al., 2019).

Por esses motivos e a importância que representa na sociedade, é muito relevante manter todo o rio nas melhores condições hídricas possíveis, pelo que se faz necessário um estudo climatológico detalhado de cada uma das sub-bacias, para determinar as ações a serem utilizadas em cada época do ano, além da necessidade do uso de técnicas que permitam otimizar o planejamento de operações a longo prazo na geração de energia, principalmente em episódios de seca extrema (VILAR et al., 2020).

2.1.3 Ações antrópicas prejudiciais para a bacia hidrográfica

As ações de desmatamento constituem a principal ameaça para a conservação da natureza e biodiversidade na bacia. Um dos impactos negativos deste desmatamento é a impermeabilização do solo que, ao ter sua capacidade de infiltração reduzida, prejudica a recarga dos aquíferos subterrâneos e amplia o processo de erosão do solo, cujos sedimentos, muitas vezes contaminados por agrotóxicos, passam a ser conduzidos em larga escala para os rios. Os processos erosivos afetam, de forma geral, a maior parte da superfície da bacia. Nesse sentido destacam-se as extensas áreas da bacia afetadas por processos de desertificação, principalmente na região do Médio São Francisco (ROSA, 2019).

A região do Baixo São Francisco é uma área intensamente impactada por barragens, poluição e remoção da cobertura vegetal nativa. Alguns dos municípios inseridos neste trecho da BHRSF exibem hoje um baixo quadro de desenvolvimento socioeconômico, com alguns dos piores Índices de Desenvolvimento Humano (IBGE, 2019).

Por outra parte, com a finalidade de preservar o estoque de água no reservatório de Sobradinho, desde abril de 2013, realiza-se uma operação especial de redução gradativa da sua vazão defluente. Esta redução do volume de água compromete as condições de manutenção da vida aquática, sobretudo no Baixo trecho do Rio São Francisco, que sofre com o fato de que a água salobra do mar invade o rio, em um fenômeno denominado cunha salina. Esse processo de avanço do mar sob o rio acarreta mudanças no ecossistema da foz, no abastecimento de água da comunidade ribeirinha e compromete a saúde da população local.,

Os riscos impostos a toda a bacia hidrográfica são enormes e o Projeto de Transposição do Rio São Francisco só veio se somar a eles, com a instituição de novos territórios conectados pelas redes de transferência de recursos naturais produzidos pela bacia, no caso, representada pelos canais e pelas águas que serão transpostas nos canais Leste e Oeste da transposição. O projeto é composto por um conjunto de infraestruturas tais como canais de condução, barragens, estações de bombeamento, aquedutos, túneis, e captações de água, localizadas à jusante do reservatório de Sobradinho. A operação da entrega de água do Eixo Leste do PISF ocorreu em marco de 2017, com a chegada do líquido no rio Paraíba, em Monteiro (PB), para suprimento de água à cidade de Campina Grande (PIRES, 2019).

2.1.4 Revitalização da bacia hidrográfica e segurança hídrica

O projeto de revitalização do Rio São Francisco é de fundamental importância, devido ao que representa para toda a população ribeirinha o “Velho Chico”. O objetivo principal desse projeto é garantir que as atividades econômicas e de subsistência das pessoas que dependem de tais recursos hídricos possam se perpetuar, de forma constante e sustentável (MEDIOTTE, 2019). As principais ações aplicadas nos últimos anos estão sendo desenvolvidas em aspectos estratégicos, como por exemplo a preservação e recuperação da cobertura vegetal, garantia do acesso digno à água, dinamização das economias com bases sustentáveis, prevenção em áreas de riscos de enchentes, e saneamento básico. É para elas que se pretende chamar a atenção e demonstrar que vão ao encontro diretamente das diversas perspectivas e demandas sociais em busca da segurança hídrica.

O programa de revitalização representa um esforço comum de articulação e integração entre vários órgãos de governo em todas as esferas e da sociedade civil, todos imbuídos no propósito de promover a revitalização e o desenvolvimento numa base sustentável, assim como alcançar a governabilidade desejada, reconhecida como chave para a gestão mais equitativa, eficiente e sustentável dos recursos naturais.

De modo geral, a situação atual da bacia hidrográfica do rio São Francisco apresenta alguns desafios principais, entre os quais destacam os seguintes:

- a) Definir uma estratégia que solucione conflitos entre os diversos usuários dos recursos hídricos (abastecimento urbano, aproveitamento

- energético, irrigação, navegação, piscicultura, dessedentação de animais, lazer e turismo) em toda a bacia;
- b) Resolver conflitos entre a demanda para usos consuntivos e insuficiência de água em períodos críticos;
 - c) Implementar sistemas de tratamento de esgotos domésticos e industriais;
 - d) Racionalizar o uso da água para irrigação no Médio e Submédio São Francisco;
 - e) Estabelecer estratégias de prevenção de cheias e proteção de áreas inundáveis;
 - f) Definir programas para uso e manejo adequado dos solos.

Por todas essas questões se faz necessário estabelecer um consistente Programa de Desenvolvimento Sustentável da Bacia Hidrográfica do São Francisco, com início, meio e fim, metas plurianuais e indicadores mensuráveis, no contexto do qual seja possível estabelecer uma ação integrada do governo, agentes econômicos e sociedade civil, visando ao enfrentamento definitivo da falta de água, assim como os conflitos de uso dos recursos naturais e a recuperação hidro ambiental do rio e seus afluentes (COELHO, 2005). Para atingir esses objetivos é muito importante associar o programa com a variação climática e os diferentes regimes de chuva ao longo da bacia hidrográfica.

2.2 Sistemas e fenômenos meteorológicos atuantes na região do Alto São Francisco

O Alto São Francisco é a região onde nasce o rio, na zona montanhosa da Serra da Canastra, em Minas Gerais (MG), sendo uma das mais importantes hidricamente tanto para o país quanto para todo o Nordeste brasileiro (NEB) devido à quantidade de chuvas que ali precipita, por causa de vários sistemas meteorológicos que acontecem nessa área geográfica. Encontra-se na região sudeste do Brasil, principalmente no estado de MG, com um comportamento sazonal muito variável, influenciado por diferentes sistemas meteorológicos, de latitudes médias e tropicais, com duas estações bem definidas: uma seca e uma chuvosa (SILVA, 2021). O período mais úmido compreende os meses de verão (novembro-dezembro-janeiro), no qual podem acontecer desastres naturais como enchentes, alagamentos, inunda-

ções, entre outros, porém durante o inverno (junho-julho-agosto) as precipitações são muito escassas, acarretando também desastres como secas, estiagens e incêndios florestais (FERREIRA et al., 2021). Os principais sistemas e fenômenos meteorológicos que ocorrem no Alto São Francisco são a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Sistemas Frontais (SF), Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e bloqueios atmosféricos.

2.2.1 Zona de Convergência do Atlântico Sul

A ZCAS pode ser observada nas imagens de satélite como uma extensa banda de nebulosidade com orientação noroeste/sudeste (NW/SE), que vai desde o sul da região Amazônica até o centro do Atlântico Sul (KOUSKY, 1988; KODAMA, 1992; QUADRO, 1994; LIEBMAN et al., 1999; CARVALHO et al., 2004). Está presente no verão, devido ao transporte de umidade em baixos níveis, proveniente do oceano Atlântico e da região amazônica, desviados pela Cordilheira dos Andes para o interior e a região sudeste do Brasil (KOUSKY, 1988; GOMES, 2019). Outros mecanismos que contribuem na formação das ZCAS são a manutenção da convecção pela convergência de umidade na baixa e na média troposfera, e o alto contraste de umidade (KODAMA, 1992; REBOITA et al., 2010; MENEZES, 2019).

Este fenômeno favorece a ocorrência de chuvas em toda a região sudeste do Brasil, podendo alcançar inclusive os estados mais ao norte da região sul, em dependência do seu posicionamento. Por estar associada à convecção tropical, estabelecida na região amazônica, a ZCAS começa a se manifestar na primavera, principalmente no mês de outubro. Em novembro e dezembro atua principalmente no norte de MG e sul da BA, e no início do verão predomina sobre o centro-sul de Minas Gerais, norte do Rio de Janeiro (RJ) e do Espírito Santo (ES). Portanto, a ZCAS apresenta uma variabilidade espacial, mudando sua localização latitudinalmente de norte, no início da estação chuvosa, para sul, no meio dessa estação (VIANELLO e MAIA, 1986; ABREU, 1998; MOREIRA, 2002).

Na região do Alto São Francisco a ZCAS é um dos sistemas responsáveis pela ocorrência de desastres, trazendo inúmeros prejuízos materiais e perdas de vidas, com deslizamentos de terra e cheias como as principais consequências, as quais representam acima do 60% do total durante episódios de chuva intensa (PEDRO et al., 2020). Uma característica importante dos eventos de ZCAS na área é a ocorrência de um sistema de baixa pressão e de um cavado em níveis médios/altos a oeste do

sistema em superfície mais profundos que podem ser cruciais na canalização de umidade da Amazônia para o Sudeste do Brasil (SILVA et al, 2020).

Todos os episódios de ZCAS não apresentam a mesma configuração, sendo vários os mecanismos que contribuem com sua formação e manutenção. Nesse sentido, vários autores (ESCOBAR, 2014, ESCOBAR e MATOSO, 2018; SILVA et al., 2020) fizeram uma classificação sinótica dos eventos de ZCAS, para diferentes períodos, através da técnica de Análise de Componentes Principais, resultando que 3 padrões sinóticos principais estavam associados à ocorrência de ZCAS. O padrão sinótico de ZCAS mais frequente relacionou-se com uma frente estacionária no oceano na altura do Sudeste do Brasil e com a presença do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) mais intenso localizado ao sul da sua posição climatológica, adquirindo características de tipo bloqueio, sendo que em certas ocasiões este padrão sinótico está relacionado com a presença de ciclones no oceano com pouca baroclinia. O segundo padrão esteve associado com uma frente fria clássica sobre o Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, apresentando uma intensa convergência de umidade sobre o interior do continente. Por último, o terceiro padrão sinótico relacionou-se com uma intensa e abrangente área de baixa pressão sobre o oceano com características barotrópicas, favorecendo a forte advecção de ar quente e úmido desde a região amazônica. Embora a literatura não aborde expressamente a relação da ZCAS com os ciclones oceânicos, estudos recentes têm indicado a associação da umidade proveniente do continente com os ciclones formados na costa sudeste do Brasil, principalmente em eventos de ciclones subtropicais (GOZZO et al., 2017; SILVA et al., 2019).

Embora esses padrões sejam os principais na ocorrência de episódios de ZCAS, essas não são as únicas condições que trazem como consequência a ocorrência de chuvas intensas e persistentes durante esse fenômeno meteorológico. Também existem outros fatores de caráter local muito importantes. Faggiani et al. (2020) analisaram regiões de ZCAS de forma separada e verificaram que mesmo durante o período noturno, existe a atividade convectiva e divergência de vapor de água na Amazônia, o que permite que o fluxo de vapor seja transportado para o Sudeste mesmo durante a noite. Sobre a região Sudeste é possível verificar que durante a madrugada a convergência de umidade atmosférica pode explicar quase totalmente a precipitação durante o período noturno, entretanto ao longo do dia, grande

parte da precipitação pode ser explicada pelo aumento da evapotranspiração na área.

2.3 Modelos numéricos usados na simulação de eventos de chuvas intensas

A problemática atual na modelagem numérica das precipitações tem sido abordada em diversos trabalhos nos últimos anos, devido à importância que isso representa tanto para a população quanto para a economia de cada país (SILVA, 2018; ALVAREZ et al., 2019; FERREIRA et al., 2020). No entanto, fazer uma simulação exata de fenômenos meteorológicos ainda é uma meta a ser cumprida pelos pesquisadores e a ciência em geral. Todos os modelos têm diversas peculiaridades e falhas, sendo que cabe ao profissional habilitado e capacitado, interpretar as saídas deles e definir o que pode acontecer ou ter acontecido na região analisada (PALENZUELA, 2017; COMIN et al., 2021). Em parte, isso ocorre devido a que em algumas regiões os modelos numéricos apresentam desempenho satisfatório na representação das diferentes variáveis atmosféricas quando comparada com dados observados, porém em outras localidades os resultados não são tão precisos (PAL et al., 2021; PEGAHFAR et al., 2022). O grau de influência de fatores tais como a topografia, vegetação, condição inicial, umidade e tipo de solo, varia consideravelmente de um lugar para outro.

Muitos são os processos que podem contribuir na ocorrência de precipitação, como por exemplo a ascensão de ar úmido em grande escala, a convecção causada pelo ar quente e úmido em superfície, a convergência de ar úmido em uma região baroclínica ou até o levantamento orográfico. Desta forma, todos eles devem ser levados em consideração na previsão numérica do tempo (EBERT, 2001).

A modelagem numérica na Meteorologia baseia-se na integração de um sistema de equações capazes de traduzir as leis físicas que regem o comportamento dinâmico da atmosfera. Segundo Bjerknes (1904), a previsão do tempo era composta de uma etapa diagnóstica, onde o estado inicial era determinado a partir de dados observados e uma etapa prognóstica que utilizava a equação do movimento para calcular como o estado atmosférico avançaria ao longo do tempo. Com isso, o autor propôs que o estado futuro da atmosfera poderia ser prognosticado, sabendo-se seu estado atual.,

Charney et al., (1950) chegaram à conclusão de que o problema da modelagem numérica poderia ser solucionado computacionalmente e tentaram reproduzir

numericamente o movimento dinâmico da atmosfera. Os autores utilizaram modelos mais simples e fizeram o máximo de aproximações possíveis, chegando a um modelo que se reduz a uma única variável a ser integrada no tempo, alcançando resultados satisfatórios.

Diversos processos são parametrizados dentro de um modelo numérico, os quais representam só os aspectos fundamentais do mecanismo físico envolvido, pela dificuldade de simular de forma correta todos eles mediante relações simplificadas e limitadas para uma variedade de condições ambientais. Essas parametrizações são geralmente desenvolvidas para escalas horizontais pré-estabelecidas, ou seja, apenas aqueles aspectos do sistema físico que não são resolvidos pelo modelo precisam ser parametrizados (FERREIRA et al., 2020).

Alguns modelos numéricos para a previsão do tempo que tem sido muito difundidos e utilizados nos últimos anos são o RAMS - *Regional Atmospheric Modeling System* (PIELKE et al., 1992), o ARPS - *Advanced Regional Prediction System* (XUE et al., 2000), o modelo regional ETA (MESINGER, 1984), o MM5 – *Penn State Mesoscale Model* (GRELL et al., 1995) e mais recentemente, o WRF (MICHALAKES et al., 1998; SKAMAROCK et al., 2008).

O WRF é um modelo de previsão numérica do tempo, utilizado tanto para fins de pesquisa como operacionais. Foi desenvolvido para ser flexível, com código portátil e eficiente em ambientes de computação paralela. Oferece uma diversidade de opções físicas, além de sistemas avançados de assimilação de dados que estão sendo desenvolvidos e testados em conjunto com o modelo. Pode ser usado em aplicações de diferentes escalas espaciais, desde alguns metros até escala global., As aplicações incluem, dentre outras, a utilização em previsões numéricas do tempo, tanto operacionais como aquelas voltadas para as pesquisas de parametrizações físicas, assimilação de dados, modelos dirigidos de qualidade do ar e acoplamento oceano-atmosfera (SKAMAROCK et al., 2008; BLAZQUEZ, 2009).

2.4 Parametrizações de microfísica de nuvens

Na simulação de precipitações com o modelo WRF são duas parametrizações as de maior contribuição em análise de eventos extremos de chuva: a microfísica de nuvens e a convecção cúmulos. No caso dessa última, em resoluções maiores (menor espaçamento de grade) pode ser eliminada, devido a que esse tipo de convecção só tem influência em processos simulados a maior escala.

A microfísica de nuvens engloba todos os processos físicos que ocorrem na escala de gotículas de nuvem e dos hidrometeoros. A escolha de parametrizações que melhor representem os processos físicos associados as condições atmosféricas de uma região num período determinado, permitem representar o tipo de precipitação, a sua intensidade e distribuição espacial (ALVES JUNIOR, 2017). Algumas parametrizações convectivas são mais apropriadas para latitudes médias, enquanto outras têm melhor desempenho nos trópicos. Um problema relacionado é que os modelos globais devem usar as mesmas parametrizações para todas as áreas geográficas, eliminando a opção de escolher as que melhor se adequam numa determinada região (WARNER, 2010).

São usadas também para simular os efeitos de transporte, mudança nos estados físico e termodinâmico do conjunto de hidrometeoros líquidos ou congelados presentes nas nuvens (WANG et al., 2013), além de determinar o aumento dos gases que acarretam o efeito estufa, o aumento dos aerossóis produzidos pela precipitação intensa e a alteração da temperatura inicial da superfície devido à mudança do albedo (HOUZE, 2014). O WRF oferece várias opções de microfísica das nuvens (19 no total até a sua última versão, que é a 4.0), que variam das mais simples e eficientes até as mais sofisticadas e de maior custo computacional. As principais características das mais usadas e com melhores resultados na região da América do Sul, que por isso foram utilizadas para nossa pesquisa, são as seguintes:

2.4.1 *ETA microphysics (Ferrier)*

O esquema de Ferrier (1994) prevê explicitamente a água e gelo em proporção de mistura de nuvem. A precipitação líquida e congelada é derivada a partir do diagnóstico da proporção das variáveis na mistura de nuvem e são assumidos para cair no chão ao mesmo tempo. Assume valores fixos de frações de água e gelo dentro da nuvem e a advecção total do vapor d'água, visando uma melhor eficiência em representar a precipitação. Neste esquema, é simulado a água líquida super-resfriada e o derretimento do gelo. Considera a densidade variável para a precipitação de gelo (neve ou graupel), que é uma grande vantagem em relação a outras parametrizações.

2.4.2 *Thompson aerosol-aware*

Nesta parametrização ocorrem melhorias nas implementações da deposição, da sublimação e da evaporação. Desenvolvida por Thompson e Eidhammer (2014) para ser utilizada pelo WRF ou por outros modelos de Mesoescala, incorpora muitas melhorias para os processos físicos e sua codificação e emprega outras técnicas encontradas em esquemas mais sofisticados. Ao contrário de outros esquemas, a distribuição do tamanho da neve assumida depende tanto da quantidade de água gelada quanto da temperatura, e é representada como uma soma de distribuições exponencial e gama. Além disso, a neve assume uma forma não esférica com uma densidade que varia inversamente com o diâmetro, diferente das outras parametrizações que assumem a neve esférica com densidade constante. Este esquema prevê explicitamente as razões de mistura de 5 (cinco) espécies de líquido e gelo: nuvem de gelo de água, chuva, nuvem de água, neve e graupel. Além disso, é o único esquema single moment (1-M) que varia a concentração de gelo e de chuva. Esta parametrização foi desenvolvida visando melhorar as previsões de intensidade da precipitação, melhorar as previsões de fases da água na superfície e no ar, incorporar as observações microfísicas recentes de vários projetos e cumprir os requisitos de tempo real de modelagem.

2.4.3 Morrison double-moment scheme

O esquema de Morrison et al. (2009) inclui variáveis prognósticas para as razões de mistura de gotículas de nuvens e gelo, enquanto a precipitação é tratada de forma diagnóstica. Esta parametrização 2-M procura um tratamento mais flexível e consistente, baseado na física das nuvens, um nível razoável de simplicidade e eficiência computacional, tratamento da razão de mistura de partículas de nuvem para dimensionar os efeitos indiretos dos aerossóis e da interação nuvem-aerossol, além da obtenção de resultados equivalentes ou melhores em relação aos esquemas anteriores. Os novos aspectos do esquema são uma representação explícita de distribuição de água de nuvem para o cálculo das diversas taxas de processos microfísicos, bem como o diagnóstico de tratamento de chuva e neve.

2.5 Simulação de eventos extremos usando o modelo WRF

Durante os últimos anos vários trabalhos no Brasil e o resto do mundo estão tentando achar as melhores combinações de parametrizações para representar o

fenômeno das chuvas intensas, obtendo resultados bem promissórios, porém também diferentes, em dependência da região geográfica e a época do ano. Por exemplo, algumas parametrizações convectivas são mais apropriadas para latitudes médias, enquanto outras têm melhor desempenho nos trópicos.

Almeida e Marton (2014) simularam com o WRF um evento de chuvas intensas ocorrido no mês de novembro de 2008 no estado de Santa Catarina (SC). Os resultados, com uma resolução espacial de 10 km de espaçamento de grade mostraram um maior detalhamento das condições dinâmicas e termodinâmicas que contribuíram para a intensidade do fenômeno, além dos núcleos de precipitação sobre o litoral de SC, mesmo que a intensidade da precipitação tenha sido subestimada. Nesse trabalho foi testada só a parametrização de microfísica de nuvens *WRF Single-Moment 3-class scheme*, a qual implementa de forma simples o efeito de sedimentação de gelo e possui três categorias de hidrometeoros: vapor d'água, água e gelo de nuvem e chuva e neve, confirmando que para a região Sul e Sudeste do Brasil as parametrizações mais simples geralmente tendem a subestimar os acumulados.

Martins (2014) fez um estudo sobre o comportamento de diferentes parametrizações de microfísica de nuvens para observar o comportamento delas na simulação de um evento convectivo ocorrido em abril de 2011 na cidade de Fortaleza, Ceará. Observou-se que o uso de microfísica detalhada não melhora necessariamente o comportamento das precipitações no modelo, caso não sejam utilizados dados observados no local de estudo, chegando à conclusão de que a inclusão de dados de sondagens possibilita melhor desempenho, principalmente nas variáveis ligadas à convecção. Como ponto positivo desse estudo está a completa abordagem sobre o comportamento das quatro parametrizações de microfísica de nuvens utilizadas (*WSM3*, *Eta Ferrier*, *Morrison double-moment scheme* e *Milbrant double-moment scheme*), sendo as duas primeiras de momento simples e as outras duas de duplo momento. O autor compara o comportamento de cada uma delas e não observa uma diferença considerável entre os resultados obtidos, tendo uma melhora só quando acrescentados dados observados por sondagens, pluviômetros e estações meteorológicas da região.

Silva (2018) fez um estudo sobre os mecanismos vinculados à formação de um episódio intenso de ZCAS, mediante o uso do modelo WRF. Os resultados mostram que, quando usados juntos, tanto a opção de microfísica WRF Single Moment

6-Class (WSM6) quanto a opção cumulus de Kain-Fritsch (KF) contribuíram para a formação da banda convectiva associada à ZCAS e que é possível usar um esquema de microfísica mais simples (WSM3) para a representação do sistema, uma vez que os desempenhos entre os diferentes testes em microfísica foram semelhantes. Nesse caso específico a opção de parametrização cúmulos foi a principal para a simulação do evento, porém o autor só trabalhou com um domínio de 25 km, no qual esse tipo de parametrização é fundamental por causa da escala, não sendo assim quando diminui o domínio.

Alvarez et al., (2019) avaliaram o comportamento do WRF na previsão de vários eventos de chuvas intensas na complexa orografia peruana. Foram usadas parametrizações com bons desempenhos em eventos desse tipo já testadas anteriormente na América do Sul, usando como microfísica a parametrização de *Morrison double-moment scheme*, que inclui variáveis prognósticas para as razões de mistura de gotículas de nuvens e gelo, enquanto a precipitação é tratada de forma diagnóstica. Os resultados mostraram uma subestimação na quantidade de chuva dos casos de eventos severos, mas dos quatro domínios utilizados (18 km, 6 km, 3 km e 0.75 km) o de 3 km foi o que melhor desempenho teve quando comparado com os dados reais obtidos mediante estações meteorológicas e pluviômetros da região.

Ferreira et al., (2020) testaram nove (9) parametrizações diferentes de microfísica de nuvens com assimilação de dados convencionais e de radar, para determinar quais representaram de forma mais adequada a precipitação e refletividade nas previsões de curto prazo de três eventos de precipitação em 2014 ocorridos na região Sul do Brasil e sudeste de Paraguai. Os melhores resultados foram obtidos usando as microfísicas de Thompson e Morrison, entretanto demonstraram que a escolha de uma microfísica muito simplificada, que não seja capaz de representar as fases do gelo e processos na fase mista, não é aconselhada para o estudo de sistemas convectivos.

Bozzini e Mélo Junior (2020) avaliaram as previsões de precipitação de três modelos atmosféricos diferentes (ETA, BAM e WRF) em eventos de chuvas acontecidos em várias bacias hidrográficas do estado de SP, sendo que os resultados mostraram uma grande subestimação no modelo ETA, uma grande superestimação no BAM, entretanto o de melhor comportamento foi o WRF, mesmo ainda deixando uma tendência leve de subestimação. Infelizmente os autores não disponibilizaram a combinação de parametrizações utilizadas na realização da pesquisa, pelo que se

faz muito difícil determinar se a qualidade dos resultados foi usando uma microfísica mais simples ou uma mais completa.

Estes resultados e muitos outros não mostrados nessa revisão, revelam a importância de escolher uma combinação de parametrizações que simule de forma mais realista todos os processos envolvidos na formação da gotícula de chuva, com o objetivo de evitar o maior possível uma subestimação ou superestimação na hora de prognosticar com antecedência suficiente eventos de chuva intensa, e dessa forma preparar à população para a chegada deste fenômeno meteorológico que geralmente acarreta algum tipo de desastre. Na grande maioria das investigações atuais são descritos os erros apresentados pelos modelos, mas poucos sugerem alternativas para melhorar a representação física e obter uma boa previsão numérica das chuvas.

2.6 Aplicação da Relaxação Newtoniana e sua importância

O objetivo da técnica de *spectral nudging* é modificar de uma forma espectral as tendências nos maiores comprimentos de onda das variáveis nas equações de previsão, adicionando um termo de relaxação proporcional à diferença entre os estados simulado e prescrito. Este termo relaxa parte do espectro de ondas de grande escala para aquelas correspondentes a uma reanálise, análise ou previsão global, ajudando o modelo a simular características dessa escala que deveriam ser melhor representadas nos dados globais (WALDRON et al., 1996; GOMEZ e MIGUEZ-MACHO, 2017).

Vários autores abordam como simulações numéricas de longa duração podem divergir das observações, devido principalmente a que o fluxo de informações nas condições de fronteira pode não ser devidamente levado para o interior da grade. Uma maneira de mitigar esses efeitos consiste no processo de relaxação newtoniana, também conhecido como *nudging* em experimentos numéricos.

O método consiste fundamentalmente em aproximar as soluções numéricas a campos de referência em um ou mais pontos de grade (STAUFFER e SEAMAN, 1990), com as referências sendo obtidas pelas condições iniciais. Recentemente, uma variação da aplicação da relaxação, denominada relaxação espectral, ou *spectral nudging*, vem sendo utilizada com o propósito de atenuar erros nas simulações (GOMEZ e MIGUEZ-MACHO, 2017; VINCENT e HAHMANN, 2015; SILVA, 2018). A

técnica utiliza filtros espectrais para que apenas uma banda do espectro seja utilizada no processo de relaxação, sendo que quando é usada para aproximar a grande escala do modelo a conjuntos de referência, há uma maior liberdade para que os módulos físicos e dinâmicos do próprio modelo contribuam para a solução final nas escalas que não sofrem interferência do processo de relaxação.

As primeiras investigações dos efeitos da utilização da relaxação espectral foram realizadas por Waldron et al. (1996). Os autores descrevem a utilização da técnica para um modelo de área limitada para que eventos de grande escala sejam amplificados no interior da grade numérica e, assim, garantir a eliminação de modos internos, relacionados às discretizações das equações utilizadas pelo modelo, gerados por uma topografia complexa. Além disso, a amplificação de erros pode resultar da incompatibilidade entre as resoluções das condições iniciais e da grade utilizada para a discretização.

Gomez e Miguez-Macho (2017) testaram a sensibilidade do modelo WRF a diferentes números de onda de corte para o espectro na aplicação da relaxação em experimentos com o modelo WRF na região da América do Norte. Os autores indicam resultados que estimulam a utilização do método para larga escala. Seus resultados apontam para a utilização de números de onda de corte correspondentes a, no mínimo, 1000 km. Essa escala é comparável com o raio de deformação de Rossby para a região, valor que indica a separação entre escalas sinóticas e convectivas, escala na qual a resposta para ondas inerciais se equivale a ondas de gravidade. Em grandes escalas, sob o domínio das relações geostróficas, a força de Coriolis torna-se responsável pela restauração das perturbações. A aplicação desse método pode ser particularmente útil para a representação de eventos de ZCAS de longa duração, uma vez que eventos de grande escala são extremamente importantes para garantir a estrutura necessária para o desenvolvimento e persistência da zona de convergência.

3 Metodologia

3.1 Dados utilizados

Os dados de precipitação diária e horária utilizados neste estudo foram obtidos de estações meteorológicas situadas próximas dos locais onde ocorreu o evento (Figura 3), bem como o período de maior intensidade para dessa forma comparar com a situação mostrada na imagem de satélite e os demais campos de variáveis, tanto de reanálise quanto as saídas do modelo.

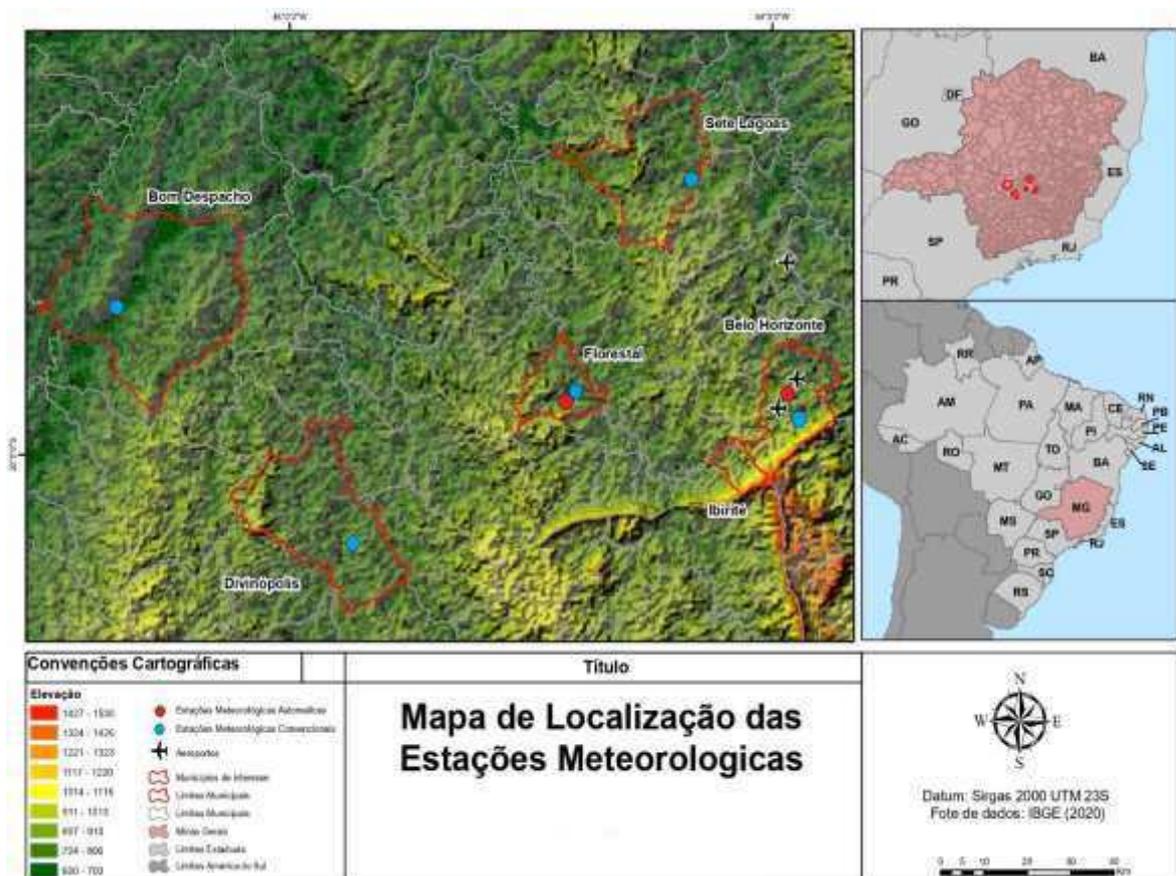


Figura 3: Localização geográfica das estações meteorológicas e aeroportos utilizados.

Os dados em ponto de grade usados na análise sinótica foram obtidos de reanálise da ERA5, a quinta geração de reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), que representa o estado da arte em dados de reanálise (HERSBACH e DEE, 2016). Eles foram obtidos a cada 6h, tanto para as variáveis atmosféricas em níveis de pressão quanto para as variáveis de superfície, pelos links <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>, sendo dados de altitude, os quais possuem 27 níveis na vertical, e de superfície, os dois com 4 horários diários escolhidos (00, 06, 12, 18 UTC) e resolução horizontal de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Além disso foram usadas imagens do canal infravermelho do satélite *Global Online Enrollment System* (GOES 13), com resolução espacial de 4 km e temporal de 15 minutos, fornecidos pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA), bem como as cartas de superfície, níveis médios e altos, elaboradas pelo Grupo de Previsão do Tempo (GPT), ambos pertencentes ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Também foram utilizados dados de sondagem do aeroporto internacional Tancredo Neves, situado na cidade de BH, disponíveis no site da Universidade de Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>), e mensagens METAR elaboradas nos aeroportos mais próximos da região de ocorrência das precipitações (Pampulha, Carlos Prates e Tancredo Neves -CONFINS-), com o objetivo de analisar as condições atmosféricas em escala local existentes em regiões sob a influência da ZCAS.

3.2 Análise sinótica

3.2.1 Variáveis fornecidas pelo modelo - ERA5

Para estudar as condições sinóticas existentes na região e que propiciaram as intensas chuvas foram analisados os mapas de Pressão a Nível Médio do Mar (PNMM) e altura geopotencial nos níveis de 1000, 850, 500 e 250 hPa, com o objetivo de observar o movimento dos sistemas sinóticos presentes na região durante a ocorrência das chuvas. As variáveis utilizadas são altura geopotencial (Z), componentes zonal (u) e meridional (v) do vento, temperatura (T), velocidade vertical (ω), umidade específica (q), vorticidade relativa (ζ) e umidade relativa (rh)

3.2.2 Variáveis e parâmetros termodinâmicos calculados

Foram calculadas diversas variáveis e parâmetros para analisar a situação sinótica existente durante a ocorrência das chuvas intensas. Elas são:

- Divergência do vento em 250 e 850 hPa: Segundo Bluestein (2013), a divergência do vento é calculada mediante a seguinte fórmula:

$$\text{div } \vec{V} = \frac{1}{a \cdot \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \quad (1)$$

sendo u a componente zonal do vento, v a componente meridional, a o raio da terra, λ a longitude e φ a latitude. Essa variável será utilizada para observar a convergência (valores negativos) ou divergência (valores positivos) do vento nos níveis médios e baixos.

- Advecção de vorticidade e temperatura: Segundo Holton (2012) a advecção de uma variável pode ser calculada mediante a fórmula:

$$\text{Adv } A = -\vec{V} \cdot \nabla A = -u \frac{\partial A}{\partial x} - v \frac{\partial A}{\partial y} = -\frac{u}{a \cdot \cos \varphi} \frac{\partial A}{\partial \lambda} - \frac{v}{a} \frac{\partial A}{\partial \varphi} \quad (2)$$

sendo A a variável advectada

- Divergência de fluxo de umidade: Pode ser calculada pela seguinte fórmula (HOLTON, 2012):

$$\nabla \cdot (q\vec{V}) = \frac{1}{a \cdot \cos \varphi} \frac{\partial (qu)}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial (qv)}{\partial \varphi} \quad (3)$$

sendo q a umidade específica do ar. Para calcular a divergência do fluxo de umidade integrado na vertical entre 1000 hPa e 300 hPa foi usada a fórmula:

$$\frac{\text{Int_div}(q\vec{V})}{\delta A} = \int_0^z \rho \nabla \cdot q\vec{V} \delta z = -\frac{1}{g} \int_{P_s}^P \nabla \cdot q\vec{V} dp = \frac{1}{g} \int_P^{P_s} \nabla \cdot q\vec{V} dp \quad (4)$$

- Índice termodinâmico K: Segundo George (1960), é calculado por:

$$K = T_{850} + Td_{850} - T_{500} - (T_{700} - Td_{700}) \quad (5)$$

sendo T a temperatura do ar e Td a temperatura de ponto de orvalho nos níveis (em hPa) indicados em subscrito.

- Índice termodinâmico TT (MILLER, 1972):

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2T_{500} \quad (6)$$

Estes campos meteorológicos foram gerados mediante a ferramenta de visualização Linguagem de Comandos do NCAR (*NCAR Command Language*, NCL). Dentre as ferramentas de trabalho para manipular e visualizar dados atmosféricos, o NCL tem se mostrado uma ferramenta altamente poderosa com suas diversas funções, scripts e uma variedade de opções disponíveis no site para manipular e visualizar dados dos mais variados formatos. É um software grátis que facilita sua ampla divulgação no meio científico, desenvolvido pelo *Computational & Information Systems Laboratory*, pertencente ao *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) e permite a criação de gráficos de alta qualidade, personalizados com centenas de recursos gráficos (DOS SANTOS, 2018).

3.3 Modelagem numérica

3.3.1 Modelo e dados

Para fazer as simulações foi utilizado o modelo de previsão numérica WRF, tendo como principal objetivo realizar uma análise o mais acertada possível, numa escala regional e com menor espaçamento de grade, das condições atmosféricas associadas ao caso de chuva extrema acontecido em dezembro de 2011 no estado de MG. Cada simulação teve um total de 8 dias (192 horas), começando no dia 13 de dezembro de 2011 às 00 UTC e concluindo no dia 21 de dezembro de 2021 às 00 UTC, para conseguir determinar os principais mecanismos vinculados ao início e desenvolvimento desse episódio de ZCAS na região.

A versão do WRF utilizada neste trabalho é a 4.0, cuja descrição dos aspectos físicos e operacionais do modelo é apresentado no “*ARW User’s Guide*” (WANG et al., 2019) (disponibilizado no site https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V4/WRFUsersGuide.pdf).

Os dados em ponto de grade utilizados são dados de análise do *Global Forecast System* (GFS), escolhidos com o objetivo de tentar ajustar o modelo com dados de reanálise de fácil acesso e com confiabilidade assegurada. O GFS é um modelo de previsão do tempo produzido pelo *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), que pertence ao *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e permite analisar e reproduzir as condições atmosféricas existentes a escala global. Esses dados foram obtidos do *Computational and Information Systems Laboratory*

(CISL) pertencente ao *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), pelo link <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>. Possuem 26 níveis na vertical, com 4 horários diários disponíveis (00, 06, 12, 18 UTC) e resolução horizontal de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

3.3.2 Domínios e parametrizações

Os dois domínios utilizados (Figura 4) para a modelagem das condições atmosféricas apresentam 18 km e 6 km de espaçamento de pontos de grade, respectivamente, estando eles centralizados aproximadamente sobre a região metropolitana de Belo Horizonte. Foram realizados um total de 6 experimentos numéricos, como descritos na Tabela 1, com o objetivo principal de observar o comportamento, no primeiro caso, das duas parametrizações de microfísica de nuvens de melhor comportamento na região da América do Sul (*Thompson aerosol-aware* e *Morrison double-moment scheme*), além de uma terceira com processos físicos na gotícula de chuva mais simples (*ETA microphysics*). As parametrizações de microfísica de nuvens são as que determinam de uma forma mais significativa um melhor desempenho do modelo na hora de simular eventos de chuvas intensas (IM et al., 2013; ALMEIDA e MARTON, 2014).



Figura 4: Domínios utilizados com espaçamentos de grade de 18 km e 6 km, respectivamente, centralizados sobre a região metropolitana de Belo Horizonte.

Tabela 1: Conjunto de experimentos para testar o comportamento de várias parametrizações de microfísica de nuvens.

Conjunto	Experimento	Microfísica de nuvens	Spectral Nudging
A	EXP 1	<i>ETA microphysics</i>	Não
	EXP 2	<i>Morrison double-moment scheme</i>	
	EXP 3	Thompson aerosol-aware	
B	EXP 4	<i>ETA microphysics</i>	Sim
	EXP 5	<i>Morrison double-moment scheme</i>	
	EXP 6	Thompson aerosol-aware	

Já no segundo conjunto de experimentos e para cada uma das parametrizações usadas no primeiro caso, foi utilizado o método de relaxação espectral (*spectral nudging*) para verificar o comportamento da atenuação dos erros na diminuição de escalas, além de observar o desempenho desse método na hora de simular um evento de ZCAS. As restantes parametrizações do modelo (Tabela 2) inicialmente foram comuns para todos os experimentos, devido a que na hora de simular eventos de precipitação são menos determinantes quando comparadas com a microfísica de nuvens (PADILHA, 2011).

Tabela 2: Conjunto de parametrizações fixas usadas em cada experimento.

Tipo de parametrização	Opção
Radiação de onda longa	<i>Rapid Radiative Transfer Model</i>
Radiação de onda curta	<i>Dudhia scheme</i>
Camada superficial	Esquema de camada superficial MM5 revisado
Superfície terrestre	<i>Noah Land Surface Model</i>
Camada limite planetária	<i>Yonsei University scheme</i>
Parametrizações cúmulos	<i>Multi-scale Kain-Fritsch scheme</i>

3.4 Método de relaxação newtoniana

O processo de relaxação newtoniana, também denominado *spectral nudging*, é usado como uma técnica de downscaling dinâmico para reter todas as informações de grande escala dos campos de acionamento e adicionar informações de menor escala que os campos de acionamento “grosseiros” não podem resolver (HUANG et al., 2021). A técnica normalmente é usada em simulações atmosféricas, com o objetivo de otimização no processo de configuração do modelo, evitando que os resultados simulados se distanciem demasiadamente das observações. Em uma aplicação de relaxação, tal processo pode ser feito tanto no tempo quanto no espaço. No modelo WRF, o *nudging* no espaço segue as etapas descritas por Stauffer e Seaman (1990), detalhados na documentação técnica do modelo por Skamarock et al., (2008). Uma aplicação espacial de *nudging* em pontos de grade é implementada no modelo a partir da seguinte formulação:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = F_{\theta} + G_{\theta} W_{\theta} (\theta_0 - \theta) \quad (7)$$

onde F_{θ} representa a solução numérica do modelo dada por seus sistemas físicos e dinâmicos, G_{θ} trata de um termo que controla a força da aplicação da relaxação, W_{θ} representa um fator peso utilizado para implementar restrições ao processo de aplicação do *nudging*, e θ_0 é o campo de referência interpolado para a grade do modelo, para o qual as soluções numéricas são aproximadas. O modelo WRF apresenta várias maneiras de controlar o processo de aplicação da relaxação newtoniana, sendo os mais importantes:

1. Duração da aplicação e período de decaimento: a aplicação da técnica pode ser interrompida durante a simulação. No entanto, uma vez que o desligamento abrupto da metodologia pode suscitar a geração de erros, esse processo de desligamento pode ser feito gradualmente;
2. Intensidade: vinculada à escala temporal do processo de aplicação da relaxação e pode ser controlada para cada variável que se deseja relaxar. O valor $0.0003s^{-1}$ é comumente utilizado, o que corresponde a aproximadamente uma hora. Para aplicações de longo período, trata-se de uma intensidade bastante elevada;

3. Localização vertical: a metodologia pode ser aplicada em apenas alguns níveis do modelo. Tal opção é importante uma vez que as condições iniciais tipicamente utilizadas (reanálises) encontram-se em escalas muito distintas das grades numéricas e adequado permitir que as próprias parametrizações do modelo representem os processos de interação com a superfície, especialmente em regiões com topografia complexa;
4. Aninhamento: o modelo também oferece controle sobre quais grades terão suas soluções relaxadas. O único fator que deve ser comum a todas as opções de aninhamento consiste no período de decaimento.

Já uma aplicação de relaxação espectral é bastante similar ao procedimento descrito anteriormente. Sua formulação inclui um termo referente a um filtro espectral, utilizado tanto na direção zonal quanto na meridional, na relação descrita na equação (7):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = F_{\theta} + G_{\theta} W_{\theta} F_{xy} (\theta_0 - \theta) \quad (8)$$

em que o termo F_{xy} representa o filtro espectral e restringe a aplicação do *nudging* a um número de onda de corte. O processo de aplicação dessa variação do método segue os seguintes passos, descritos em Gómez e Miguez-Macho (2017):

1. Cada linha do campo dado pelas diferenças entre as soluções numéricas e as referências ($\theta_0 - \theta$), é convertida para o domínio da frequência através do cálculo de uma transformada rápida de Fourier;
2. Frequências cujos números de onda correspondem ao valor de corte são anulados;
3. Os coeficientes restantes são novamente convertidos para o domínio espaciotemporal e a operação do *nudging* é retomada.

Esses passos foram seguidos para cada linha e cada coluna dos campos escolhidos na aplicação do método. O filtro espectral F_{xy} foi o responsável por anular frequências que se encontram acima do número de onda de corte e isso garante com que apenas alguns comprimentos de onda sejam utilizados no procedimento.

Gómez e Miguez-Macho (2017) demonstram que, para números de onda equivalentes à maior frequência de corte possível, o filtro F_{xy} passa a incorporar todo o espectro e, assim, seu cálculo equivale a utilização da relaxação clássica nos pontos de grade. Os autores apresentam resultados que corroboram a ideia de que tanto a utilização da relaxação em todo o espectro (procedimento clássico em pontos de grade) quanto a não utilização de qualquer técnica de relaxação oferecem soluções extremas de aplicações espectrais.

3.5 Índices Estatísticos de Desempenho

Para a avaliação da precipitação simulada pelo modelo WRF, com os resultados obtidos da saída de cada simulação, foram calculados índices estatísticos de verificação quantitativa de precipitação, os quais são propostos e utilizados por diversos autores, destacando os casos de (KULIGOWSKI, 2002; WILKS, 2006; TARTAGLIONE, 2010). Esses índices são baseados numa tabela de contingência 2x2 (SCHAEFER, 1990; WILKS, 2006), conforme a Tabela 3. Nela cada elemento (a,b,c,d) contém a informação da ocorrência ou não do evento pela simulação do modelo e pela observação, avaliada a partir de limiares de chuva, os quais construíram-se utilizando os propostos por Chou e Justi (1999), que por sua vez são os mesmos utilizados no NCEP, em milímetros: 0,3; 2,5; 6,4; 12,7; 19,0; 25,4; 38,1 e 50,8. Dessa forma foi feita a tabela de contingência para cada um desses limiares.

Neste caso os elementos da tabela de contingência têm a seguinte interpretação:

a - Quantidade de vezes nas quais foi prevista e observada chuva igual ou acima do limiar;

b - Quantidade de vezes nas quais foi prevista e não observada chuva igual ou acima do limiar;

c - Quantidade de vezes nas quais não foi prevista e foi observada chuva igual ou acima do limiar;

d - Quantidade de vezes nas quais não foi prevista nem observada chuva igual ou acima do limiar.

A distribuição conjunta de previsões e observações é de interesse fundamental com respeito à verificação de previsões. Tomando o conjunto de previsões por y_i ,

$[y_i, i=1,2,\dots,I]$ e o conjunto de observações correspondente por $o_j [o_j, j=1,2,\dots,J]$, a probabilidade conjunta das previsões e observações é dada por

$$P\{y_i, o_j\} = P\{y_i|o_j\}; \quad i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J. \quad (9)$$

Tabela 3 - Tabela de contingência 2x2

PREVISTO	OBSERVADO	
	SIM	NÃO
SIM	a (acertos "SIM")	b (alarme falso)
NÃO	c (erros)	d (acertos "NÃO")

Fonte: Adaptado de Wilks (2006)

No caso da tabela de contingência 2x2, $I=J=2$, sendo y_1 a previsão correta, y_2 a previsão errada, o_1 o fenômeno observado e o_2 o não observado. Com base nesta tabela, os índices estatísticos de verificação utilizados neste trabalho são os seguintes:

3.5.1 Razão de Alarme Falso (*False Alarm Ratio – FAR*)

A Razão de Alarme Falso é a probabilidade de um evento não ter sido observado e ter sido previsto ($P\{o_2, y_1\}$), também conhecido como Alarmes Falsos. Os valores típicos do FAR estão entre 0 e 1, sabendo que quanto mais próximo for o valor de 1, pior é a previsão de chuva. Uma previsão perfeita vai ter FAR=0.

$$FAR = \frac{b}{a+b} = P\{o_2, y_1\} \quad (10)$$

3.5.2 Probabilidade de Detecção (*Probability of Detection - POD*)

A POD é a probabilidade de um evento ter sido previsto e ao mesmo tempo observado ($P\{y_1, o_1\}$), resultando no desempenho de detecção da chuva. A POD assume valores entre 0 e 1, com $POD < 1$ indicando que a simulação não representou algumas ocorrências que haviam sido observadas. $POD = 1$ indica que a simulação detectou todas as ocorrências observadas. A POD não diz nada em relação aos

eventos simulados que não foram observados, sendo então melhor utilizado em conjunto com o FAR.

$$POD = \frac{a}{a+c} = P\{y_1, o_1\} \quad (11)$$

3.5.3 VIÉS (*BIAS*)

O índice VIÉS não é uma medida de precisão, mas, sim, uma razão simples das previsões de chuva com as chuvas observadas. O VIÉS assume valores maiores ou iguais a 0, com o valor de 1 indicando o índice perfeito. VIÉS < 1 indica menor frequência de chuva produzida pela simulação em relação ao observado, enquanto VIÉS > 1 indica mais pontos de chuva simulados em relação ao observado.

$$VIES = \frac{a+b}{a+c} \quad (12)$$

3.5.4 *Equitable Threat Score (ETS)*

O índice ETS (também chamado de Gilbert Skill Score) é largamente utilizado na verificação da previsão de chuva, utilizando uma sequência de limiares (YANG e TUNG, 2003; RUIZ et al., 2009; TARTAGLIONE, 2010) e sendo derivado do Threat Score (TS), também conhecido como Critical Success Index. Segundo OLIVEIRA (2014) o ETS vem sendo utilizado extensivamente no NCEP como o principal índice para a verificação do desempenho da previsão da precipitação e ele varia entre -1/3 e 1, sendo melhor o desempenho da previsão quanto mais próximo o índice estiver de 1. O ETS é definido como:

$$AT = \frac{P \cdot O}{N} \quad (13)$$

$$ETS = \frac{a-AT}{P+O-a-AT} \quad (14)$$

sendo AT o termo de acertos aleatórios, P o número de ocorrências de chuva prevista, O, o número de ocorrências observadas e N o número total de pontos avaliados.

4 Resultados

4.1 Análise em Escala Sinótica e Local

No período de 13 a 20 de dezembro de 2011, algumas cidades do estado de MG registraram acumulados de precipitação muito elevados (Figura 5), com o maior valor diário na estação meteorológica de Florestal: 164 mm no dia 17/12. Os maiores registros de chuvas durante todo o período foram obtidos das estações de Florestal (452,6 mm) e Belo Horizonte (415,6 mm).

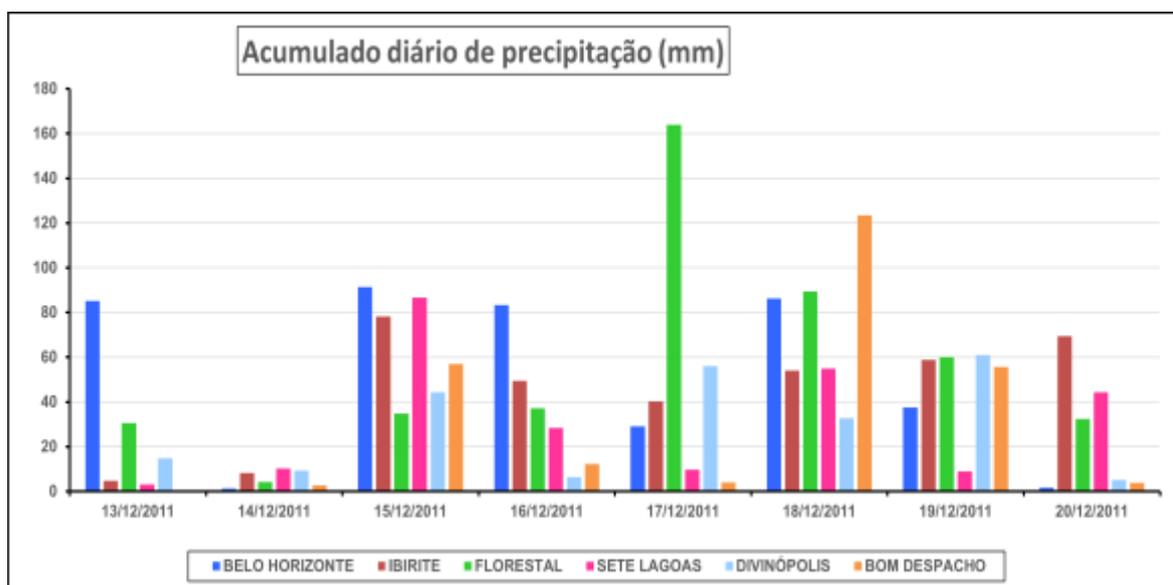


Figura 5: Acumulados diários de precipitação (mm) registrados em estações meteorológicas do estado de Minas Gerais no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

O mês de dezembro de 2011 foi muito chuvoso em todo MG, com acumulados acima da média climatológica em todas as estações meteorológicas (Figura 6), em alguns casos superando o recorde de precipitação existente até esse momento, como por exemplo na estação de Belo Horizonte, onde os 720 mm registrados em 2011 foram superiores ao maior valor acumulado historicamente, que

era de 601,3 mm em 2008, e que até o ano de 2022 ainda continua sendo o maior acumulado no mês de dezembro para a estação meteorológica. Por outra parte, no mês de dezembro de 2011 foi um período com a presença do fenômeno meteorológico La Niña, que apesar de ser um padrão que geralmente não contribui para a ocorrência de eventos extremos de precipitação na região sudeste, durante esse ano foi classificado como de intensidade fraca, o que contribuiu de forma positiva para ocorrência do evento e com valores bem elevados de precipitação. Resultados similares foram obtidos por Grimm e Tedeschi (2004) e Minuzzi et al. (2007).

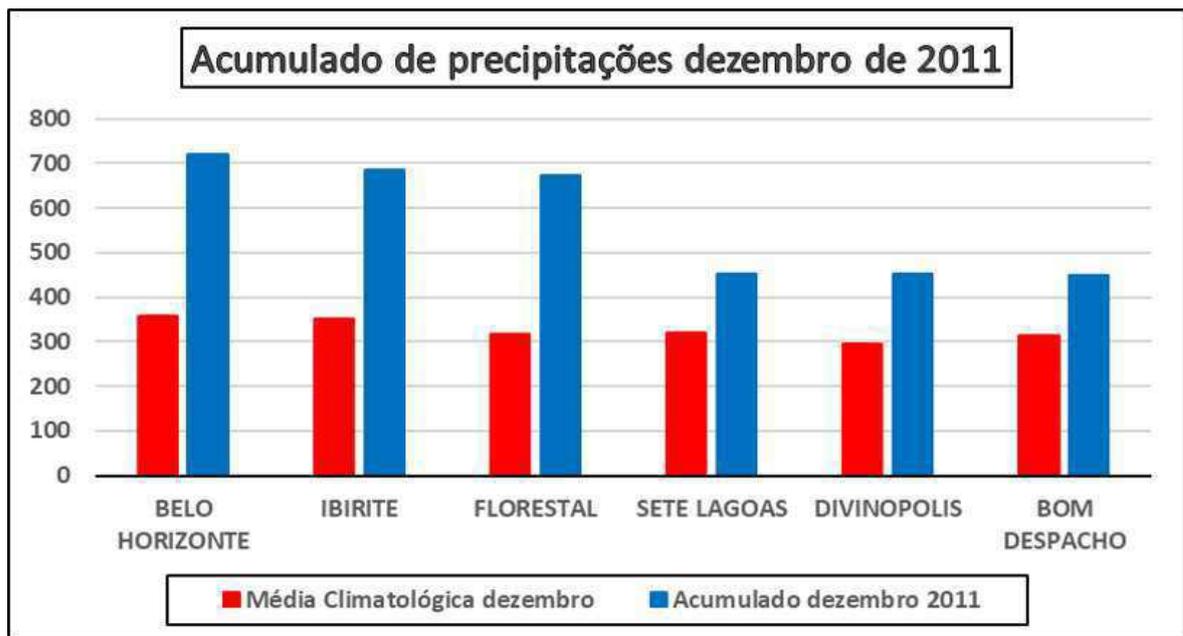


Figura 6: Comparação entre os acumulados de precipitação (mm) registrados em estações meteorológicas do estado de Minas Gerais em dezembro de 2011 (**azul**) e média climatológica dos últimos 30 anos de cada estação para o mês de dezembro (**vermelho**).

Na análise sinótica realizada durante todo o período foi verificada a presença de uma Zona de Convergência do Atlântico Sul bem definida que trouxe como resultado todas essas precipitações. Observando as imagens de satélite (Figura 7) durante todos esses dias é possível verificar a extensa área de nebulosidade com orientação NW-SE evidenciando o transporte de umidade da região amazônica até o Atlântico, que perdurou durante mais do que 4 dias, pelo que já pode ser considerado como ZCAS (KODAMA, 1992).

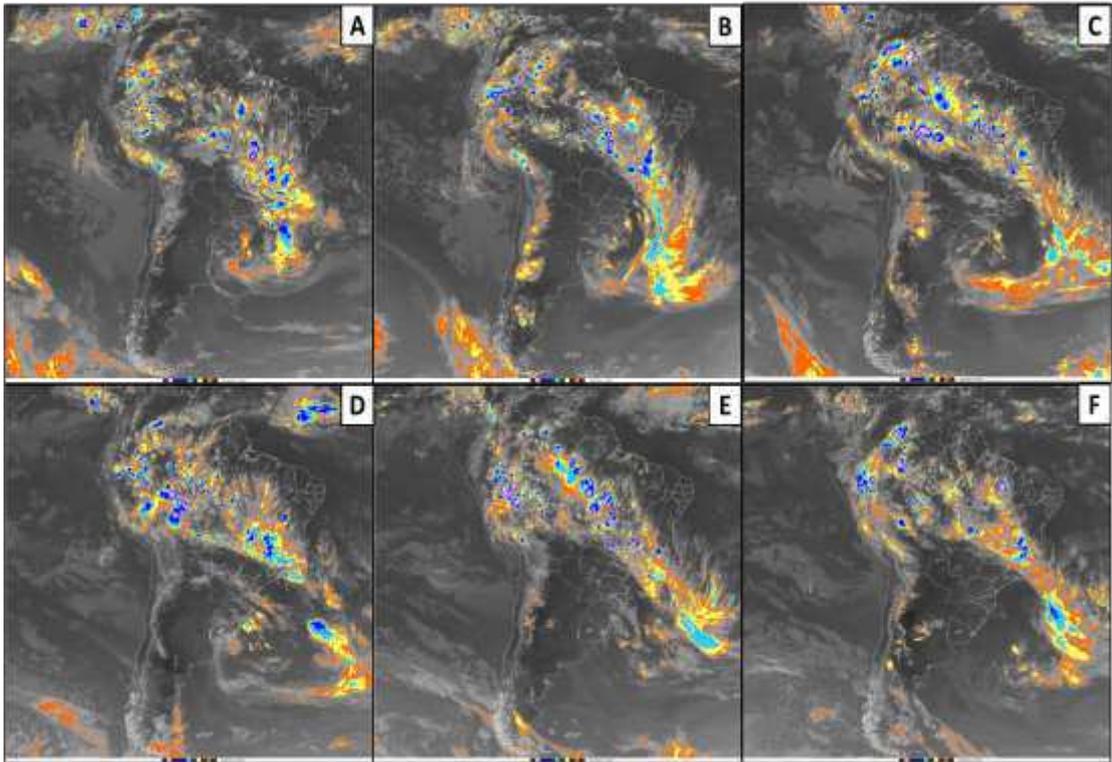


Figura 7: Imagens de satélite do GOES 13 no período de 15 a 20 de dezembro de 2011 às 00 UTC. (A) 15 de dezembro; (B) 16 de dezembro; (C) 17 de dezembro; (D) 18 de dezembro; (E) 19 de dezembro; (F) 20 de dezembro.

Para determinar os mecanismos de maior escala que propiciaram a ocorrência do evento foi calculada a média de cada uma das variáveis estudadas no período de 13 a 20 de dezembro. Dessa forma foi possível observar os motivos principais do surgimento e manutenção do sistema durante todos esses dias. Analisando os mapas de altura do geopotencial em 500 hPa (Figura 8A) observa-se um padrão de um centro de baixa pressão durante todo o período na região sul do Brasil, com o sudeste localizado corrente abaixo desse cavado, contribuindo para toda a instabilidade, e movimentos ascendentes sobre essa área. Em 250 hPa (Figura 8B) é possível ver que o cavado estava muito bem definido também, pelo que pode ser considerado como uma situação sinótica muito favorável, dada a profundidade do sistema durante todo o período. No campo de espessura da camada e PNMM (Figura 8C) se observa uma região de baixas pressões no sul do país, mas nesse caso um pouco menos predominante do que em níveis mais altos. O índice termodinâmico TT apresentou valores acima de 44°C em praticamente toda a região Sudeste do país, o que representa situações favoráveis para a ocorrência de tempestades e chuvas intensas (SILVA DIAS, 2011), um fator fundamental para demonstrar o porquê das chu-

vas serem mais intensas em umas regiões mais do que em outras, por causa da influência em grande medida de mecanismos dinâmicos e termodinâmicos de escala local.

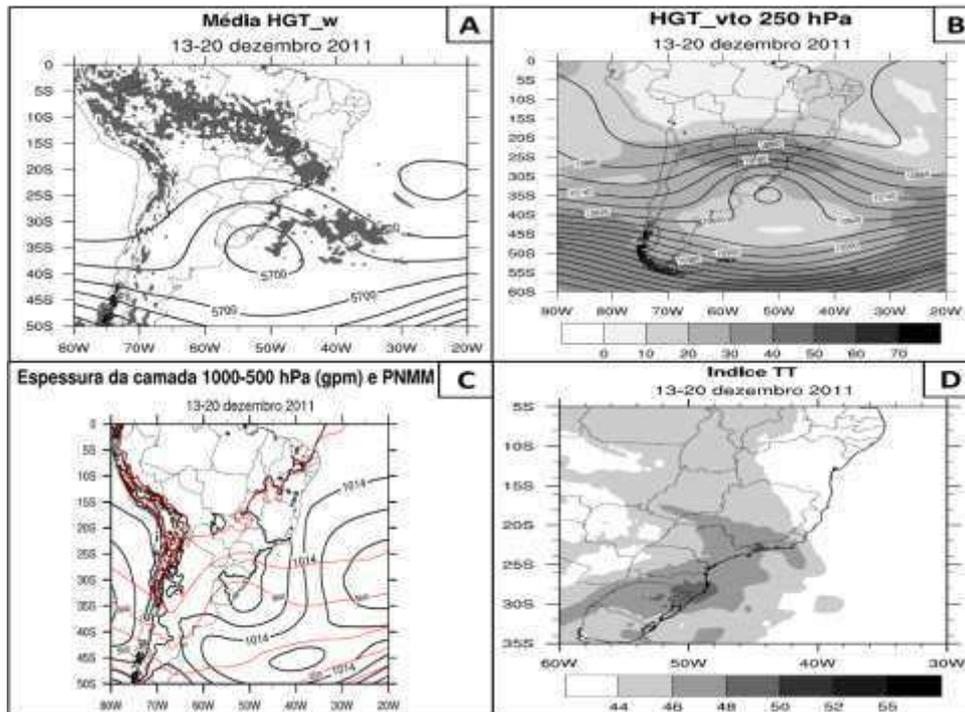


Figura 8: (A) Altura geopotencial (m_gp) e velocidade vertical (Pa s^{-1}) em 500 hPa (apenas movimento ascendente – em cinza); (B) Altura geopotencial (m_gp) e velocidade do vento (m s^{-1}) em 250 hPa; (C) Espessura da camada 1000-500 hPa [isolinhas vermelhas] (m_gp) e PNMM [isolinhas pretas] (hPa) (D) Índice TT ($^{\circ}\text{C}$), durante o período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

A temperatura a 2m da superfície (Figura 9A) não era muito elevada durante o período, porém o fluxo do nordeste indica o transporte de calor e umidade provenientes do oceano, contribuindo para a formação de convecção e instabilidade, como observado na Figura 9B, onde se mostra que o índice K em todo o sudeste brasileiro era superior a 37°C , o que representa um potencial elevado para ocorrência de tempestades severas (NASCIMENTO, 2005; HALLACK e PEREIRA FILHO, 2012). Os valores de divergência do vento em 850 hPa (Figura 9C) e 250 hPa (Figura 9D) não eram muito elevados, mas observa-se uma região de convergência que segundo Holton (2012) são os esperados para fenômenos de escala sinótica.

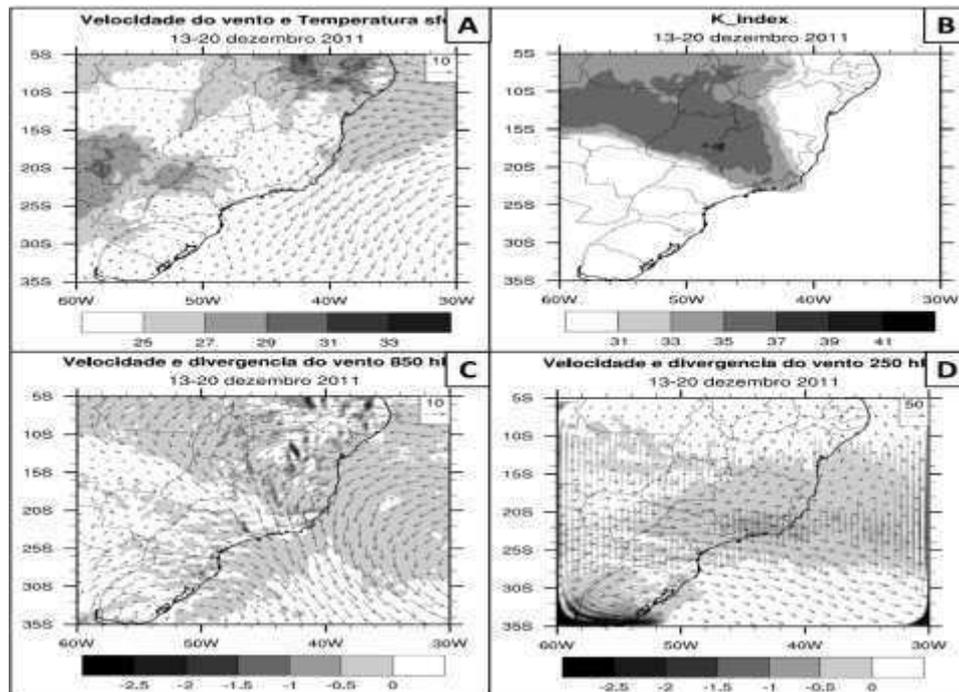


Figura 9: (A) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e vento (m s^{-1}) a 2m sobre a superfície; (B) Índice K ($^{\circ}\text{C}$); (C) Divergência do vento (10^{-5} s^{-1}) e vento (m s^{-1}) em 850 hPa; (D) Divergência do vento (10^{-5} s^{-1}) e vento (m s^{-1}) em 250 hPa durante o período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

Durante esse período se observam valores negativos de convergência de fluxo de umidade tanto em 1000 hPa (Figura 10A) como integrado na camada entre 1000-300 hPa (Figura 10B), que mesmo não sendo muito elevados indicam uma área de convergência, que é considerada como um ingrediente muito importante para a formação e continuidade das chuvas numa região determinada (MORALES e YAMASAKI, 2016). Além disso os valores de advecção de temperatura (Figura 10C) eram elevados nas regiões costeiras do Sudeste, o que significa que o maior gradiente de temperatura, em conjunto com a brisa local existente em horário diurno, contribuiu também a ocorrência das precipitações. No caso da vorticidade relativa no nível de 925 hPa (Figura 10D) não apresentou valores muito significativos, com alguns pontos de vorticidade ciclônica da ordem de magnitude esperada para escala sinótica coincidindo com os locais onde estava existindo maior advecção de temperatura.

Como já comentado, a situação sinótica que gerou toda a quantidade de chuva acumulada durante os 6 dias em grande parte do estado mineiro foi devido à ocorrência de um evento de ZCAS, muito comum durante essa época do ano sobre o sudeste brasileiro. Essa afirmação pôde ser verificada mediante as cartas de superfície elaboradas pelo GPT, as quais confirmam que durante todo o período o

evento esteve presente, como observado na Figura 11. Além dessa situação sinótica, outros fatores tanto climáticos como de escala mais local foram relevantes, como a existência de um evento La Niña com intensidade fraca que permitiu a ocorrência do episódio de chuva intensa.

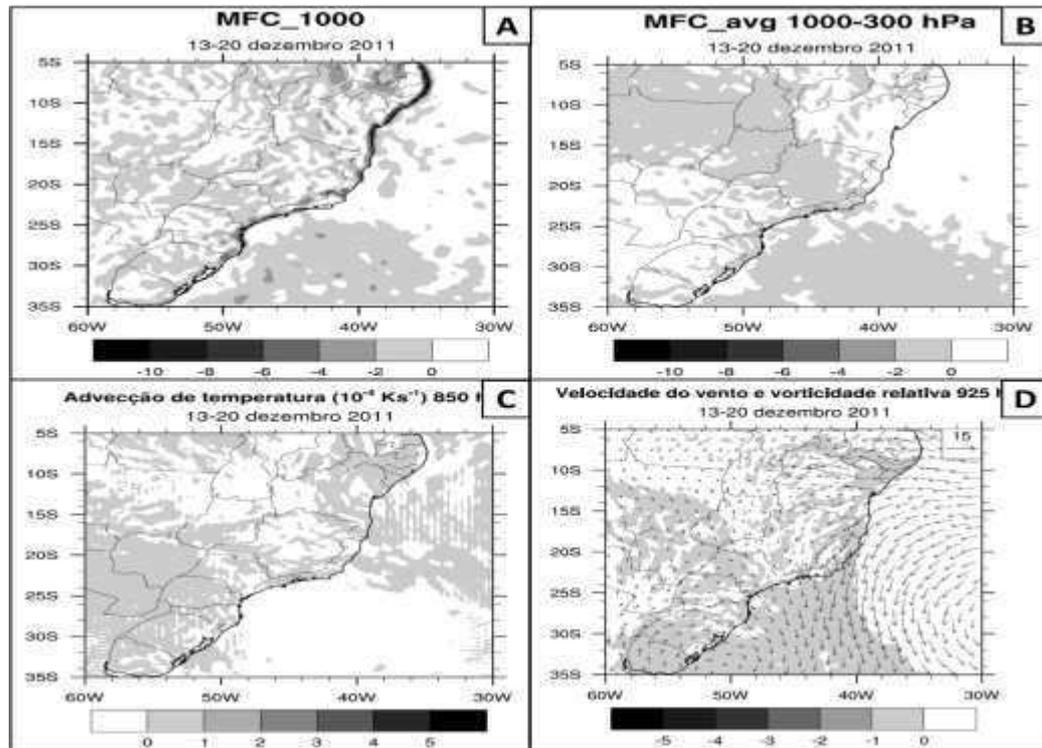


Figura 10: (A) Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 1000 hPa; (B) Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) integrado na camada 1000-300 hPa; (C) Advecção de temperatura (10^{-4} K s^{-1}) em 850 hPa; (D) Velocidade do vento (m s^{-1}) e vorticidade relativa (10^{-4} s^{-1}) em 925 hPa durante o período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

A situação sinótica predominante que permitiu o surgimento e manutenção desse episódio de ZCAS durante vários dias foi a presença bem forte de um ciclone extratropical na região leste do sul do país, fato que contribuiu com uma advecção de ar quente e úmido proveniente da região amazônica, determinando uma forte convergência de massa e umidade sobre todo o sudeste, principalmente sobre o estado de Minas Gerais. Essa forçante dinâmica, combinada com a presença de uma massa úmida e quente, transforma-se em um dos principais mecanismos de levantamento e em consequência de geração de chuvas volumosas sobre a região Sudeste (ESCOBAR e CARVALHO, 2005)

Os resultados são similares com os obtidos por Escobar (2013), que mostra como esse caso particular não coincide com nenhum dos padrões sinóticos que comumente acontecem em eventos de precipitação intensa sobre a região sudeste do

Brasil. Esse tipo de padrão ocorre em aproximadamente 1,4% dos casos observados, o que significa que é bem pouco frequente. No entanto, apesar da sua pouca frequência, é exatamente o que representa uma diferenciação e relevância desse episódio, pelo que se pode comprovar que essa situação atípica contribuiu para a intensificação do sistema e todos os acumulados registrados.

Para analisar o comportamento das condições existentes em menor escala foram utilizadas sondagens efetuadas no aeroporto internacional Tancredo Neves, situado na cidade de BH (Figura 12) entre os dias 15 e 18 de dezembro de 2011, no horário das 12UTC. Foi possível observar que durante todo o período o conteúdo de umidade foi muito elevado em baixos níveis, sendo que nos dias 16 e 17 diminuiu um tanto a partir de 500hPa, coincidindo com os dias de menores acumulados de forma geral (Figura 5), enquanto a Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) apresentava valores bem baixos (só o dia 15 de dezembro teve 2J, o resto foi zero, como mostrado na parte superior da Figura 12). Mota e Nobre (2006) realizaram um estudo da relação da variabilidade da CAPE com a precipitação, concluindo que não necessariamente em eventos de chuvas intensas e/ou persistentes os fatores termodinâmicos intensificam a instabilidade convectiva. Já depois do dia 18 a atmosfera encontrava-se praticamente saturada de umidade em toda a coluna vertical, devido à persistência das chuvas durante vários dias na região.

Por outra parte, é conhecido que o teor de umidade e a estabilidade atmosférica constituem dois parâmetros importantes na caracterização da convecção profunda. A Figura 13 mostra os perfis verticais das temperaturas potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}). Esses perfis permitem extrair informações importantes acerca da distribuição vertical da umidade e grau de instabilidade termodinâmica durante os quatro dias com maiores acumulados registrados (15-18 de dezembro), construídos a partir dos dados das sondagens realizadas em Belo Horizonte. Apesar de valores baixos do CAPE, ao observar as curvas das temperaturas potencial equivalente e equivalente de saturação, percebe-se uma camada profunda convectivamente instável ($\partial\theta_e < \partial Z < 0$) durante todo o período. Nota-se também uma camada condicionalmente instável ($\partial\theta_{es} < \partial Z < 0$) nos dias 15 e 17 de dezembro.

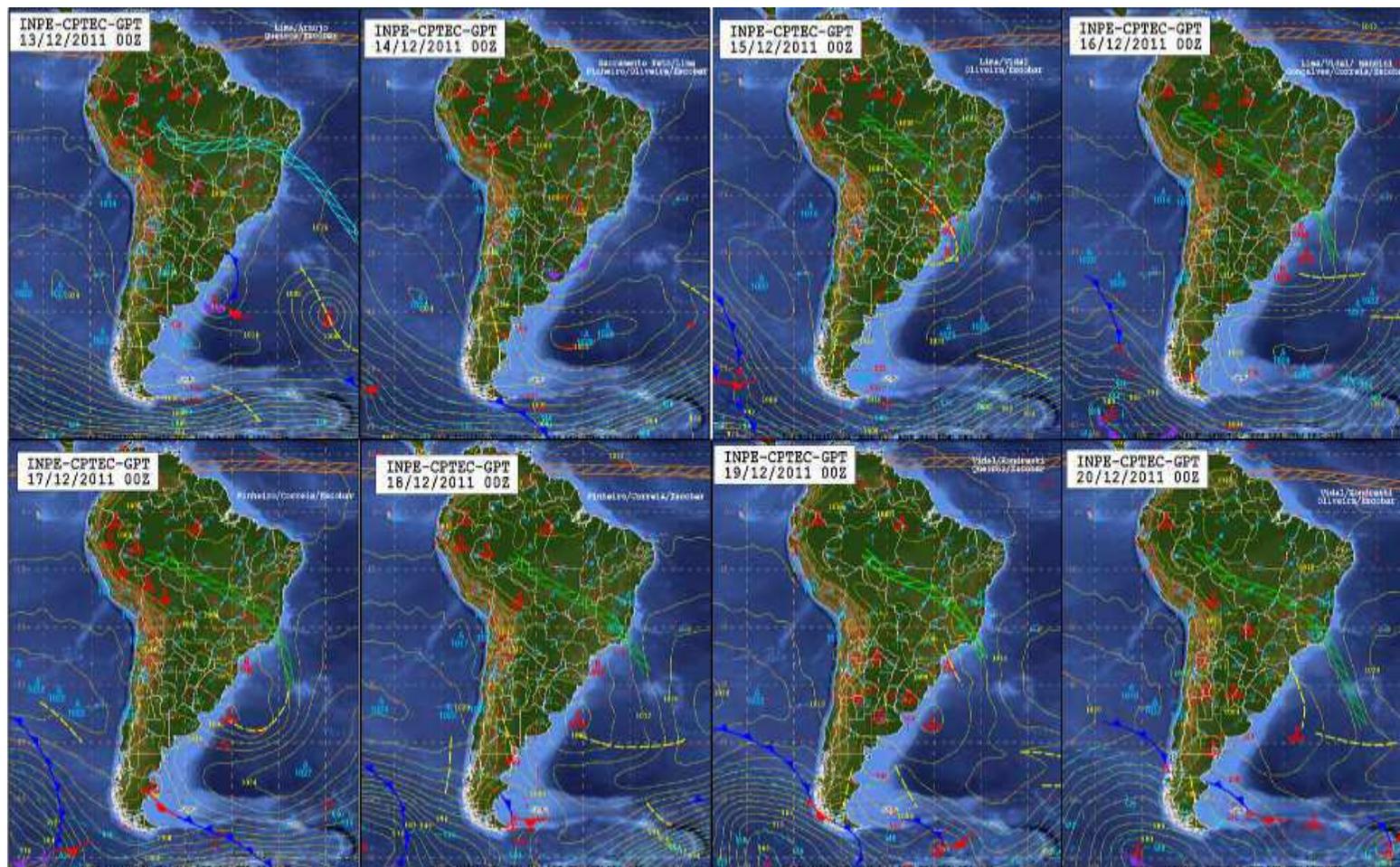


Figura 11: Cartas sinóticas de superfície para o horário de 00 UTC do período de 13 a 20 de dezembro de 2011. (extraído de GPT/CPTEC/INPE).

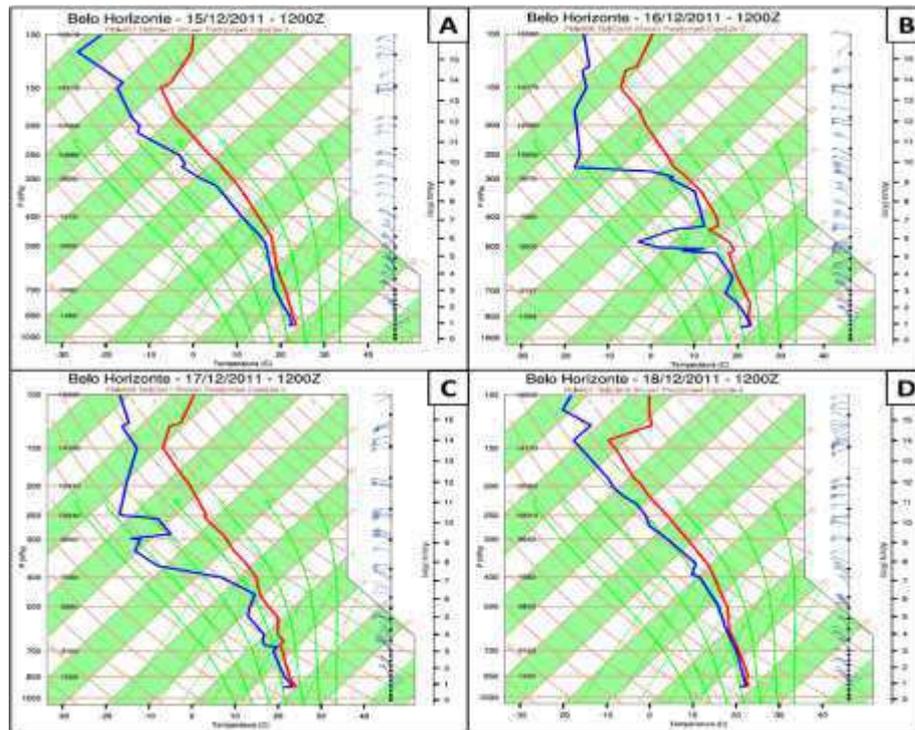


Figura 12: Diagramas termodinâmicos Skew T -log p das sondagens do aeroporto internacional Tancredo Neves (Belo Horizonte) para o horário das 12 UTC dos dias (A) 15 de dezembro de 2011; (B) 16 de dezembro de 2011; (C) 17 de dezembro de 2011; (D) 18 de dezembro de 2011.

Uma característica peculiar e bastante interessante é perceptível nos perfis dos dias 15 e 18 de dezembro. A proximidade de θ_e e θ_{es} , bem como de T e Td na baixa e média troposfera indica uma atmosfera favorável à ocorrência de movimentos convectivos, mesmo com a energia potencial convectiva, pouco acentuada mostram valores marginalmente instáveis, que também coincide com os valores registrados durante todo o período (Figura 5). Resultados semelhantes foram obtidos por Morales e Yamasaki (2016). A convecção organizada em forma de banda, praticamente estacionária (característica típica de ambientes sob atuação da ZCAS), é indício significativo de que a chuva intensa e persistente teve forte influência do acoplamento entre a escala convectiva (aquecimento da atmosfera pela liberação de calor latente) e a grande escala (queda da pressão e intensificação da convergência de vapor nos baixos níveis). Conforme descrito em Silva e Freitas (2015), esse mecanismo é denominado de CISK (Conditional Instability of the Second Kind) ou também conhecido como Instabilidade Condicional de Segunda Ordem.

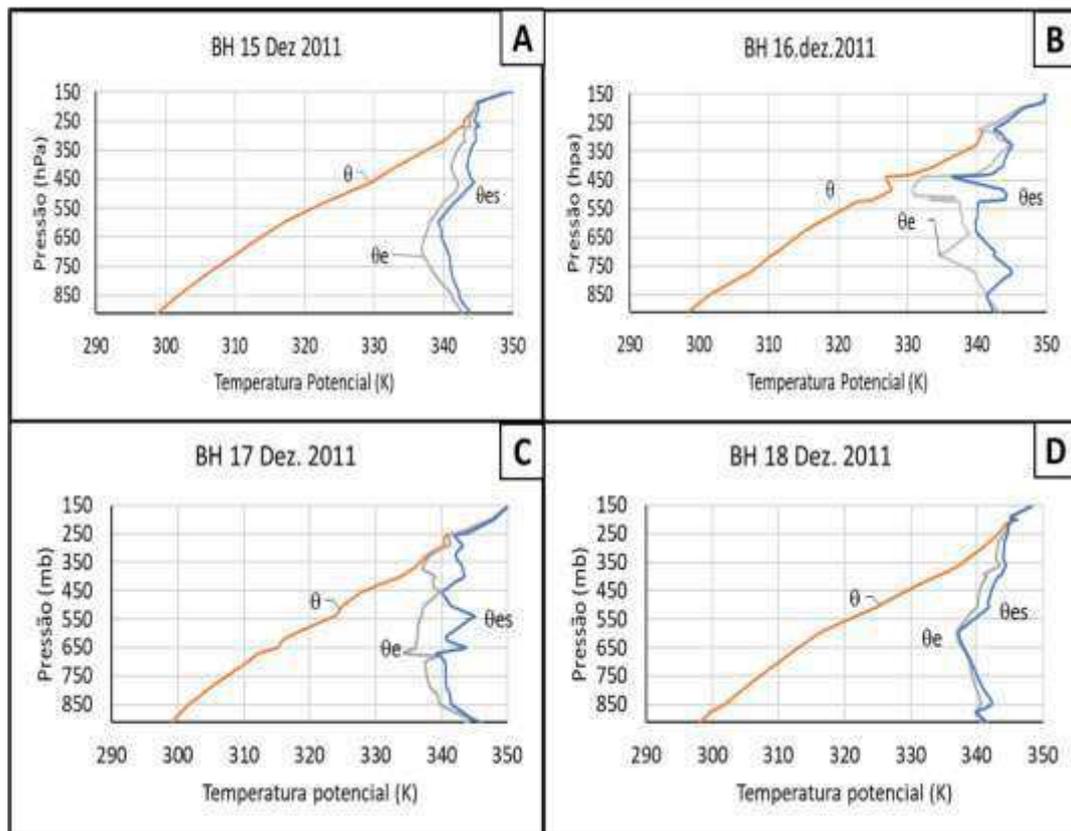


Figura 13: Perfis verticais das temperaturas potencial, potencial equivalente e potencial equivalente de saturação no horário das 12UTC dos dias (A) 15 de dezembro de 2011; (B) 16 de dezembro de 2011; (C) 17 de dezembro de 2011; (D) 18 de dezembro de 2011.

4.2 Simulação numérica do evento

A Figura 14 mostra um mapa com os acumulados diários de forma espacial de todas as estações meteorológicas automáticas e convencionais em toda a região sudeste do Brasil, com o objetivo de comparar de forma visual o comportamento de cada uma das simulações com dados reais de precipitação. Observa-se que os maiores acumulados estiveram registrados entre os dias 15 e 18 de dezembro, o que coincide com a situação sinótica existente, sendo esses os dias de maior intensidade das ZCAS.

Como comentado na metodologia, foram realizados dois conjuntos de simulações do evento de ZCAS, iniciando dia 13 de dezembro de 2011 às 00 UTC e concluindo no dia 21 de dezembro de 2011 às 00 UTC, considerando três parametrizações de microfísica de nuvens diferentes. Além disso, como diferencial e devido à sua importância na hora de simular eventos de chuvas localizados a menor escala, foi usado o método de relaxamento newtoniano na sua variante espectral, para de-

terminar como o modelo se comporta na hora de assimilar dados de reanálise distribuídos a maior escala mantendo os padrões básicos e levar eles de uma forma mais robusta a uma escala bem menor. Dessa forma, foi determinado o melhor desempenho do modelo para o caso específico de um episódio de chuvas intensas e persistentes na região do Alto São Francisco, dada a sua importância para o comportamento hídrico de toda a bacia.

Nas Figuras 15, 16 e 17 observam-se os acumulados diários de precipitação durante o período de 13 a 20 de dezembro de 2011, usando três parametrizações diferentes de microfísica de nuvens. No caso das duas primeiras utilizadas, trata-se das parametrizações com melhores resultados na simulação de eventos de chuva na região sudeste do Brasil (*Morrison 2-mom* e *Thompson aerosol-aware*), entretanto a última (*ETA-Ferrier*) consiste em uma parametrização bem simples, onde a gotícula de água é representada de uma forma pouco complexa e servirá para comparar a importância da microfísica escolhida em eventos desse tipo (ALVAREZ et al., 2019; FERREIRA et al., 2020). Nesse caso foi simulado o evento sem usar o método de relaxação newtoniana na sua variante espectral, para observar os resultados sem o procedimento de suavização de escalas. Analisando os resultados podemos observar que a microfísica com menor grau de complexidade (*ETA-Ferrier*) tem um comportamento de subestimativa do evento, quando comparado com as duas parametrizações mais complexas. Em todos os casos, quando comparado com a situação real, a quantidade de chuva reportada pelas estações meteorológicas (Figura 14), pode se observar o modelo foi capaz de simular o episódio de ZCAS de uma forma satisfatória considerando aspectos importantes. Observam-se claramente maiores acumulados no período de 15 a 18 de dezembro, com uma orientação bem definida típica desse sistema meteorológico de escala sinótica.

Nas Figuras 18, 19 e 20 se observam os acumulados diários no mesmo período, usando o mesmo conjunto de parametrizações de microfísica de nuvens, porém, com aplicação do método de *spectral nudging* para determinar se uma suavização de escala possibilita melhor interpretação na simulação de um evento de ZCAS na região sudeste do Brasil. Os resultados mostram que o modelo foi capaz de fazer uma boa representação das precipitações, tanto espacial quanto temporalmente, sendo que em alguns casos, quando comparados com os obtidos sem uso da técnica de relaxamento newtoniano, observa-se uma menor quantidade de chuva (*Morrison double-moment scheme*), entretanto nos outros dois os valores são maiores na

região central do domínio, coincidindo com a área de maiores acumulados de precipitação.

Como mostrado anteriormente, o dia 15 de dezembro foi o que teve os acumulados de chuva mais uniformemente distribuídos em todas as estações, e a melhor simulação com o modelo WRF. Em outras palavras, o modelo conseguiu representar de forma bastante satisfatória a atividade convectiva mais intensa sobre toda a região. Com o objetivo de analisar detalhadamente o acontecido durante esse dia, e detectar mecanismos responsáveis pela ocorrência das precipitações, as Figuras 21, 22, 23, 24, 25 e 26 mostram o desenvolvimento da tempestade e os acumulados de três em três horas a partir das 06 UTC do dia 15 de dezembro até as 03 UTC do dia 16 de dezembro. Dessa forma é possível observar a evolução do sistema precipitante ao longo do dia, e assim poder definir os horários com maior atividade convectiva e acumulados mais elevados.

Verifica-se como em todos os casos, com todas as parametrizações de microfísica de nuvens utilizadas, e tanto nas simulações usando a técnica de relaxamento newtoniano na sua versão espectral quanto sem ela, o evento foi bem representado de forma espacial e temporal, o que pode também ser verificado comparando com os acumulados diários reportados (Figura 14). Quantitativamente só a parametrização de microfísica de nuvens ETA-Ferrier apresentou valores menores quando comparados com as outras duas parametrizações, confirmando que não é a melhor opção para análises desse tipo de fenômeno.

Nas Figuras também é possível observar como a atividade convectiva permaneceu praticamente bem definida durante todo o período, mas especificamente na região de estudo ocorreu até aproximadamente as 18 UTC, onde começou se deslocar mais para o norte, fazendo com que os acumulados diminuíssem a partir desse momento, o que pode se confirmar com os dados de precipitação das estações automáticas. No caso das simulações usando a técnica de relaxamento newtoniano (Figuras 24, 25 e 26), se observa que a intensidade da atividade convectiva foi melhor representada quando comparada com os resultados obtidos com essas mesmas parametrizações de microfísica de nuvens sem o uso da técnica de *spectral nudging*. Os conglomerados de chuva e os acumulados foram um pouco mais intensos utilizando esse método, pelo que podemos concluir da importância do seu uso em eventos de chuvas intensas para tentar suavizar as escalas e obter melhores resultados nas simulações de casos similares.

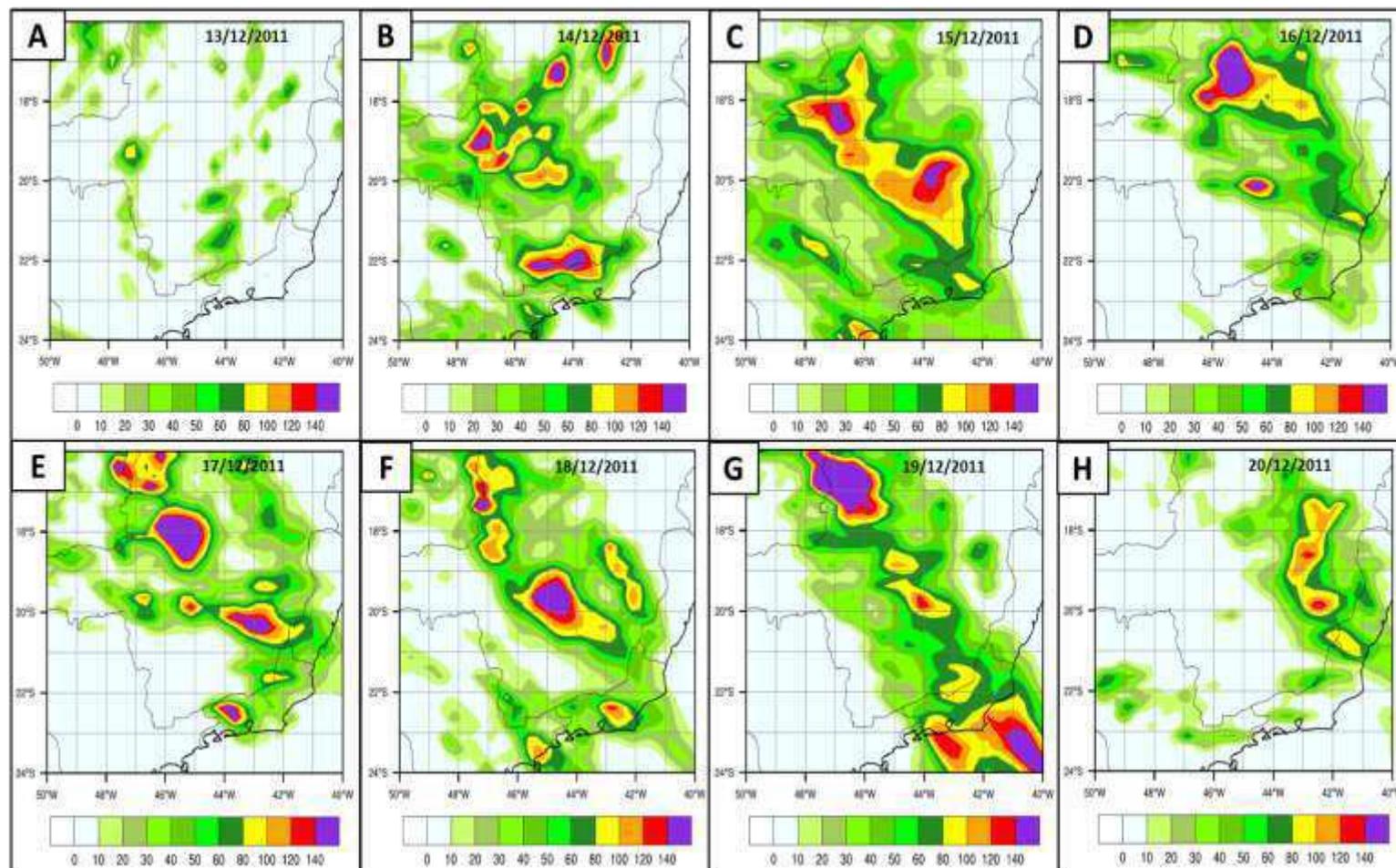


Figura 14: Acumulados diários de precipitação (mm) registrados pelas estações meteorológicas da região e interpolado para todo o domínio durante o período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

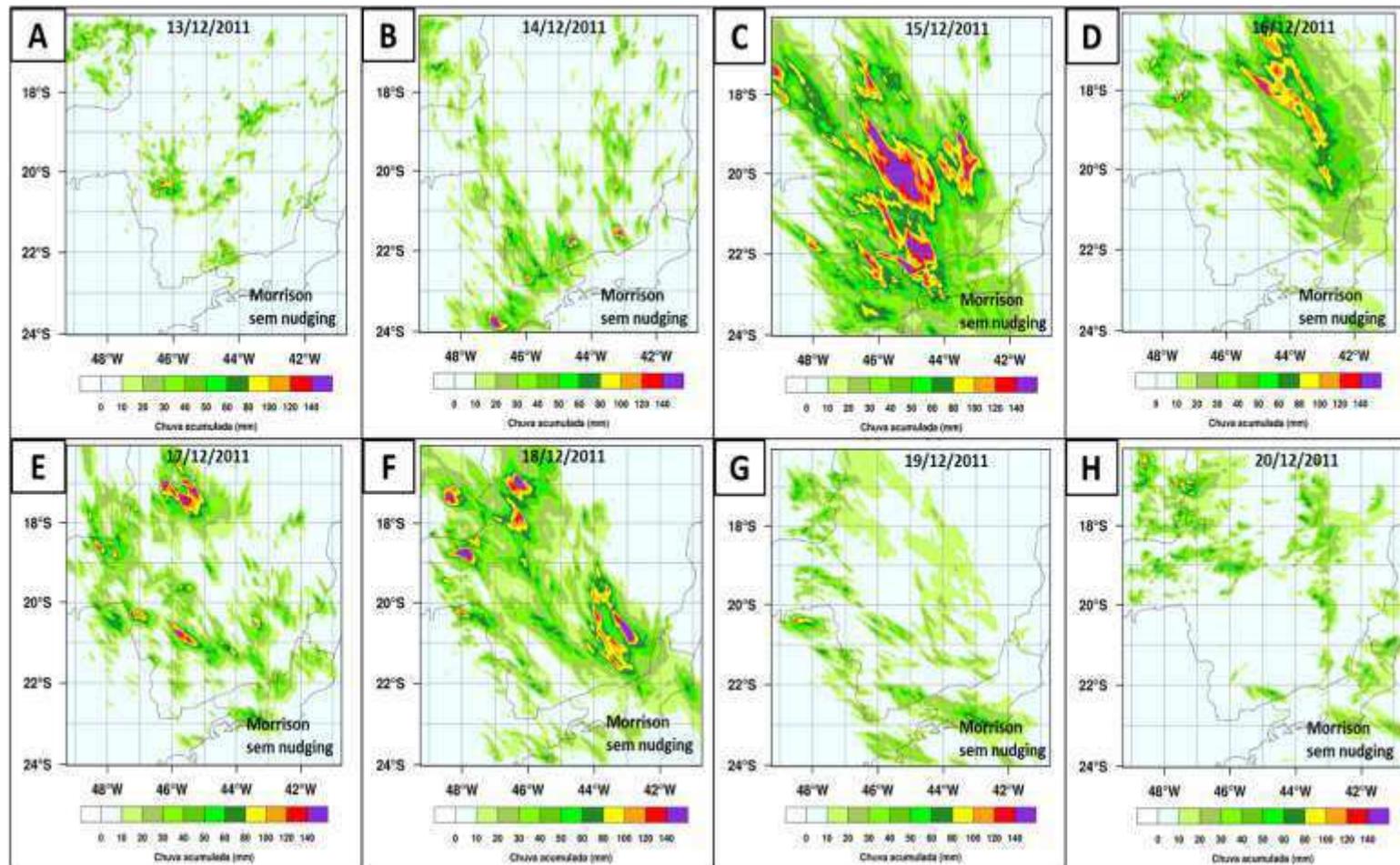


Figura 15: Acumulados diários de precipitação (mm) simulados para o domínio menor (6km) usando a parametrização de microfísica de nuvens *Morrison double-moment scheme* sem aplicação do método de relaxação newtoniana, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

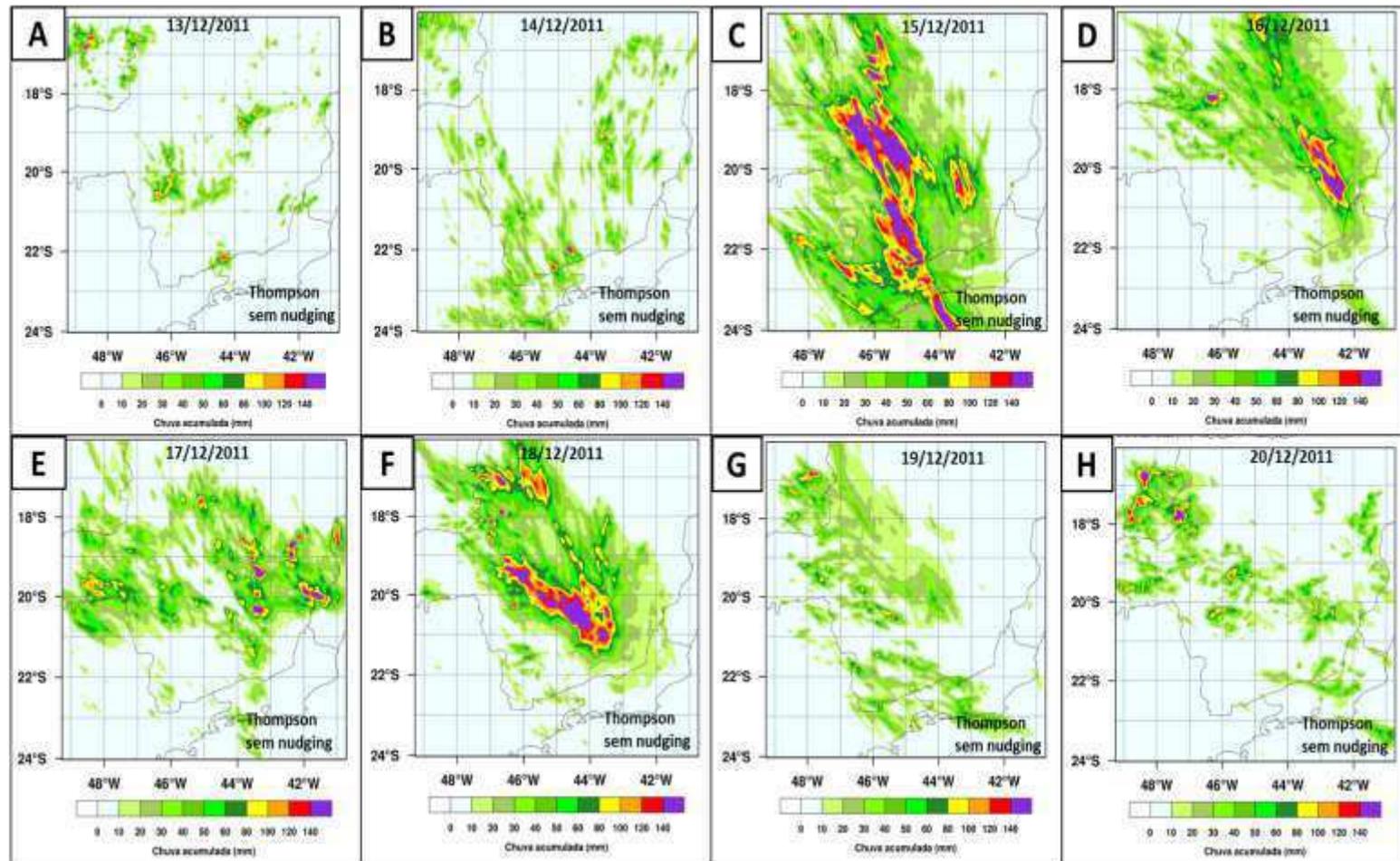


Figura 16: Acumulados diários de precipitação (mm) simulados para o domínio menor (6km) usando a parametrização de microfísica de nuvens *Thompson aerosol-aware* sem aplicação do método de relaxação newtoniana, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

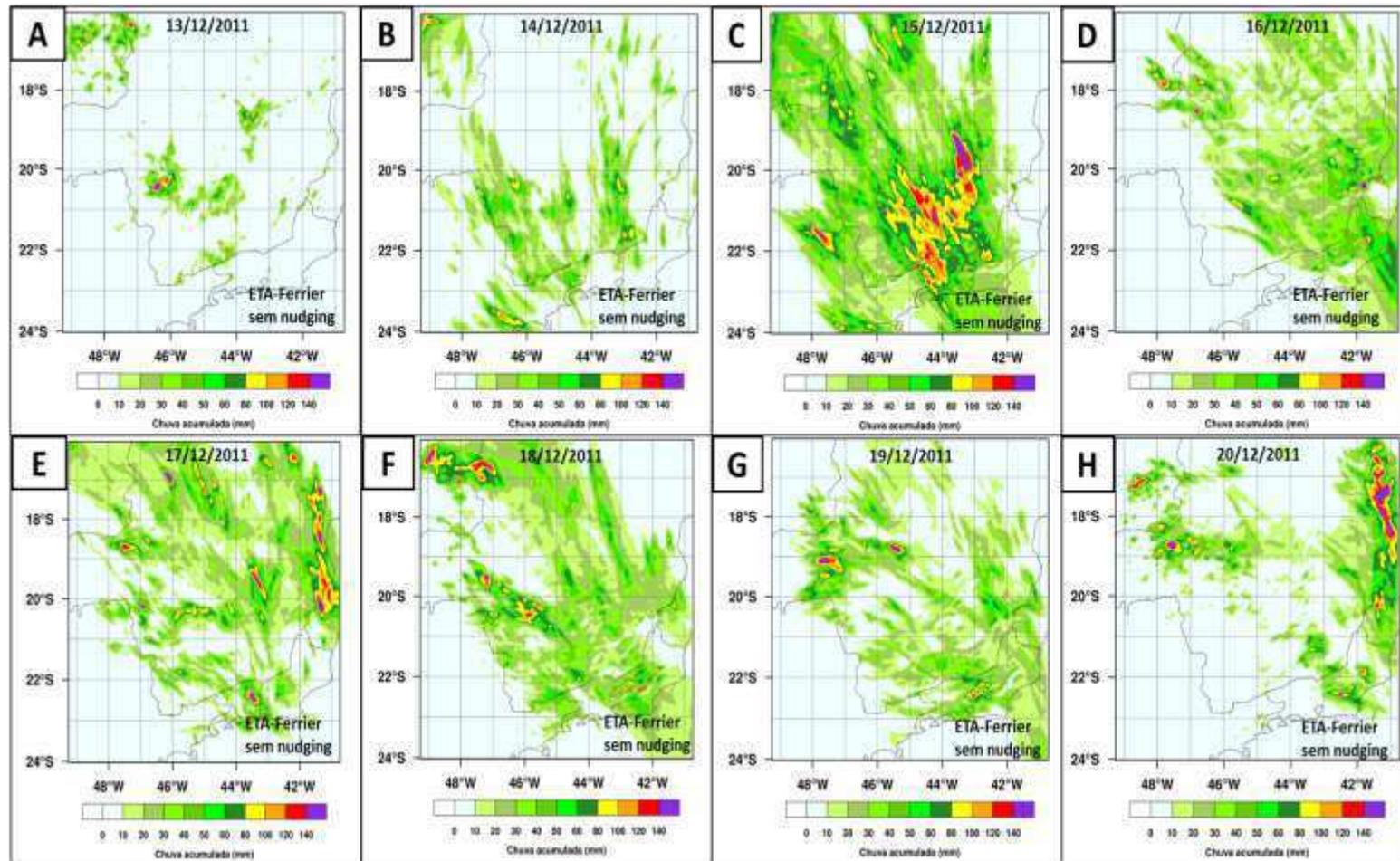


Figura 17: Acumulados diários de precipitação (mm) simulados para o domínio menor (6km) usando a parametrização de microfísica de nuvens ETA-Ferrier sem aplicação do método de relaxação newtoniana, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

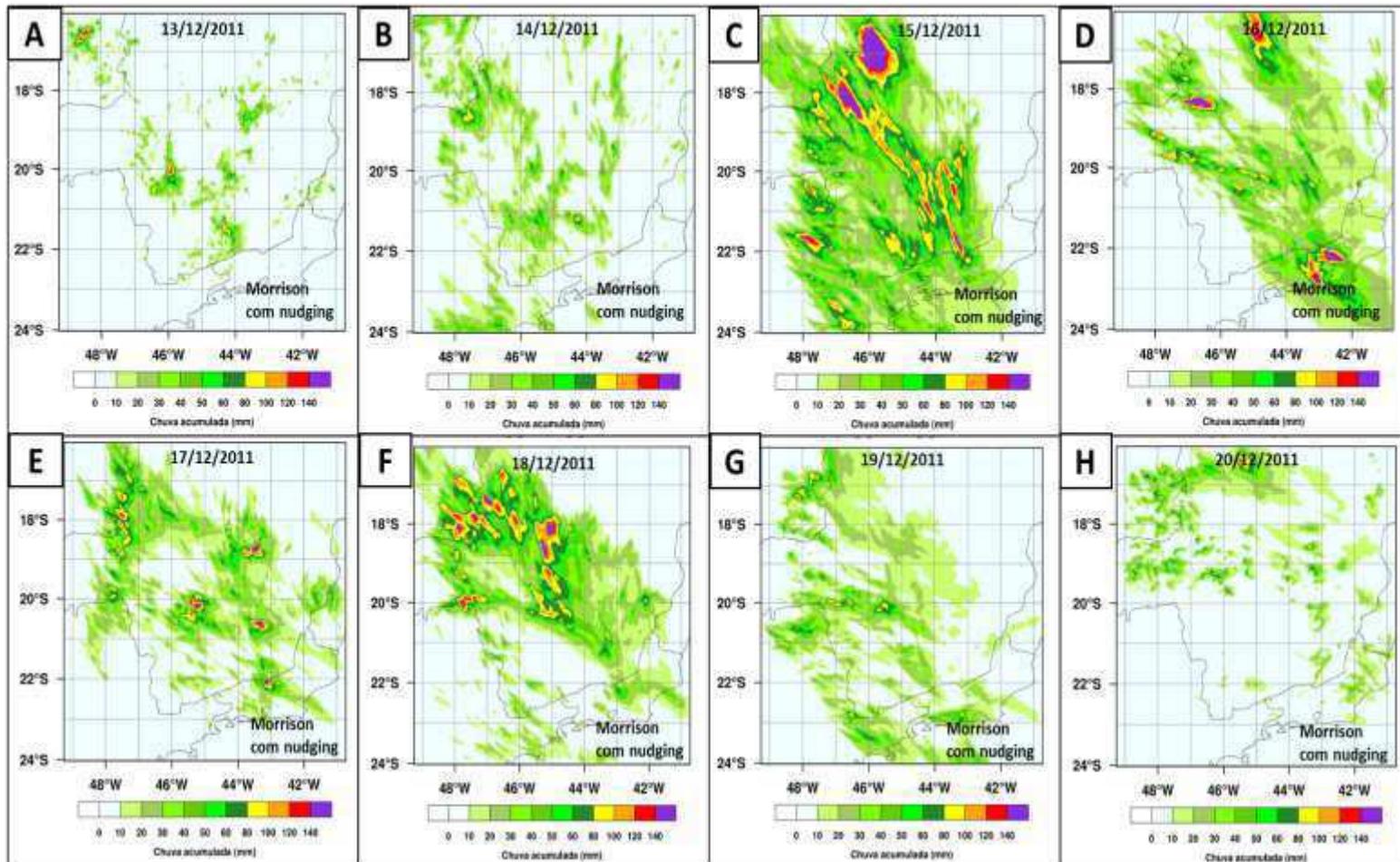


Figura 18: Acumulados diários de precipitação (mm) simulados para o domínio menor (6km) usando a parametrização de microfísica de nuvens *Morrison double-moment scheme* com aplicação do método de relaxação newtoniana, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

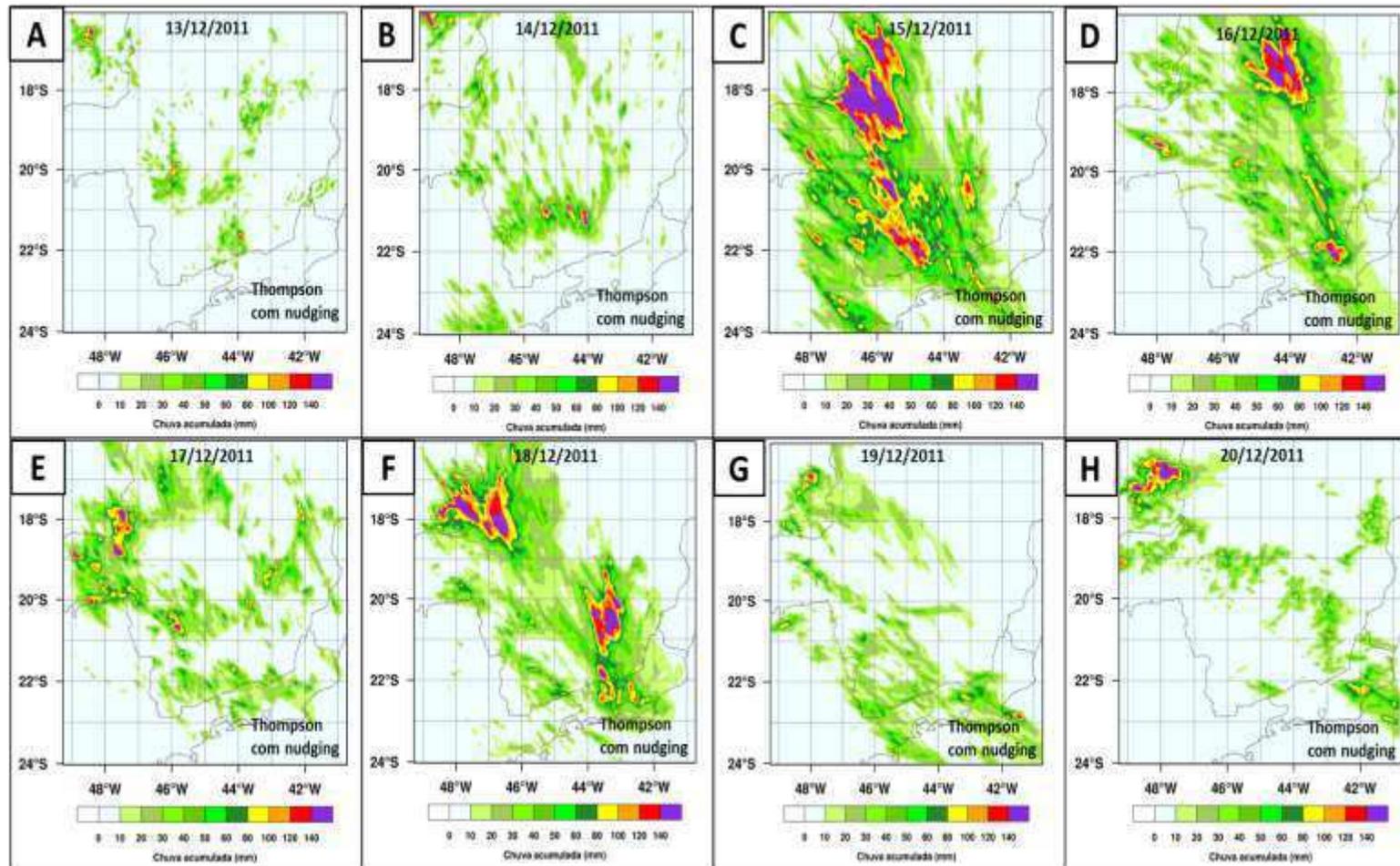


Figura 19: Acumulados diários de precipitação (mm) simulados para o domínio menor (6km) usando a parametrização de microfísica de nuvens *Thompson aerosol-aware* com aplicação do método de relaxação newtoniana, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

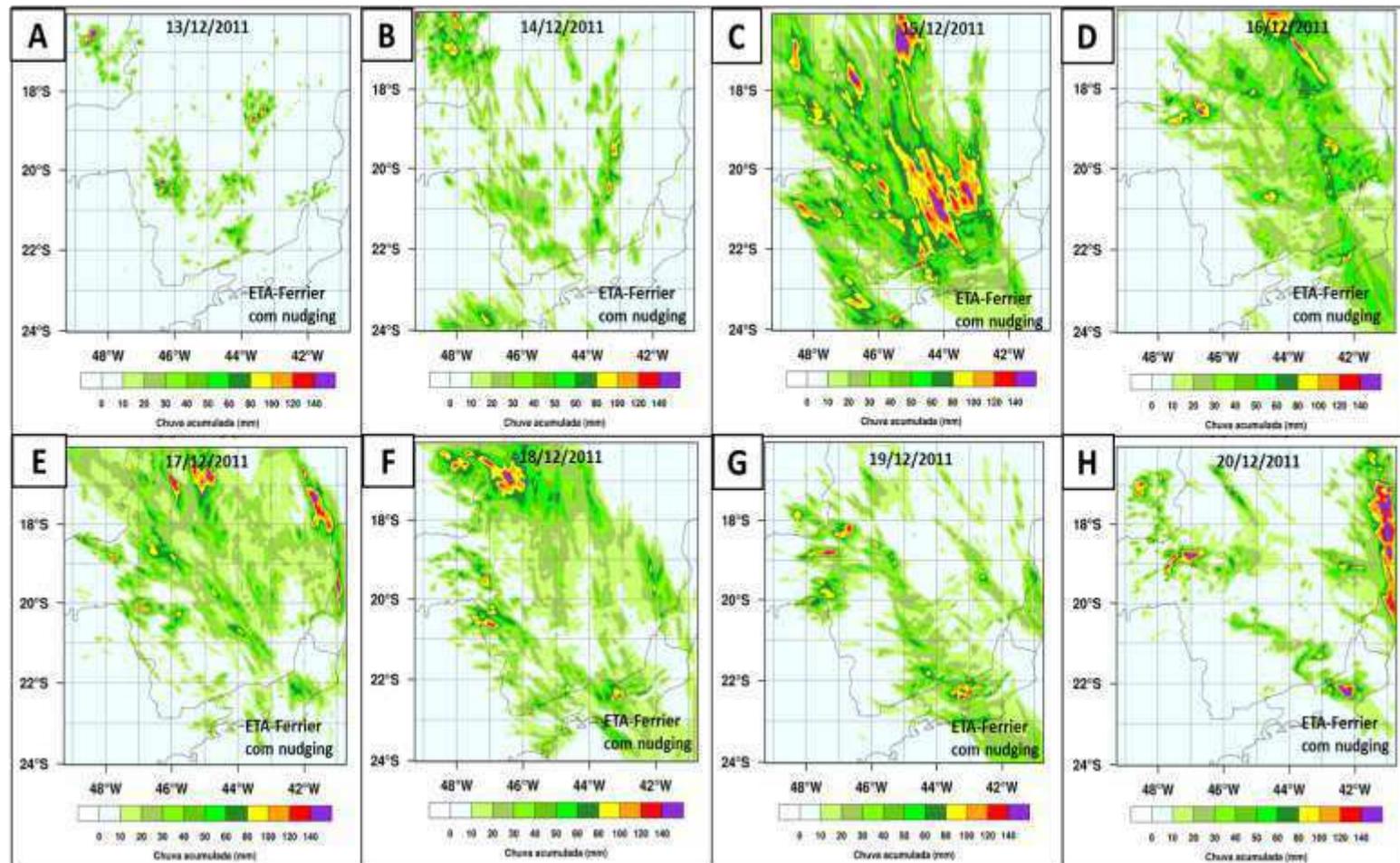


Figura 20: Acumulados diários de precipitação (mm) simulados para o domínio menor (6km) usando a parametrização de microfísica de nuvens *ETA-Ferrier* com aplicação do método de relaxação newtoniana, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

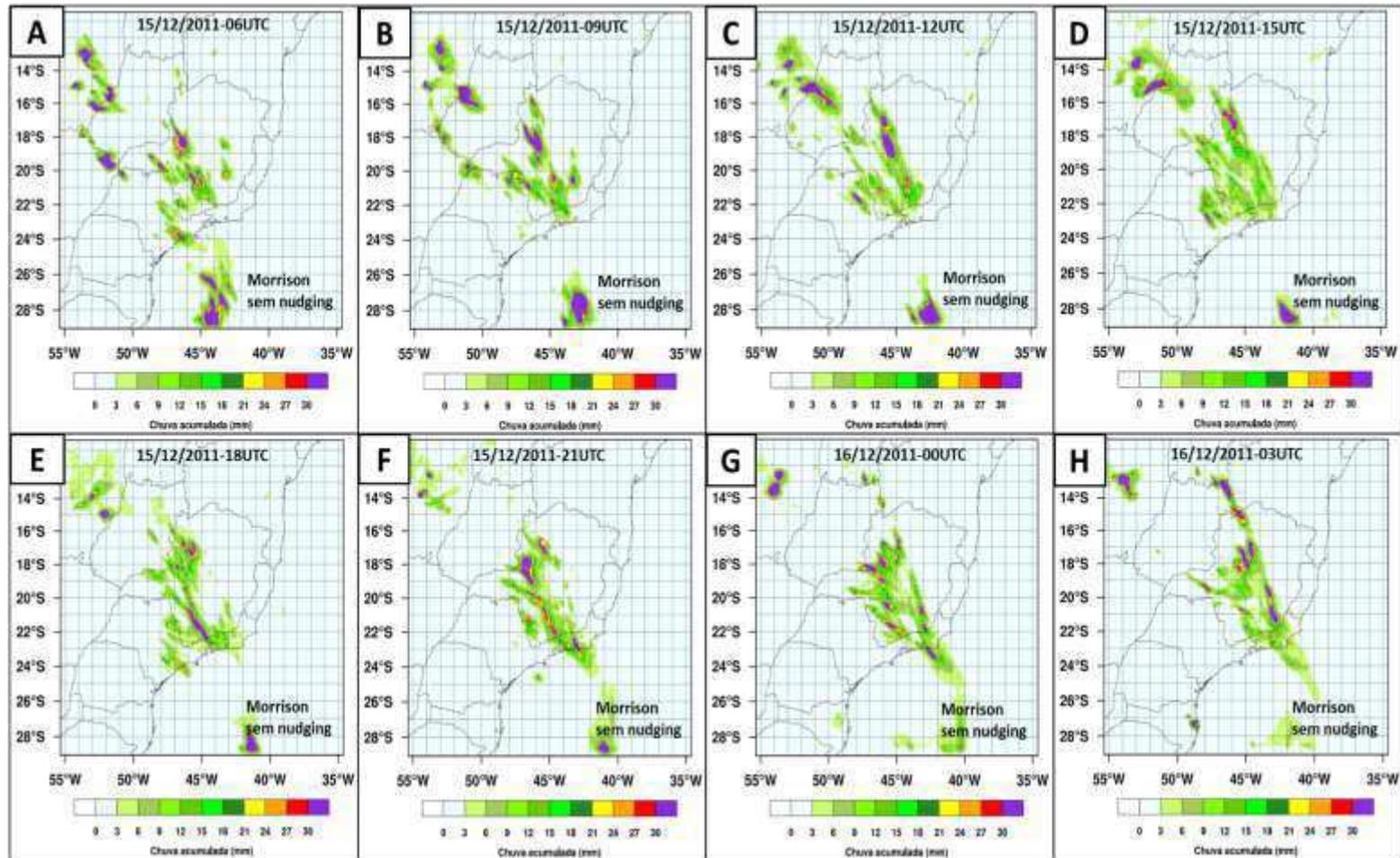


Figura 21: Acumulados nas últimas três horas de precipitação (mm) simulados para o domínio maior (18km) usando a parametrização de microfísica de nuvens *Morrison double-moment scheme* sem aplicação do método de relaxação newtoniana, nos horários de (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC; (G) 00 UTC; (H) 03 UTC dos dias 15 e 16 de dezembro de 2011.

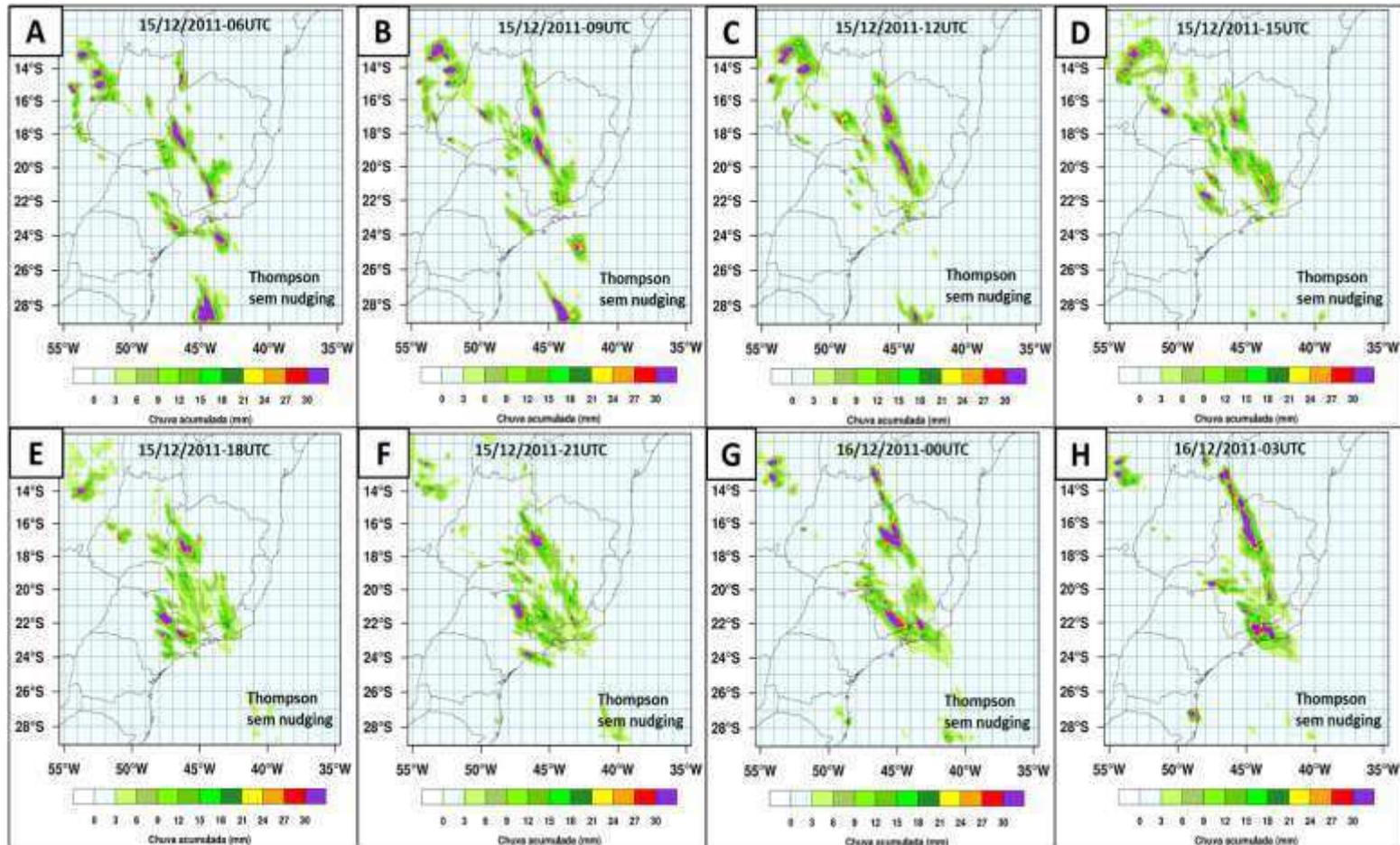


Figura 22: Acumulados nas últimas três horas de precipitação (mm) simulados para o domínio maior (18km) usando a parametrização de microfísica de nuvens *Thompson aerosol-aware* sem aplicação do método de relaxação newtoniana, nos horários de (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC; (G) 00 UTC; (H) 03 UTC dos dias 15 e 16 de dezembro de 2011.

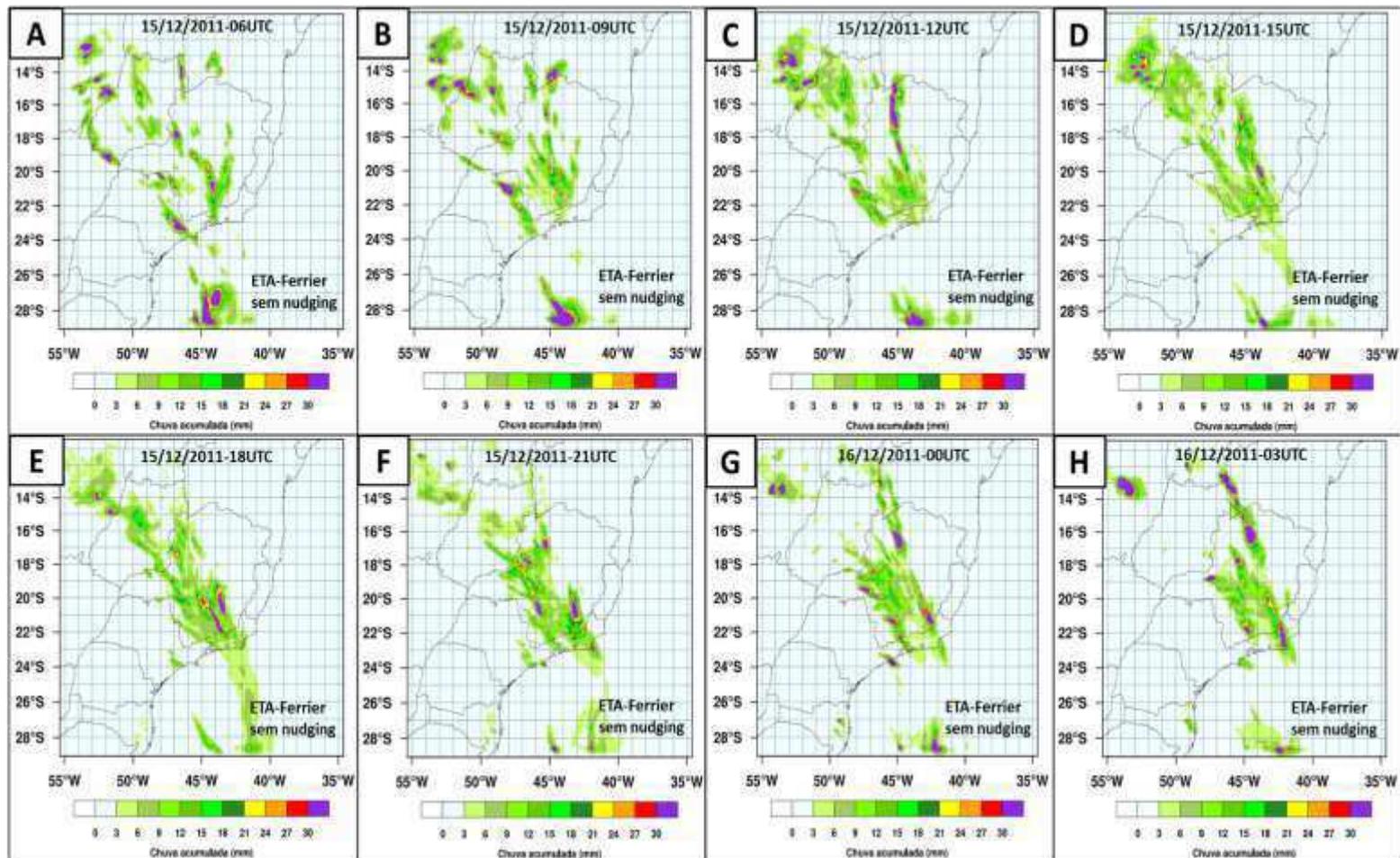


Figura 23: Acumulados nas últimas três horas de precipitação (mm) simulados para o domínio maior (18km) usando a parametrização de microfísica de nuvens *ETA-Ferrier* sem aplicação do método de relaxação newtoniana, nos horários de (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC; (G) 00 UTC; (H) 03 UTC dos dias 15 e 16 de dezembro de 2011.

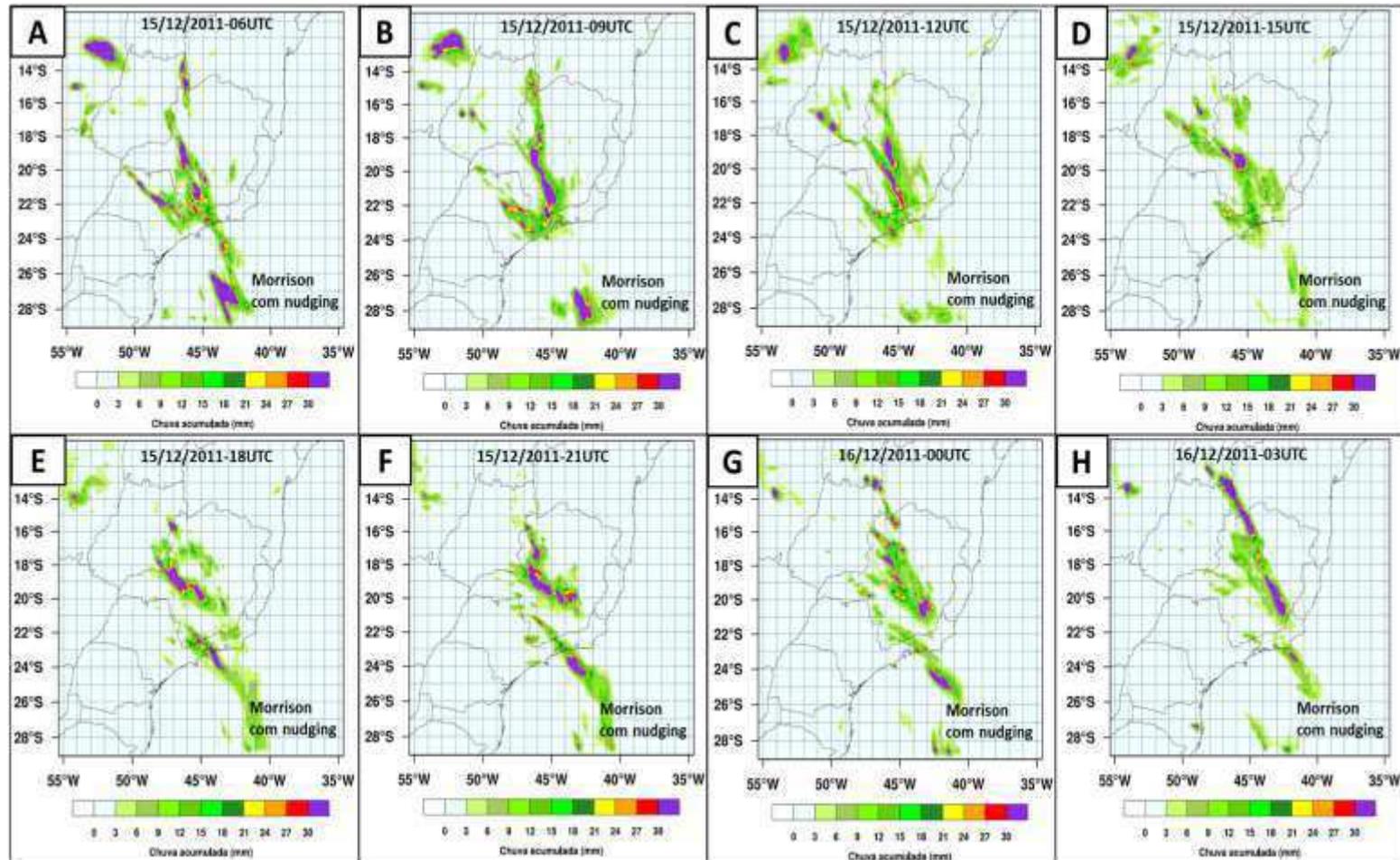


Figura 24: Acumulados nas últimas três horas de precipitação (mm) simulados para o domínio maior (18km) usando a parametrização de microfísica de nuvens *Morrison double-moment scheme* com aplicação do método de relaxação newtoniana, nos horários de (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC; (G) 00 UTC; (H) 03 UTC dos dias 15 e 16 de dezembro de 2011.

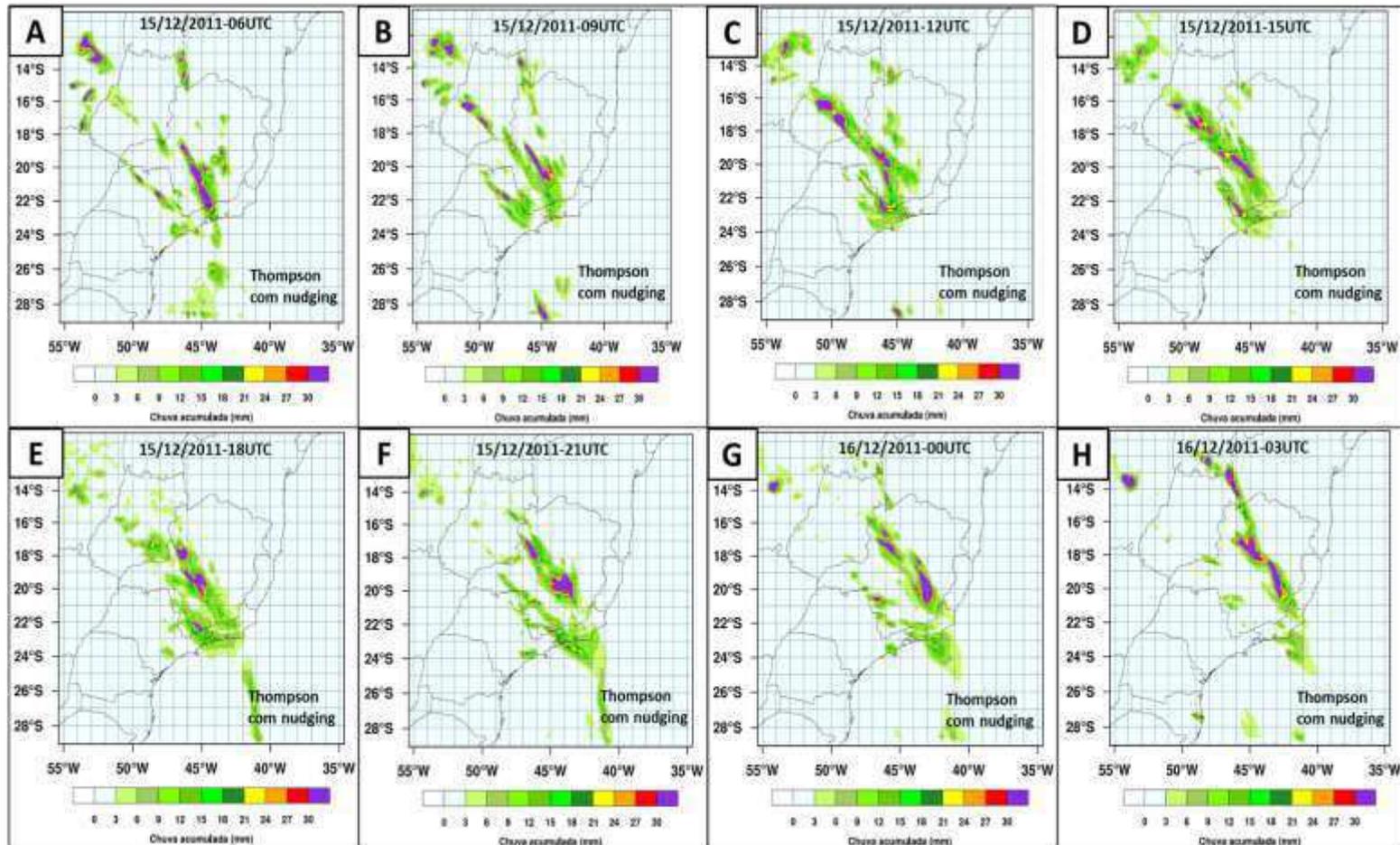


Figura 25: Acumulados nas últimas três horas de precipitação (mm) simulados para o domínio maior (18km) usando a parametrização de microfísica de nuvens *Thompson aerosol-aware* com aplicação do método de relaxação newtoniana, nos horários de (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC; (G) 00 UTC; (H) 03 UTC dos dias 15 e 16 de dezembro de 2011.

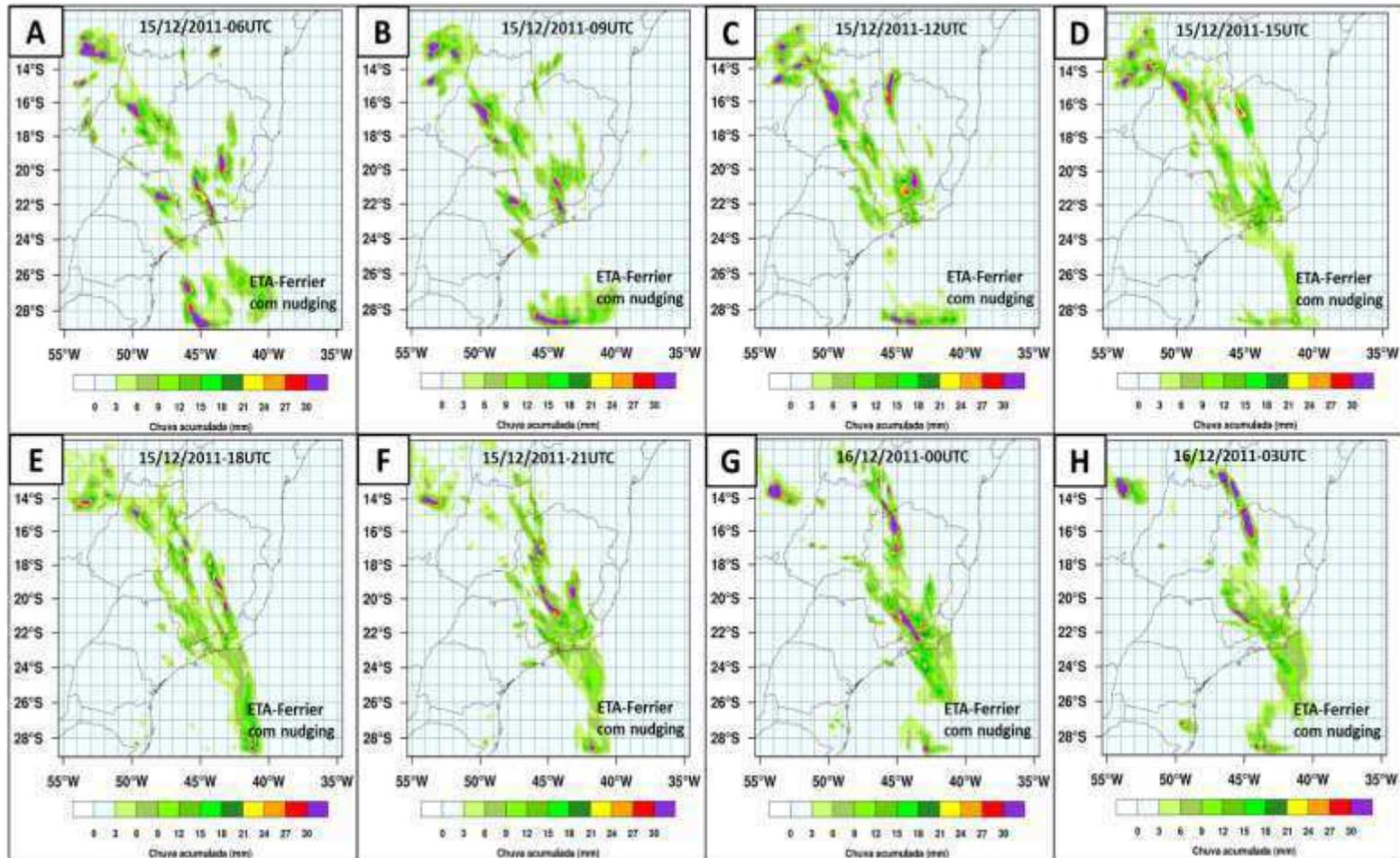


Figura 26: Acumulados nas últimas três horas de precipitação (mm) simulados para o domínio maior (18km) usando a parametrização de microfísica de nuvens *ETA-Ferrier* com aplicação do método de relaxação newtoniana, nos horários de (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC; (G) 00 UTC; (H) 03 UTC dos dias 15 e 16 de dezembro de 2011.

Como é conhecido, a representação espacial das precipitações mostra o comportamento das simulações, se elas são capazes de reproduzir ou não o evento, além de uma magnitude visual da quantidade de chuva acumulada, com o objetivo de verificar se realmente foi coerente com os acumulados registrados em uma determinada região. Devido a que os dados observados são pontuais dos locais onde existem estações meteorológicas, o modelo numérico é uma ferramenta muito importante para determinar de forma espacial o comportamento das precipitações em áreas não cobertas por pluviômetros.

As Figuras 27 e 28 mostram o comportamento de cada uma das 6 simulações para todas as estações meteorológicas com acumulados diários disponíveis na região de ocorrência do evento de ZCAS, comparado com os valores observados em cada uma delas. Pode-se verificar que o comportamento quantitativo foi bastante similar em cada uma delas, sendo capaz, na maioria, de simular o evento de forma positiva. Algumas parametrizações ficaram mais perto dos acumulados reais observados, se destacando os casos com relaxamento espectral, principalmente as que foram usadas as parametrizações de *Morrison double-moment scheme* e *Thompson aerosol-aware*.

Os dados de precipitação observados em cada uma das estações meteorológicas durante o evento de ZCAS analisados foram diários, já que só duas estações automáticas na região (Pampulha e Florestal) apresentaram valores horários. Essa limitação decorrente da ausência de dados de chuva com maior resolução temporal e/ou espacial dificultou a obtenção com exatidão do momento em que ocorreu o maior acumulado e de onde o sistema convectivo apresentou uma intensificação de forma mais localizada na região.

Uma alternativa para avaliar melhor a atmosfera local foi utilizar informações contidas em mensagens provenientes de estações de superfície situadas em aeroportos próximos de onde foram registrados os maiores acumulados de chuva. A sequência de mensagens METAR elaboradas nos aeroportos de Pampulha, Carlos Prates e Tancredo Neves (CONFINS), no período de 15 a 18 de dezembro de 2011, são apresentadas por meio de tabelas, no Anexo 1. Particularmente nas mensagens do dia 15 de dezembro, observa-se uma alta frequência de alertas de condições especiais (SPECI) consideradas de riscos para atividades de pousos e decolagens. O elevado teor de umidade com alta frequência de céu coberto por nuvens baixas (sem teto), ventos fracos, chuva leve e contínua e visibilidade reduzida foi pratica-

mente uma constante entre as informações mais relevantes. Não foram registradas nuvens do tipo cumulonimbus (CB).

Conforme mencionado anteriormente, só duas estações automáticas apresentaram dados durante esse período, que são os casos da estação de Pampulha e Florestal (Tabelas do Anexo 2). Analisando o comportamento dos acumulados horários para cada uma delas durante o dia 15 de dezembro, observa-se que os maiores registros estiveram entre as 9 UTC e as 14 UTC em Pampulha, entretanto em Florestal, mesmo com valores mais baixos, os horários de maiores acumulados estiveram entre 7 UTC e 8 UTC. Esses dados coincidem com a maior quantidade de reportes especiais emitidos pelos aeroportos durante esse dia.

Apesar dos acumulados horários não ser tão elevados, eles coincidem tanto em horário quanto em intensidade com os resultados das simulações numéricas, que não mostram núcleos convectivos tão intensos quantos os simulados em regiões mais próximas. Dessa forma, e verificado tanto pelas observações METAR como também pelos acumulados horários de precipitação das estações automáticas, podemos concluir que na região dos aeroportos as chuvas que existiram durante esses dias foram do tipo estratiformes, que não estiveram relacionadas com os núcleos de maior atividade convectiva, apesar de registrar valores diários elevados por causa da persistência do fenômeno.

É possível verificar como os valores observados de precipitação total diária entre as estações convencionais e as automáticas de cada uma das cidades foi diferente apesar de que elas estão perto uma de outra em cada região. No caso de Belo Horizonte o acumulado diário reportado pela estação convencional foi de 91,4 mm, entretanto a automática registrou 165,2 mm o dia 15 de dezembro. Para Florestal igualmente foi maior na estação automática (76,8 mm) quando comparado com a convencional (34,8mm). Um dos principais motivos que fez isso acontecer foi a interação entre as escalas, pelo que se faz muito importante entender o comportamento da escala local em um sistema de escala sinótica, para tentar encontrar os fatores responsáveis pela ocorrência de situações desse tipo.

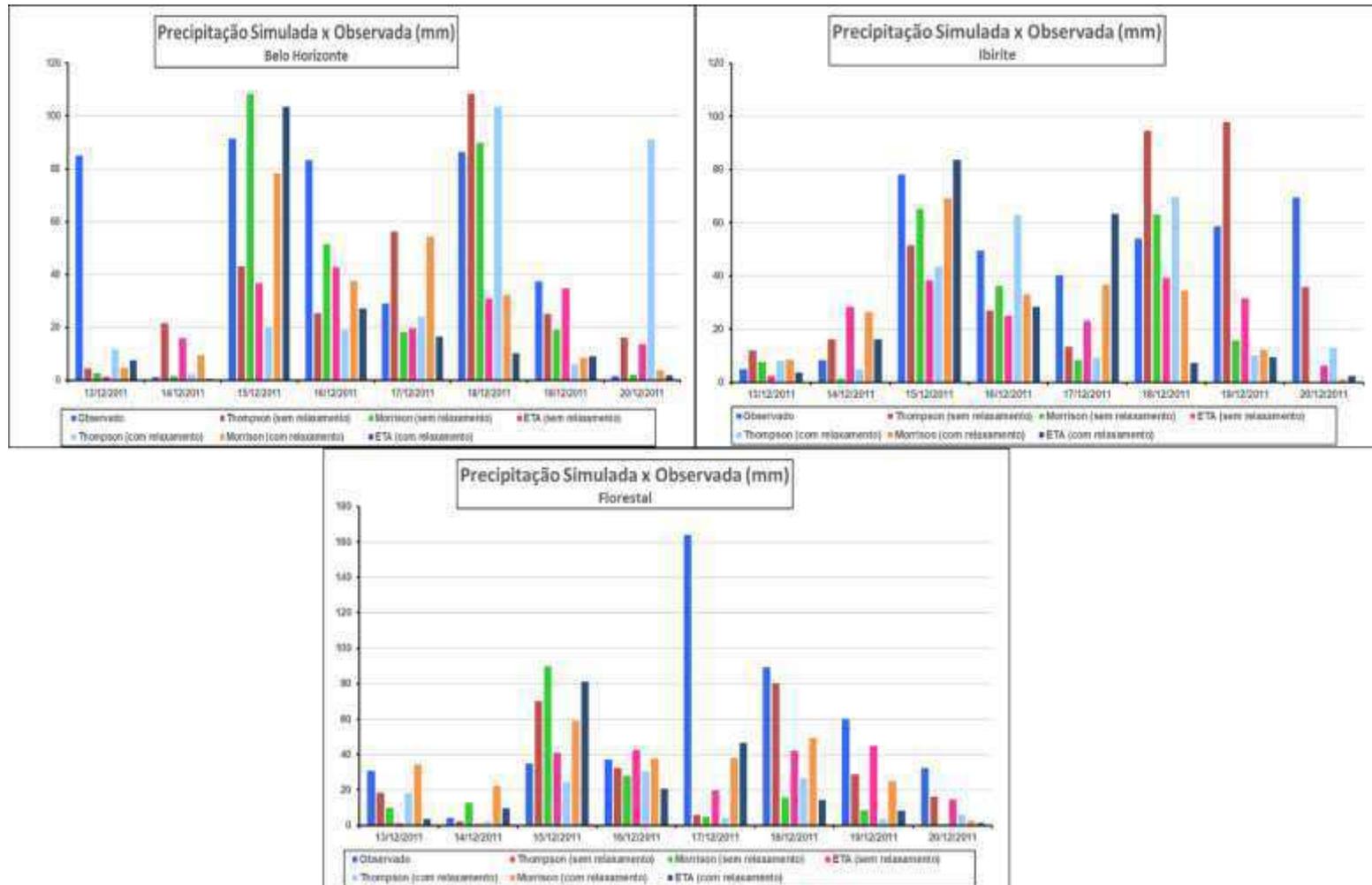


Figura 27: Acumulados diários (mm) de cada uma das simulações, comparado com os observados pelas estações meteorológicas de Belo Horizonte, Ibirite e Florestal, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

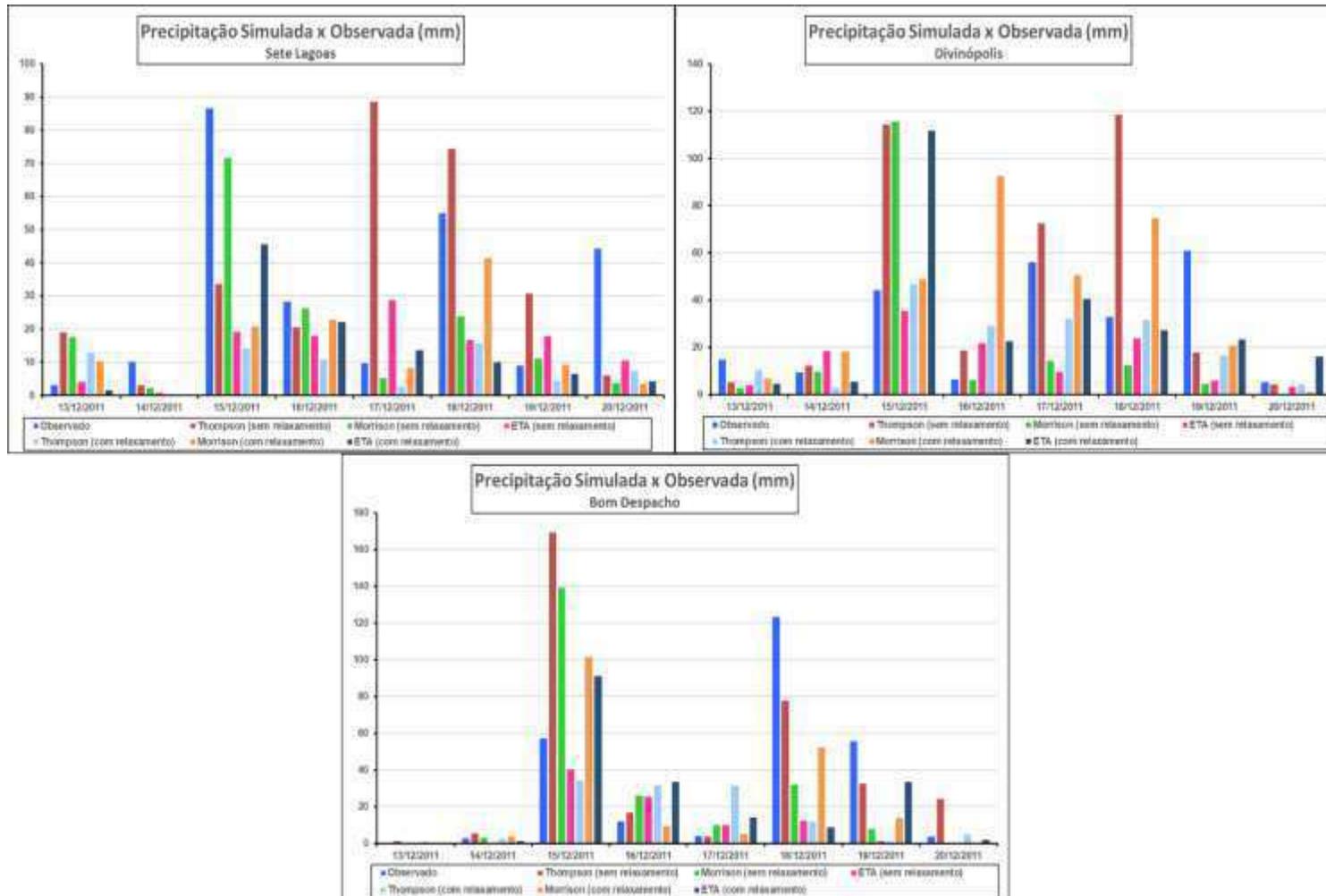


Figura 28: Acumulados diários (mm) de cada uma das simulações, comparado com os observados pelas estações meteorológicas de Sete Lagoas, Divinópolis e Bom Despacho, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

4.3 Desempenho do modelo

Na Figura 29 se mostra o comportamento dos índices estatísticos de desempenho para as três simulações realizadas sem uso de *spectral nudging*, onde se pode observar que apesar do evento ter sido representado espacialmente, os resultados quantitativos não tiveram um desempenho muito positivo. A FAR é um dos índices de análise de comportamento, o qual, quanto mais próximo for de 0 melhor será a previsão, entretanto quanto mais próximo for de 1, pior será ela. Pode ser observado como a FAR teve um comportamento entre 0,6 e 0,8 para cada uma das estações, exceto para duas delas usando a parametrização de *Thompson aerosol-aware*, que teve valores de 0,4.

No caso da POD, que é a probabilidade de um evento ter sido simulado e ao mesmo tempo observado, uma simulação perfeita acontece com valores iguais a 1, que não foi o caso, devido a que para todas as estações o comportamento foi entre 0,2 e 0,4. Devido a que a POD não toma em consideração a quantidade de vezes que o fenômeno é simulado, mas não acontece (Alarmes Falsos), se faz necessário interpretar ele em conjunto com a FAR, demonstrando nesse caso que o evento não foi positivamente representado de forma quantitativa.

O BIAS é uma razão simples entre os valores simulados de chuva com os observados. No nosso caso observa-se como o valor do VIÉS para todos os casos foi superior a 1, o que significa que existiram mais pontos de chuva simulados em relação ao observado. Quanto mais próximo de 1 melhor será a simulação, e nesse caso ele esteve oscilando entre 1,2 e 1,6 para todas as parametrizações. O índice ETS permite verificar o desempenho do modelo em relação a acumulados aleatórios, sendo melhor o comportamento da simulação quanto mais próximo o índice estiver de 1. Nesse caso o ETS esteve entre 0,2 e 0,5, o que permite verificar que a simulação não foi muito boa de forma quantitativa em nenhum dos casos, devido a que para ter uma boa previsão é preciso o ETS estar entre 0,6-0,8 aproximadamente, como por exemplo no caso dos valores obtidos por Wang et al. (2013) na sua simulação das chuvas do tufão Morakot, na Índia.

A Figura 30 mostra o comportamento dos índices estatísticos de desempenho para as três simulações realizadas, incluindo a técnica de relaxamento espectral, que em sentido geral teve melhores resultados do que os obtidos sem o uso dela. A FAR teve valores entre 0,4 e 0,6, o qual, mesmo não sendo dos melhores,

representa um comportamento melhor dos acumulados quantitativos quando comparados com os resultados anteriores sem uso do *spectral nudging*. O caso do POD também melhorou, mesmo não estando no intervalo considerado como ótimo para uma simulação (WILKS, 2006), com valores também entre 0,4 e 0,6. O índice BIAS mostra que usando a técnica de relaxamento as simulações também melhoram, já que apesar de ainda estar mostrando mais pontos de chuva simulados do que observados, os valores diminuíram e oscilam entre 1,1 e 1,4, sendo muito mais próximos de 1 do que no primeiro caso. No caso do ETS também melhorou, com valores entre 0,4 e 0,6, mas ainda não chega a ficar no rango para considerar a simulação de muito boa.

Através dessa análise estatística de forma quantitativa, comparando os valores de chuva simulados e os observados pelas estações meteorológicas, podemos concluir que mesmo o modelo representando de forma bem coerente o evento de ZCAS de forma espacial, os acumulados não alcançaram os valores observados, tendo uma subestimação nos pontos onde se tem registro mediante as estações meteorológicas, coincidindo com alguns resultados recentes (SILVA, 2018; FERREIRA et al., 2020) que mostram como ainda é necessário fazer uma série de investigações e testes com diferentes parametrizações e métodos para tentar encontrar uma combinação que represente de forma precisa um evento de longa duração como é o caso das ZCAS. Apesar disso, um resultado interessante nesse estudo é a confirmação da importância do método de relaxamento espectral para simulação de eventos de longa duração com chuvas intensas e persistentes, como é o caso de ZCAS, já que os resultados estatísticos mostram que o comportamento com essa técnica é muito melhor do que sem ela, coincidindo com o obtido por Silva (2018) para um caso ocorrido em 2013.

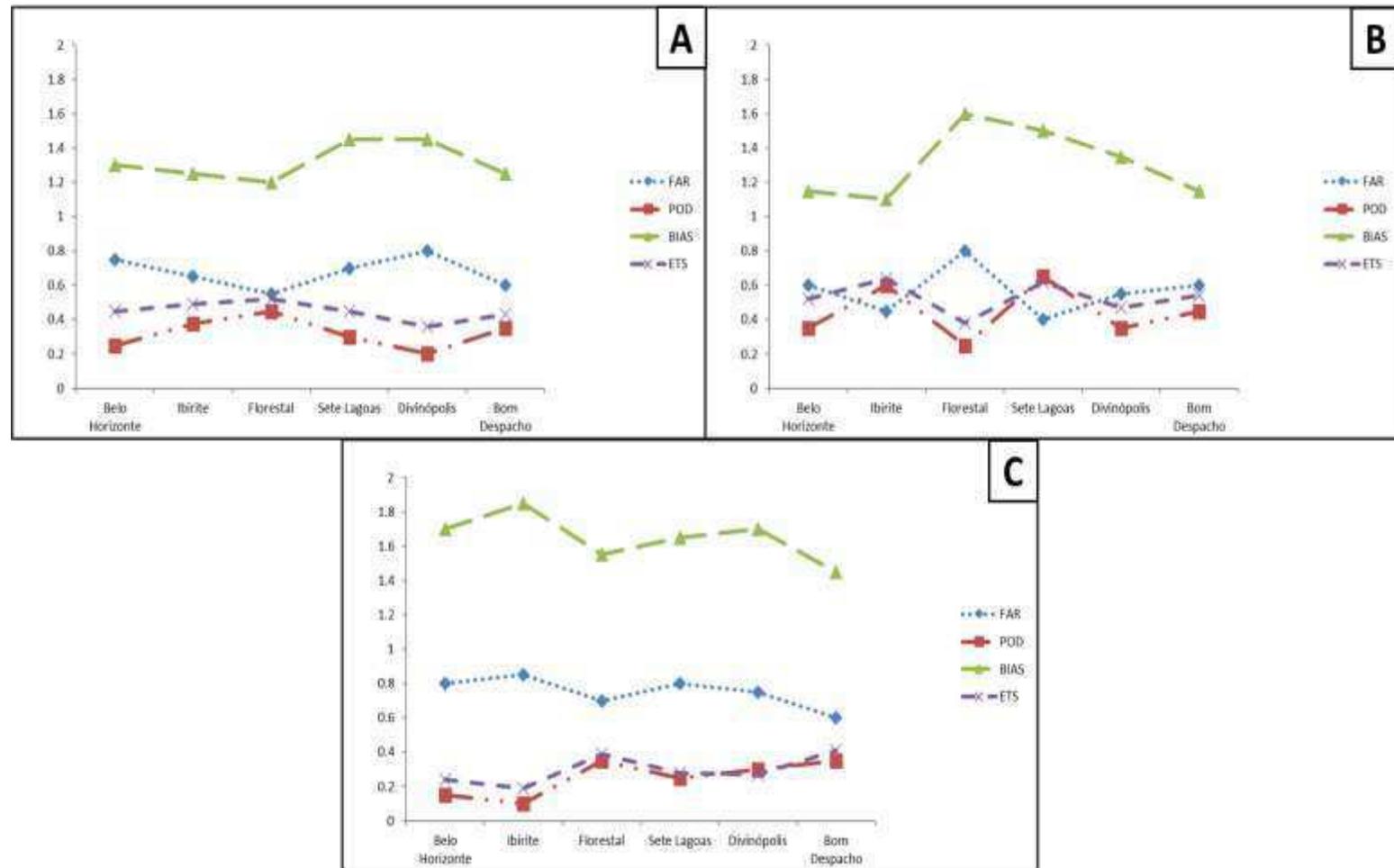


Figura 29: Comportamento dos índices estatísticos de desempenho para cada uma das estações meteorológicas usando as diferentes parametrizações de microfísica de nuvens: (A) *Morrison double-moment scheme*; (B) *Thompson aerosol-aware*; (C) *ETA-Ferrier*, sem uso do método de relaxamento espectral, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

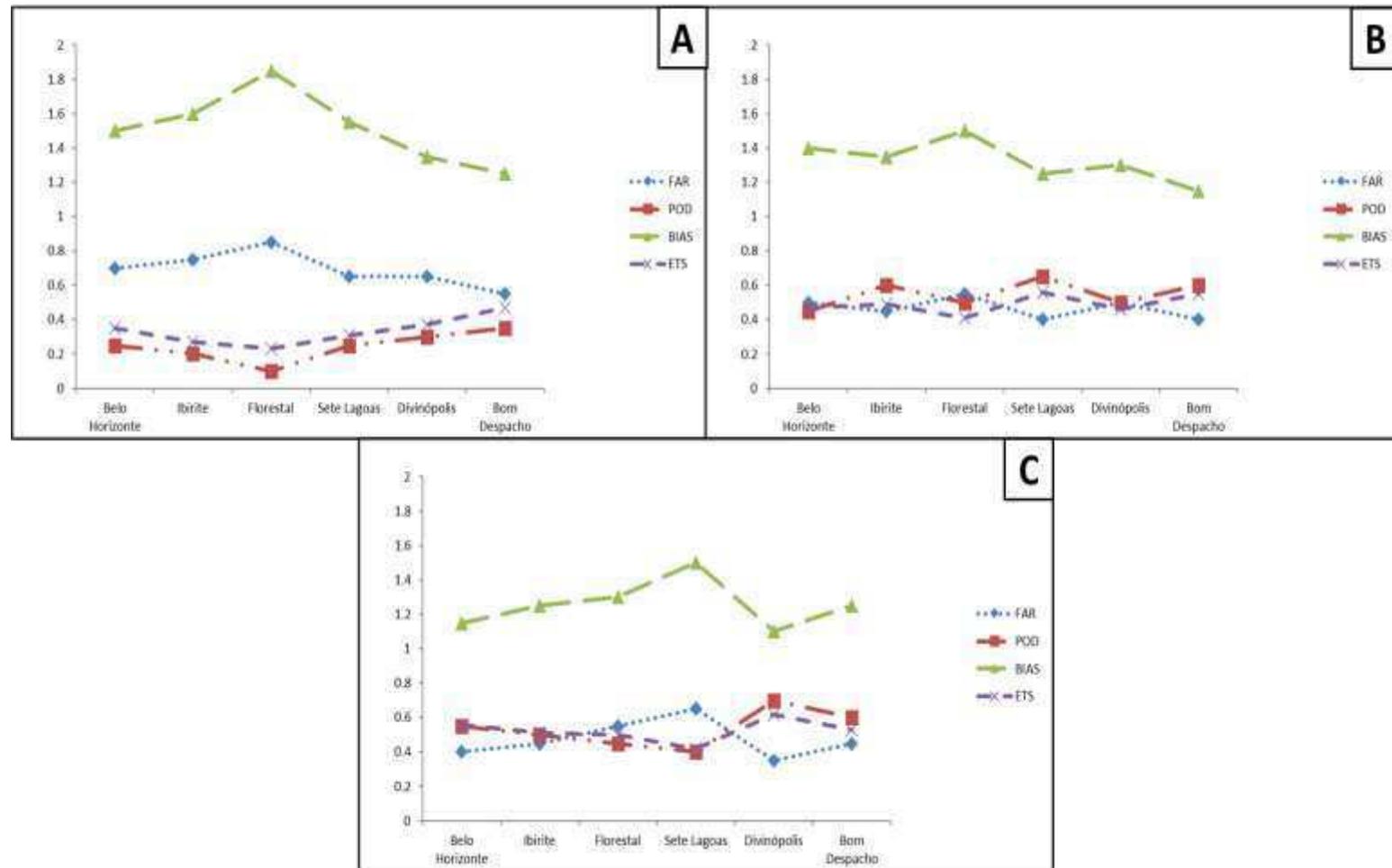


Figura 30: Comportamento dos índices estatísticos de desempenho para cada uma das estações meteorológicas usando as diferentes parametrizações de microfísica de nuvens: (A) *Morrison double-moment scheme*; (B) *Thompson aerosol-aware*; (C) *ETA-Ferrier*, com uso do método de relaxamento espectral, no período de 13 a 20 de dezembro de 2011.

4.4 Mecanismos dinâmicos responsáveis pela ocorrência do evento

A Figura 31 mostra as imagens de satélite de três em três horas para o dia 15 de dezembro de 2011, com a finalidade de ter uma ideia onde estavam sendo localizados durante esse período os núcleos de nuvens com temperaturas mais baixas e, portanto, topos mais elevados, que traziam mais atividade convectiva para a região. O objetivo principal é poder comparar de forma visual o que foi simulado pelo modelo WRF com dados reais de satélite para determinar a estrutura e localização da atividade convectiva simulada.

Fazendo-se um estudo mais detalhado sobre algumas variáveis meteorológicas obtidas mediante a simulação de cada um dos experimentos para o dia 15 de dezembro, podemos observar nos campos gerados de vento e vorticidade relativa em 850 hPa (Figuras 32-37), de três em três horas, que durante esse dia, em algumas regiões formou-se um pequeno vórtice ciclônico de escala local com valores de vorticidade bem elevados, que possivelmente contribuiu para a ocorrência de movimentos ascendentes mais fortes e maior quantidade de precipitação na região. Em direção ao centro do vórtice, onde é possível observar a confluência do ar, verifica-se maior atividade convectiva, o que significa uma intensificação do movimento ascendente por continuidade de massa, responsável por transportar ar quente e úmido para os altos níveis e, conseqüentemente, instabilizar a atmosfera. Comparando com as imagens de satélite (Figura 31) se observa que o sistema estava sendo bem representado tanto espacial quanto temporalmente, coincidindo as áreas de maior vorticidade relativa com as de maior atividade convectiva.

No caso desses pequenos mesovórtices a sua aparição está localizada na porção estratiforme do SCM, fazendo com que o calor latente existente seja mais intenso do que nas regiões onde ocorre uma atividade convectiva mais intensa. Esse pequeno vórtice ciclônico é caracterizado por ter um núcleo quente, onde o ar quente ascendente induz a convergência nos níveis médios da troposfera e posteriormente contribui para a amplificação da vorticidade ciclônica. Além disso, a topografia joga um papel muito importante na intensificação das precipitações, contribuindo de forma ativa na manutenção da convecção na região, através da geração da própria circulação ciclônica e a convergência de baixos níveis.

Não foi possível ver o vórtice ciclônico em todos os horários para todas as simulações, mas na maioria deles os valores da vorticidade absoluta sempre foi bem

elevado e com uma convergência do vento em 850 hPa que garante a ocorrência de convergência e movimentos ascendentes fortes. Dessa forma, podemos concluir que a presença em alguns horários de um pequeno Vórtice Ciclônico de Mesoescala, embebido na região estratiforme das ZCAS, em conjunto com uma forte convergência do vento em níveis médios e baixos, é um dos mecanismos dinâmicos que contribuiu para a ocorrência e intensificação do sistema, o que verifica que realmente essa condição local foi fundamental para a ocorrência de acumulados bem significativos na região.

Esses resultados obtidos coincidem com trabalhos semelhantes publicados nos últimos anos, nos quais a simulação de eventos de ZCAS com modelos meteorológicos mostra a existência de pequenos Vórtices Ciclônicos de Mesoescala (VCM) formados durante curtos períodos de tempo, com elevados valores de vorticidade absoluta, que possibilitam movimentos ascendentes com maior intensidade, instabilidade e conseqüentemente maiores acumulados nas áreas onde isso ocorre (QUADRO, 2012; QUADRO et. al, 2016; SILVA et al., 2019).

Analisando o comportamento de forma individual do modelo para todas as parametrizações usadas, com e sem a técnica de relaxamento newtoniano, podemos verificar o comportamento de cada uma delas, onde tem um destaque fundamental o uso do *nudging* (Figuras 35, 36 e 37) na hora de determinar os centros de vorticidade ciclônica embebidos no sistema convectivo, principalmente nos casos do uso das parametrizações de microfísica mais complexas (*Morrison double-moment* e *Thompson aerosol-aware*). Nelas se observam áreas com maiores valores de vorticidade relativa distribuídas por toda a região, com uma frequência maior de aparição dos mesovórtices, do que quando comparado com as simulações sem uso da técnica (Figuras 32, 33 e 34), e uma convergência do vento bastante intensa, que traz como consequência uma maior atividade convectiva. A técnica contribui de forma satisfatória para eliminar os erros existentes no modelo e dessa forma representar fenômenos de menor escala com dados globais, contribuindo a otimizar os resultados e evitar que eles se distanciaram dos dados observados.

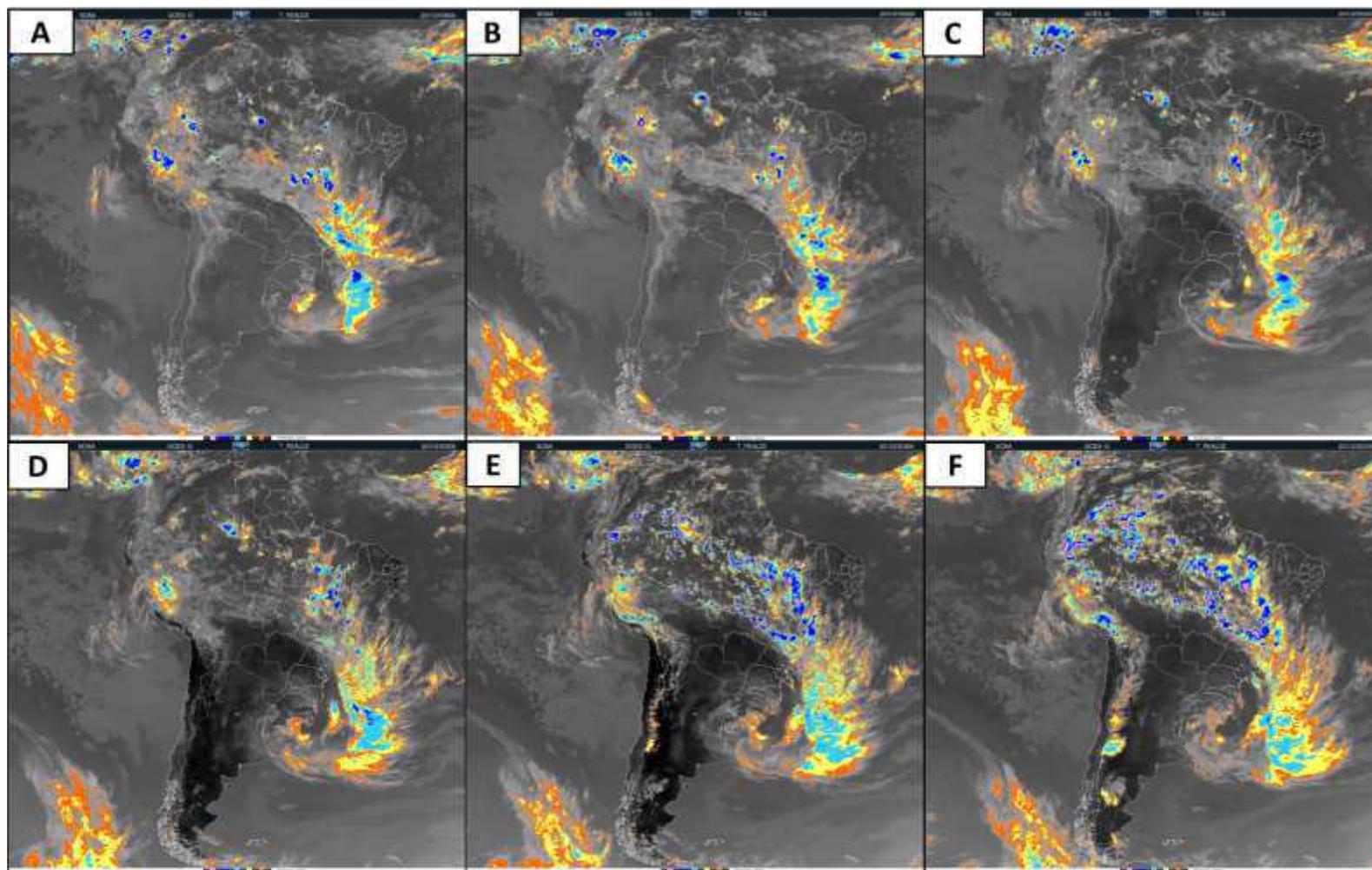


Figura 31: Imagens de satélite do GOES 13 para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC.

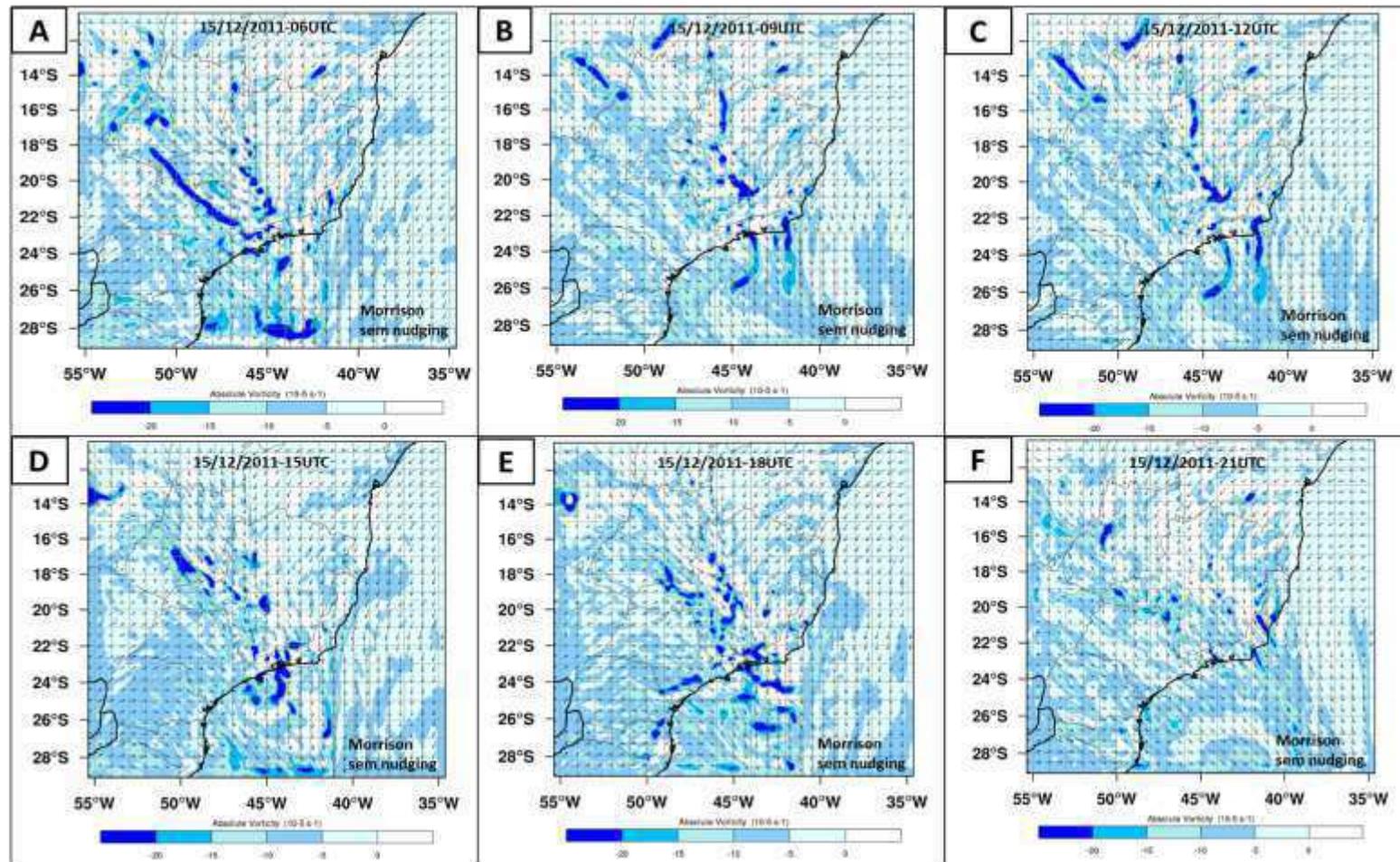


Figura 32: Comportamento do vento (m/s) e vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *Morrison double-moment* sem uso da técnica de *spectral nudging*.

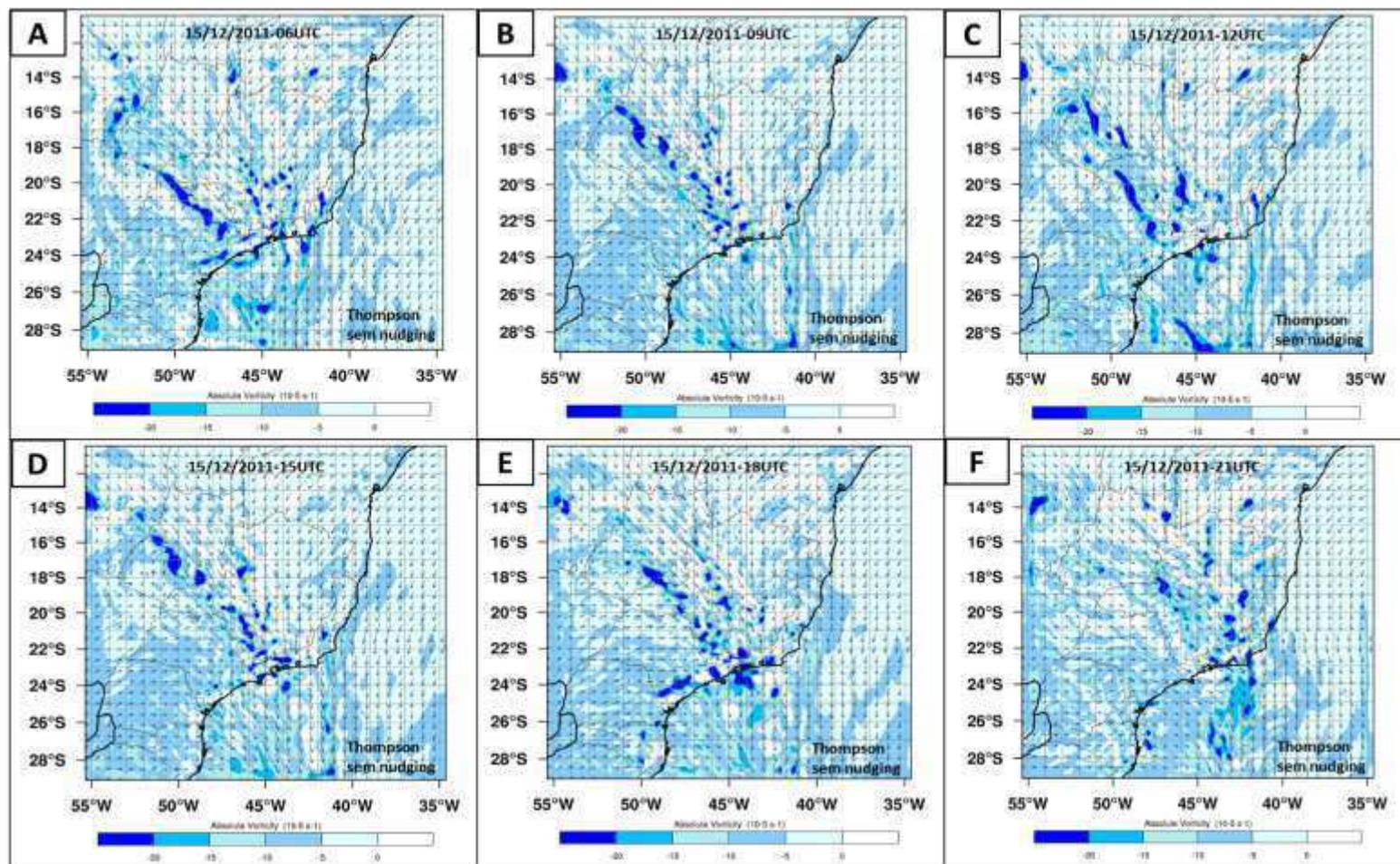


Figura 33: Comportamento do vento (m/s) e vorticidade relativa ($10^{-5} s^{-1}$) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *Thompson aerosol-aware* sem uso da técnica de *spectral nudging*.

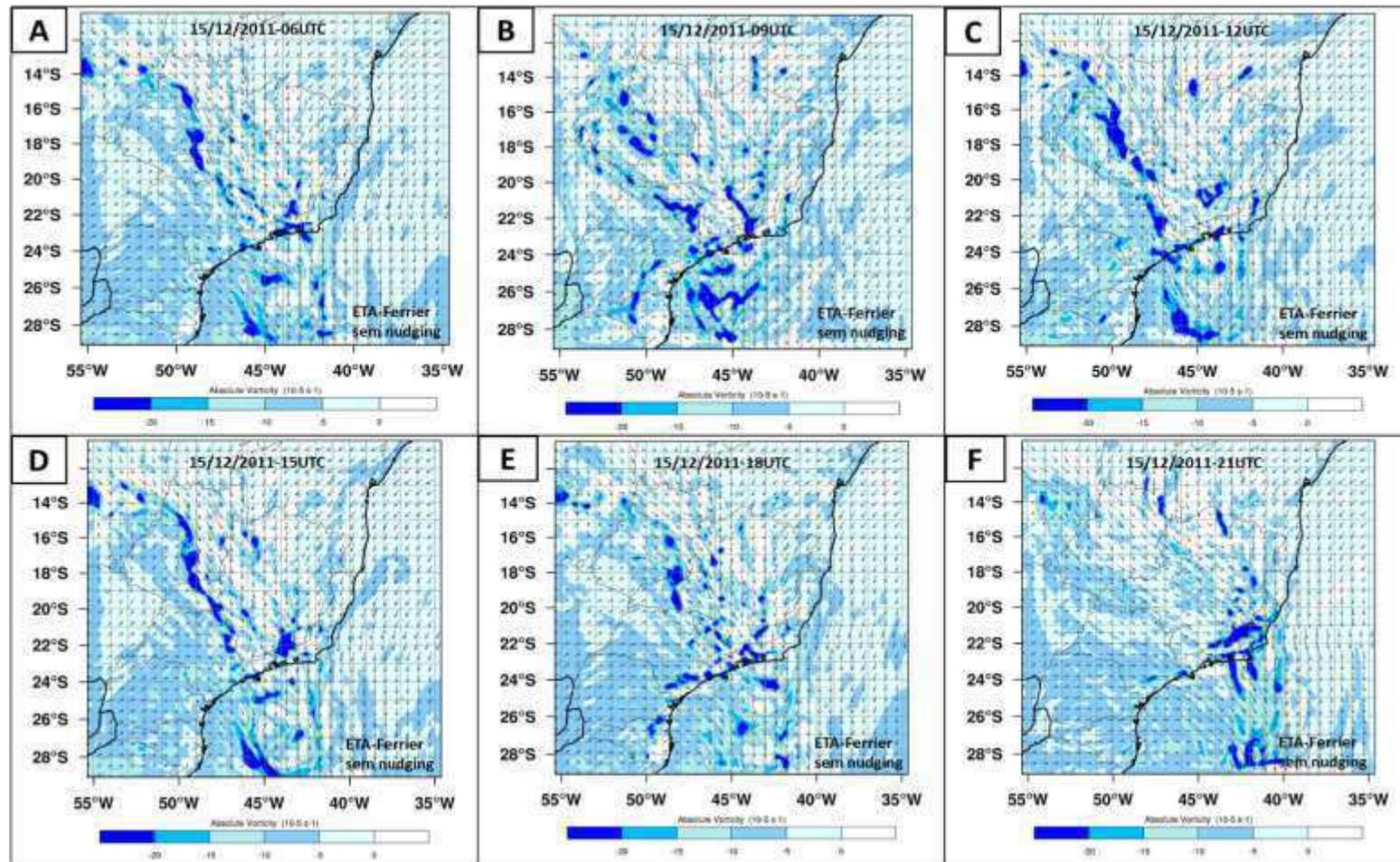


Figura 34: Comportamento do vento (m/s) e vorticidade relativa ($10^{-5} s^{-1}$) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *ETA-Ferrier* sem uso da técnica de *spectral nudging*.

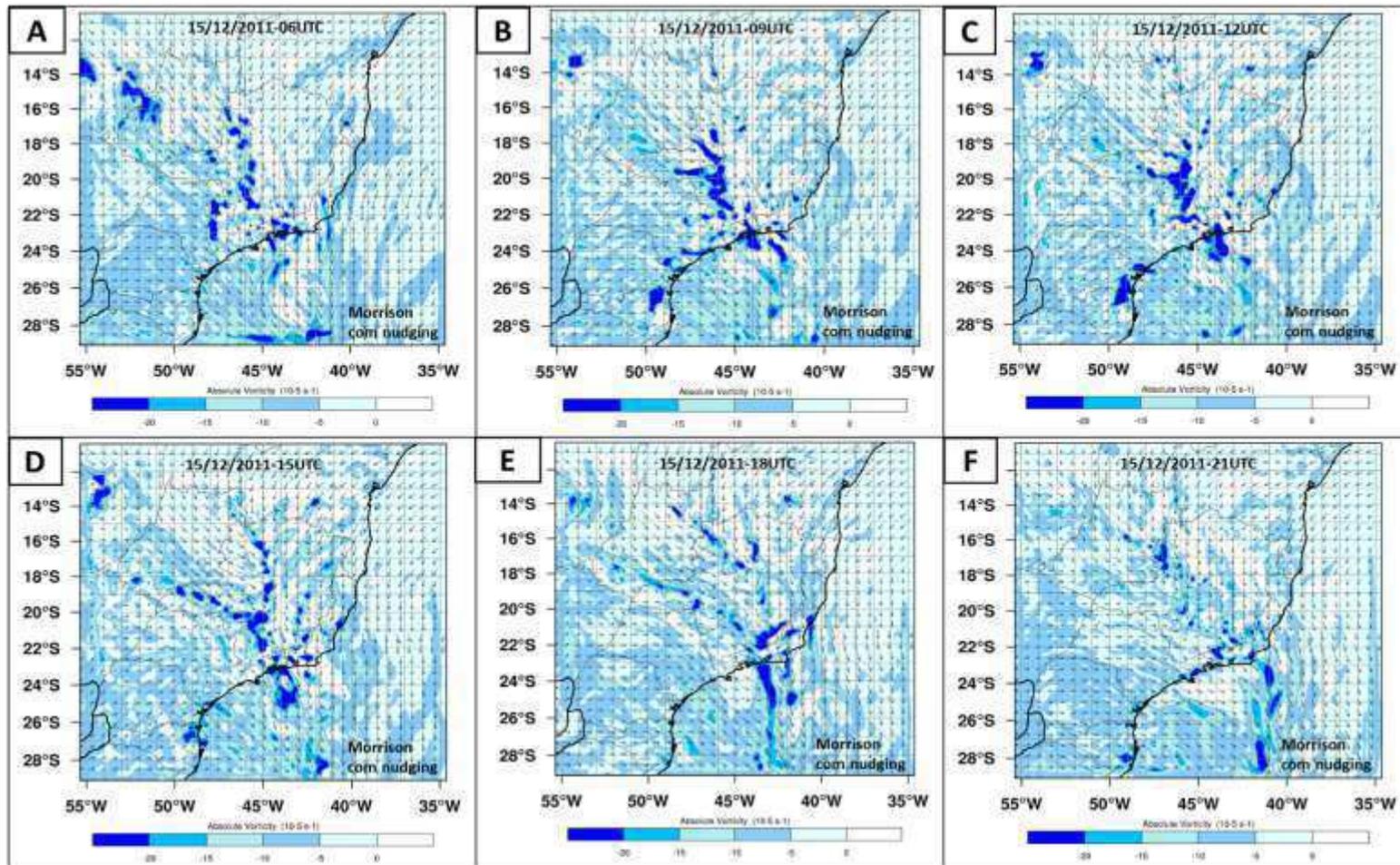


Figura 35: Comportamento do vento (m/s) e vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *Morrison double-moment* com o uso da técnica de *spectral nudging*.

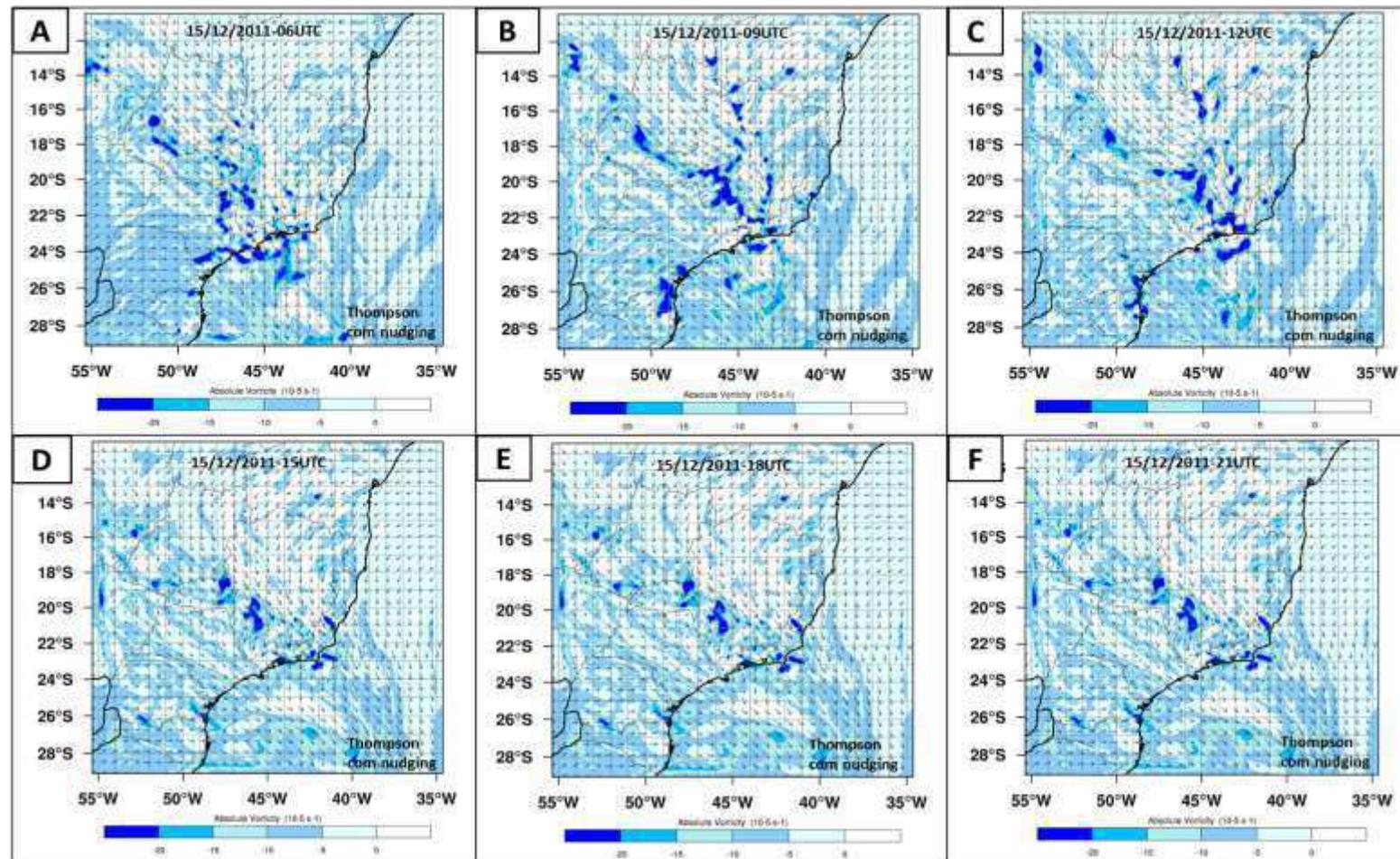


Figura 36: Comportamento do vento (m/s) e vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *Thompson aerosol-aware* com o uso da técnica de *spectral nudging*.

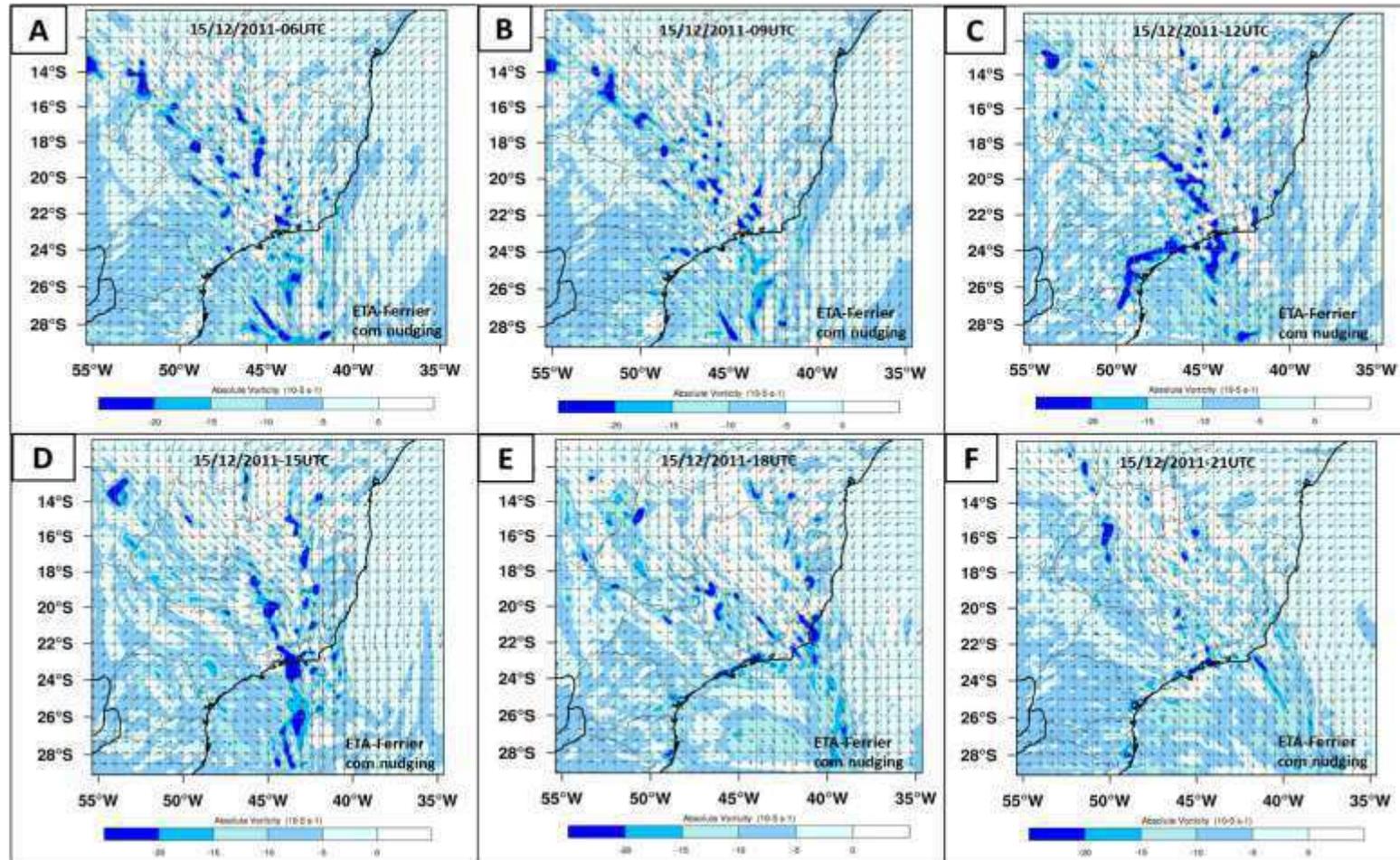


Figura 37: Comportamento do vento (m/s) e vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *ETA-Ferrier* com o uso da técnica de *spectral nudging*

As Figuras da 38 a 43 mostram a convergência do fluxo de umidade em 850 hPa simulados mediante o WRF, usando as três parametrizações de microfísica de nuvens, igualmente de três em três horas, para os principais horários do dia 15 de dezembro de 2011, com e sem o uso da técnica de relaxamento newtoniano. Os resultados mostram que em todos os casos o modelo foi capaz de representar bem o fluxo de umidade, cujas áreas de maiores valores, coincidem com a região de maiores acumulados no período.

Do ponto de vista físico podemos supor a ocorrência de uma convecção profunda com forte liberação de calor latente, que juntamente com efeitos topográficos mencionados anteriormente, contribui para a ocorrência e intensificação de circulações ciclônicas nos baixos níveis. Isso é uma forte indicação da influência do mecanismo CISK (Instabilidade Condicional de Segunda Ordem) na persistência e intensidade das chuvas. Os registros de umidade elevada e persistente observados nas mensagens METAR dos aeroportos e nas estações meteorológicas automáticas (Tabelas dos Anexos 1 e 2) são indícios dessa interação entre as escalas e convecção mais intensa durante todo o período. Além disso, e como comentado anteriormente, as anomalias ciclônicas impulsionaram o fluxo de umidade e consequentemente a manutenção das chuvas intensas. A comparação entre os campos simulados evidencia a característica quase estacionária da banda convectiva, situação típica de ambientes sob a influência da ZCAS.

O calor latente existente pode ter sido gerado de várias formas, como por exemplo fatores locais, ou transportada de outras áreas para a região das ZCAS por mecanismos externos que contribuíram para esse transporte. Por outra parte, o calor latente com retroalimentação positiva, como nesse caso, favoreceu a convergência em baixos níveis, intensificando o sistema a escala local. Dessa forma se confirma mais uma vez a importância local desse mecanismo para a ocorrência de eventos de precipitação extrema, já que apresenta um fluxo de umidade bem definido, trazendo umidade para o sudeste do Brasil, que coincide com os locais onde a precipitação é maior. Os resultados obtidos coincidem com investigações que abordam a importância da interação das escalas em episódios de chuvas intensas e persistentes associados a ZCAS (QUADRO et al., 2012; FAGGIANI et al., 2020)

Como no caso do comportamento do vento e a vorticidade relativa mostrado anteriormente, nesses campos simulados de convergência de fluxo de umidade se observa de forma satisfatória a diferença do uso da técnica de relaxamento newtoni-

ano na sua versão espectral (Figuras 41, 42 e 43), com núcleos de convergência mais profundos, maiores valores e melhor representados durante todo o período quando comparados com os obtidos sem uso de *nudging*.

Um dos mecanismos de maior escala que contribui para transportar e manter a umidade em regiões de ZCAS é o Jato de Baixos Níveis. Utilizando o critério de Bonner (1968), modificado por Whiteman et al. (1997), foi definido o JBN para identificar tanto sua intensidade como a localização para o caso estudado. As Figuras da 44 a 49 mostram as áreas com ventos acima de 10 m/s, que podem ser consideradas sob efeitos do JBN, transportando grande conteúdo de umidade e possibilitando a retroalimentação do sistema a menor escala. Observa-se em todos os casos e praticamente durante todo o período a presença do jato, com elevadas velocidades do vento, principalmente a partir das 12 UTC, coincidindo com a região de maior atividade convectiva.

De igual forma, existe uma diferença bem marcada quando comparados os resultados utilizando a técnica de relaxamento newtoniano (Figuras 47, 48 e 49) e sem uso dela (Figuras 44, 45 e 46). Mais uma vez mostra-se a importância do uso da técnica na simulação de eventos de precipitação relacionados com ZCAS na região sudeste do Brasil, com o objetivo de minimizar os erros existentes na hora de representar um fenômeno de escala local utilizando modelagem numérica com dados de escala maior. Sem dúvida nenhuma é uma técnica que deveria ser muito mais explorada para tentar encontrar um melhor desempenho nas simulações de eventos de menor escala.

Com base nos resultados obtidos é demonstrada a importância dos processos que acontecem a escala local durante um episódio de ZCAS na hora de geração de precipitação. Mecanismos dinâmicos e termodinâmicos como o CISK, a formação de mesovórtices ou a presença de um Jato de Baixos Níveis trazem como consequências que durante a ocorrência de um sistema de maior escala, as chuvas não sejam uniformemente distribuídas. Por outra parte, foi comprovado que a técnica de relaxamento newtoniano na sua versão espectral é sumamente vantajosa para tentar simular um evento desse tipo da forma mais exata possível, devido a que ela é capaz de suavizar os processos físicos existentes durante a interação entre as escalas, o que possibilita melhores resultados durante o processo.

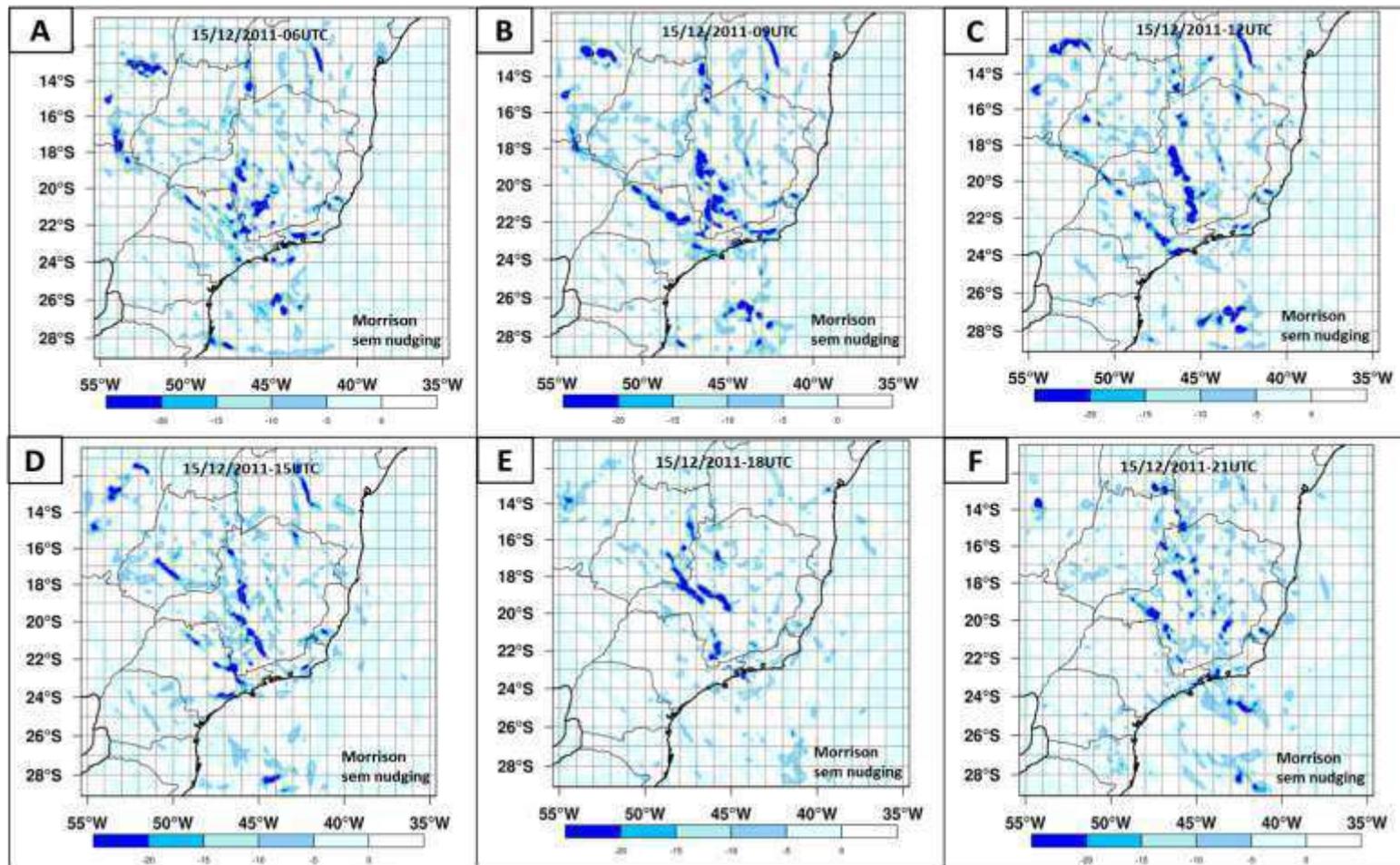


Figura 38: Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *Morrison double-moment* sem uso da técnica de *spectral nudging*.

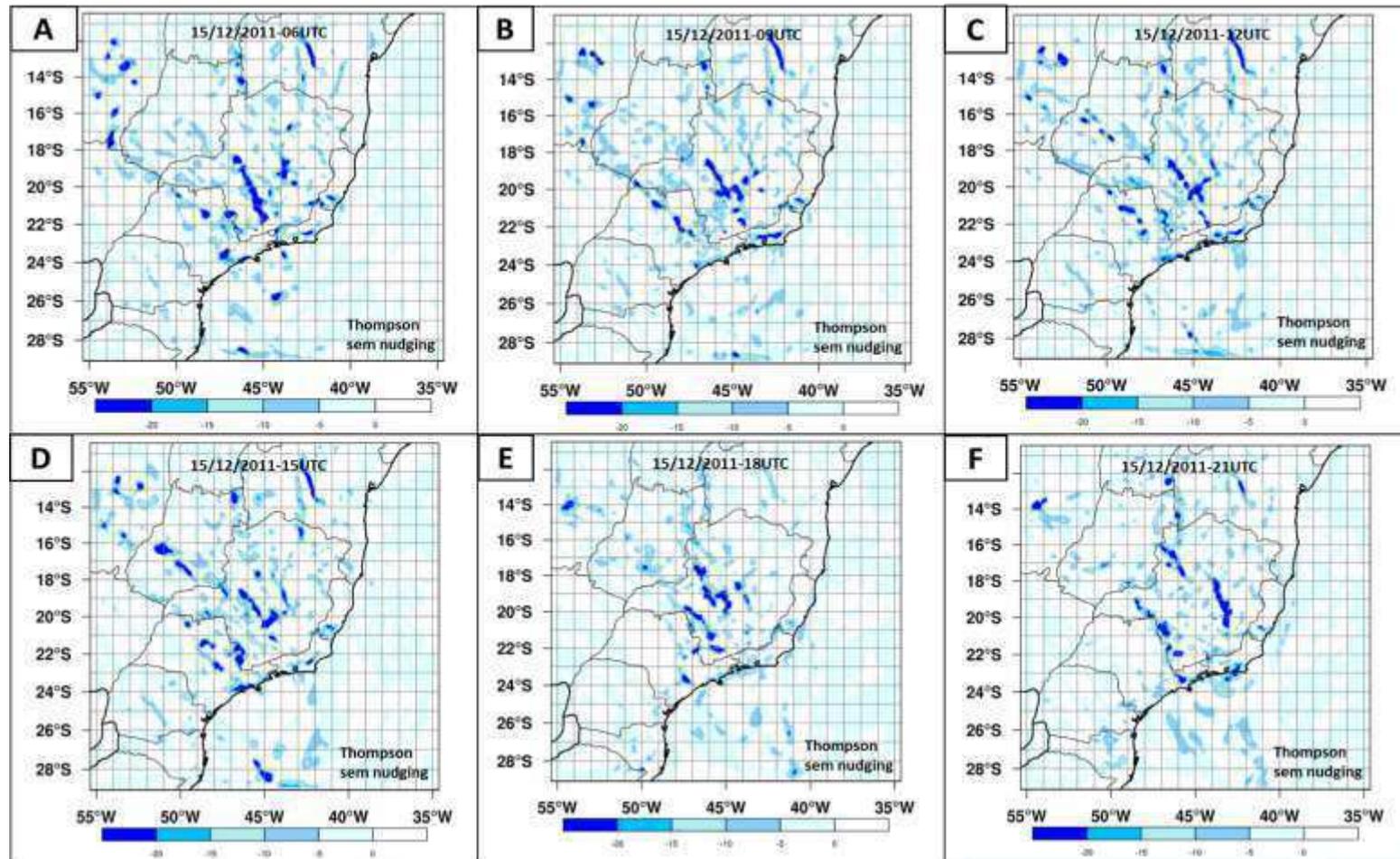


Figura 39: Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *Thompson aerosol-aware* sem uso da técnica de *spectral nudging*.

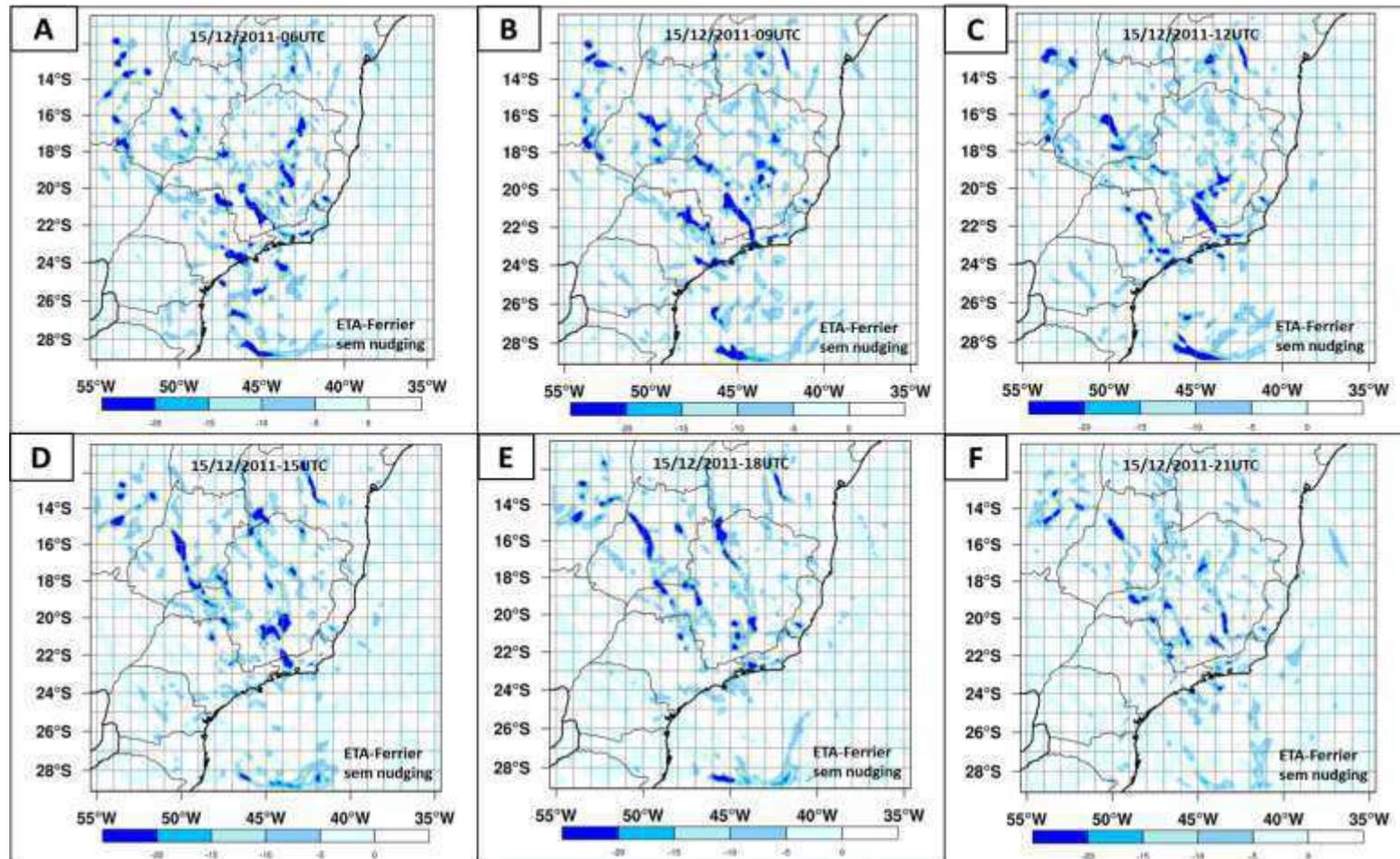


Figura 40: Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *ETA-Ferrier* sem uso da técnica de *spectral nudging*.

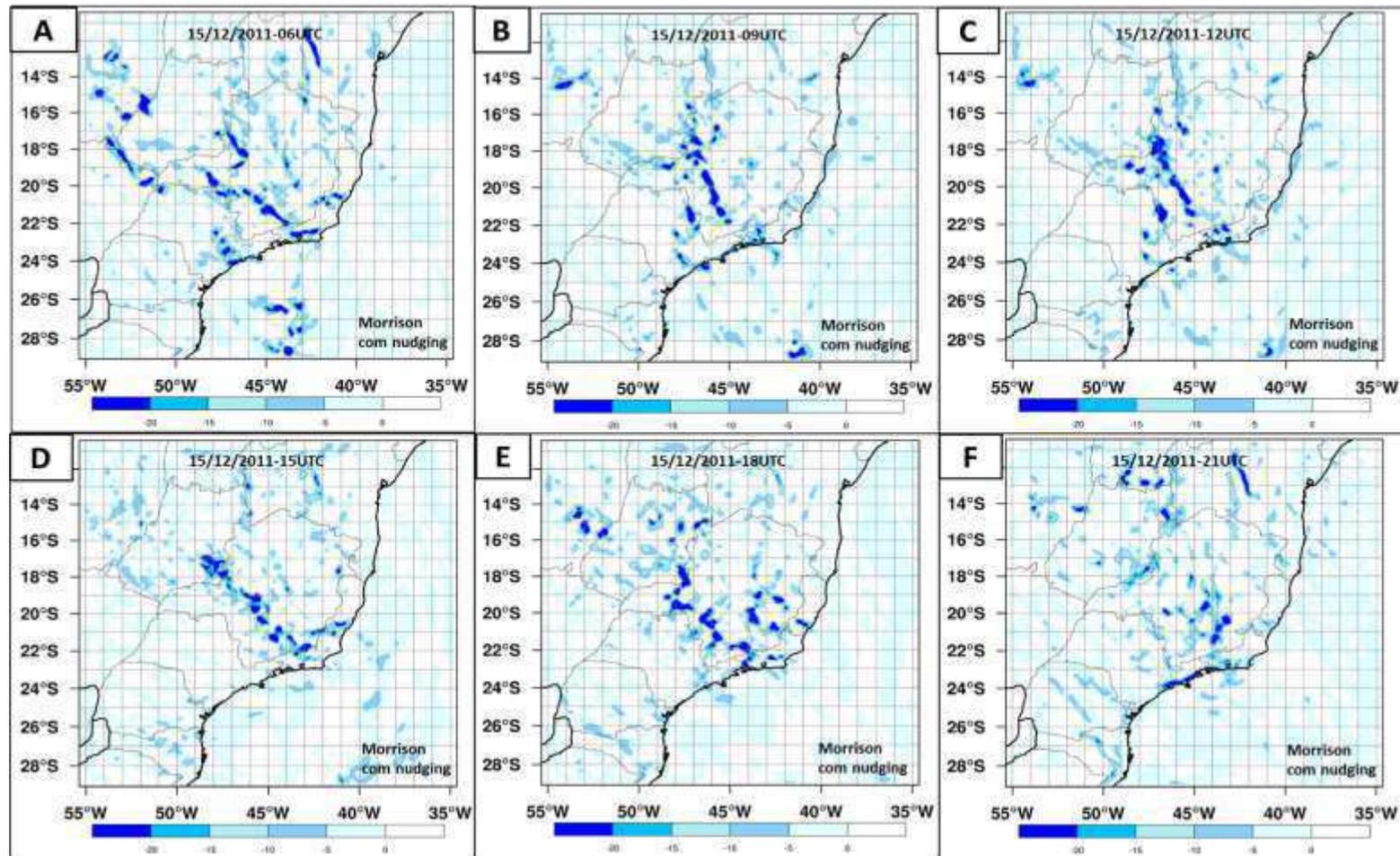


Figura 41: Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *Morrison double-moment* com o uso da técnica de *spectral nudging*.

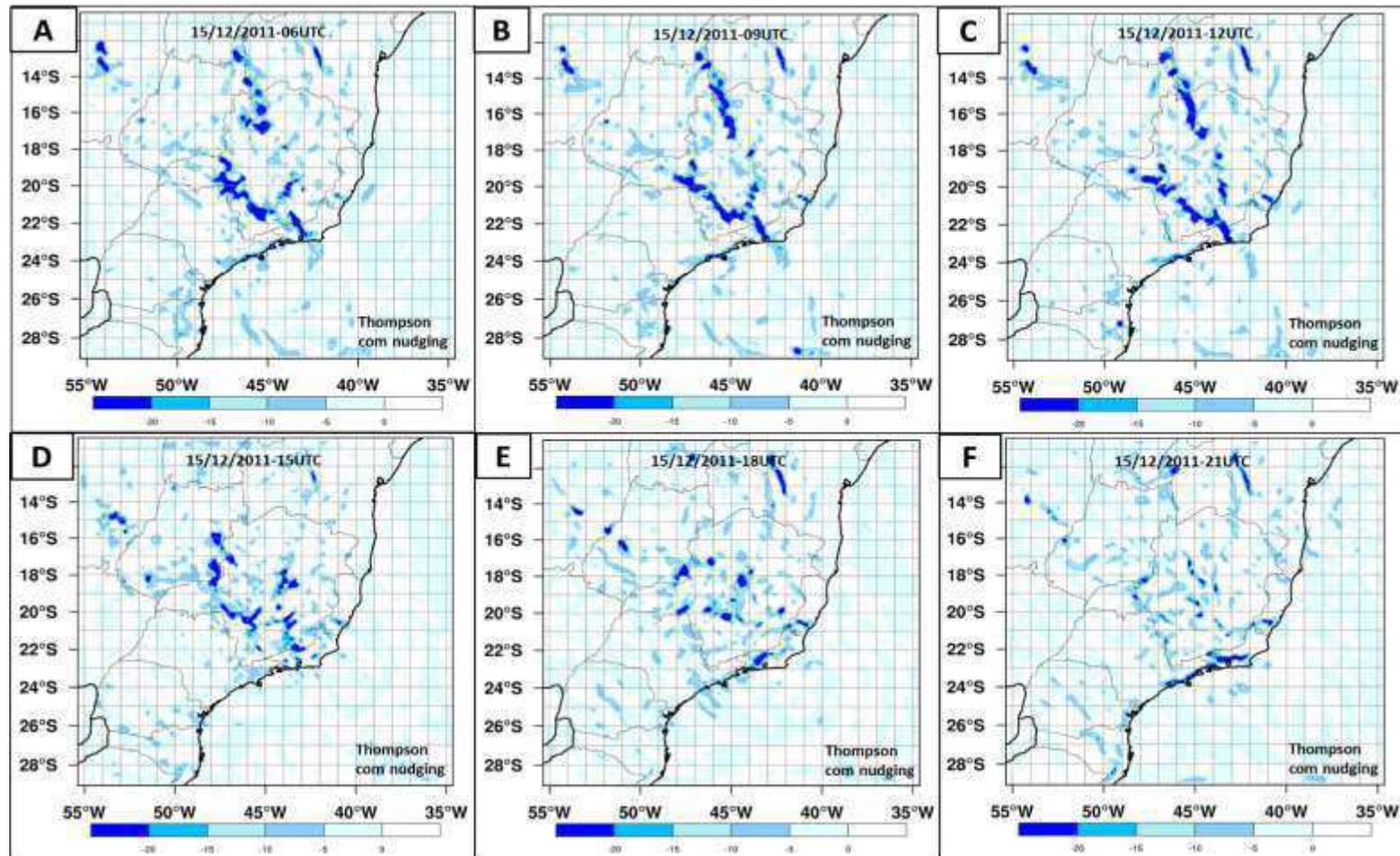


Figura 42: Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *Thompson aerosol-aware* com o uso da técnica de *spectral nudging*.

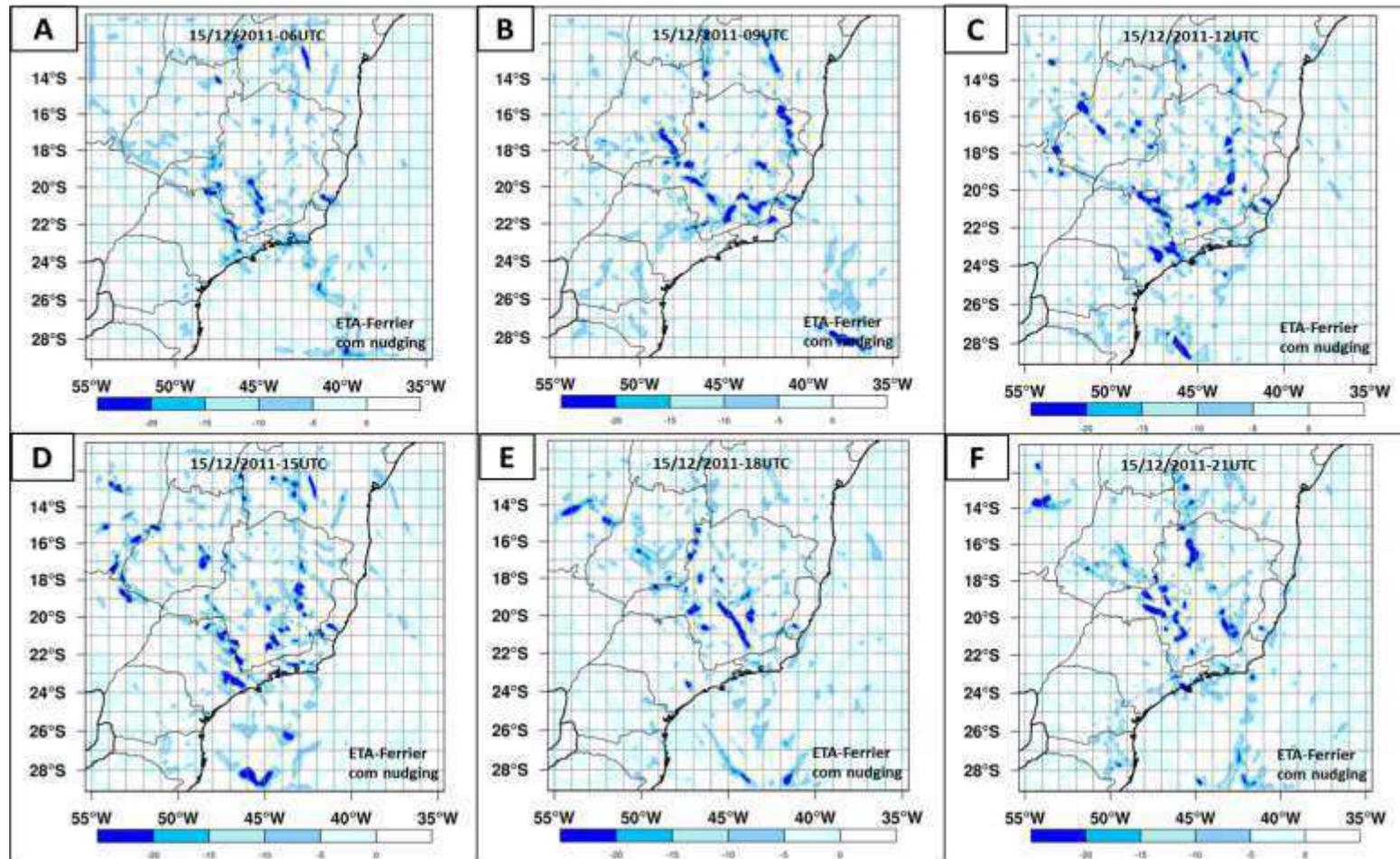


Figura 43: Convergência de fluxo de umidade (10^{-7} s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *ETA-Ferrier* com o uso da técnica de *spectral nudging*.

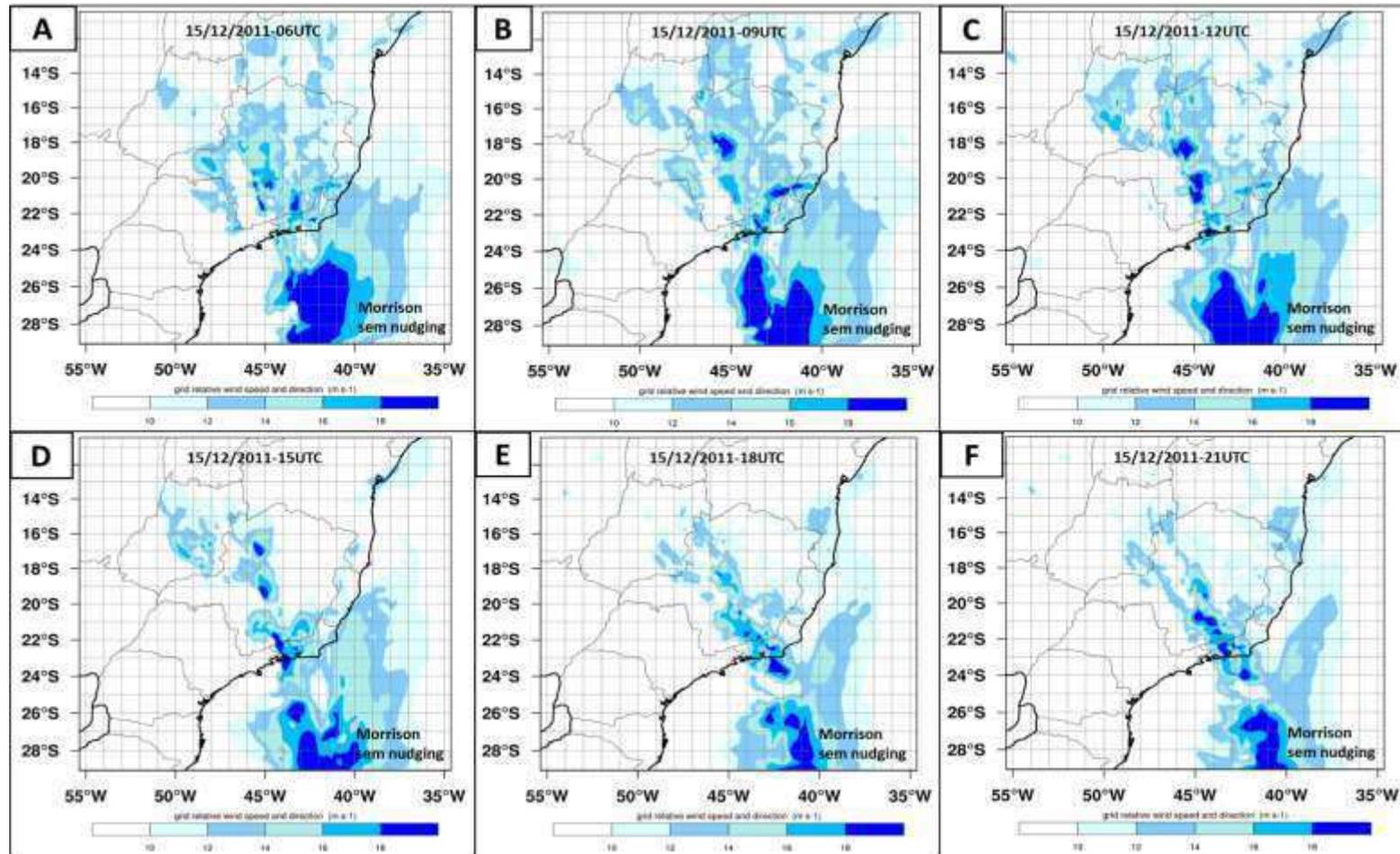


Figura 44: Velocidade do vento (m s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *Morrison double-moment* sem uso da técnica de *spectral nudging*.

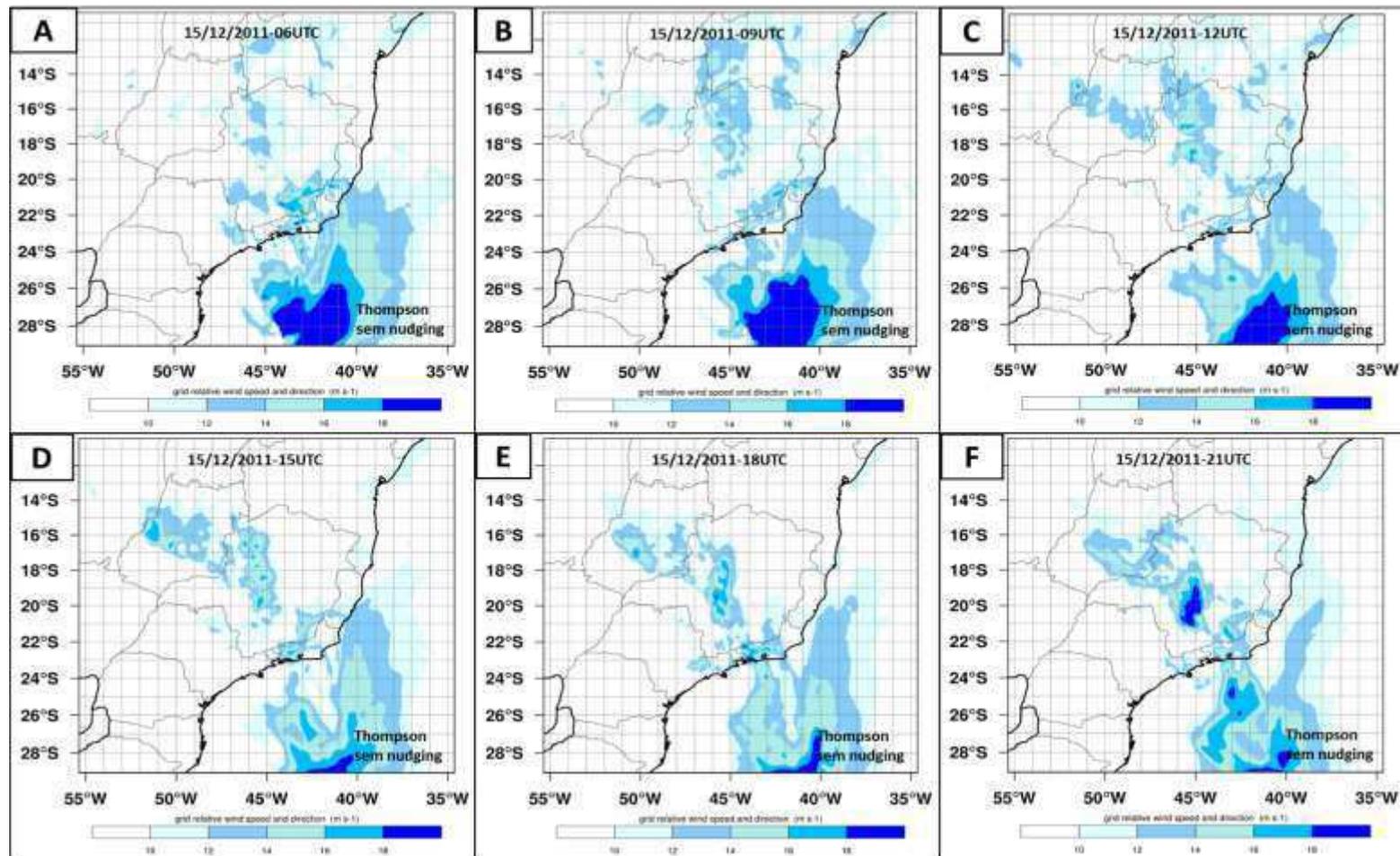


Figura 45: Velocidade do vento (m s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *Thompson aerosol-aware* sem uso da técnica de *spectral nudging*.

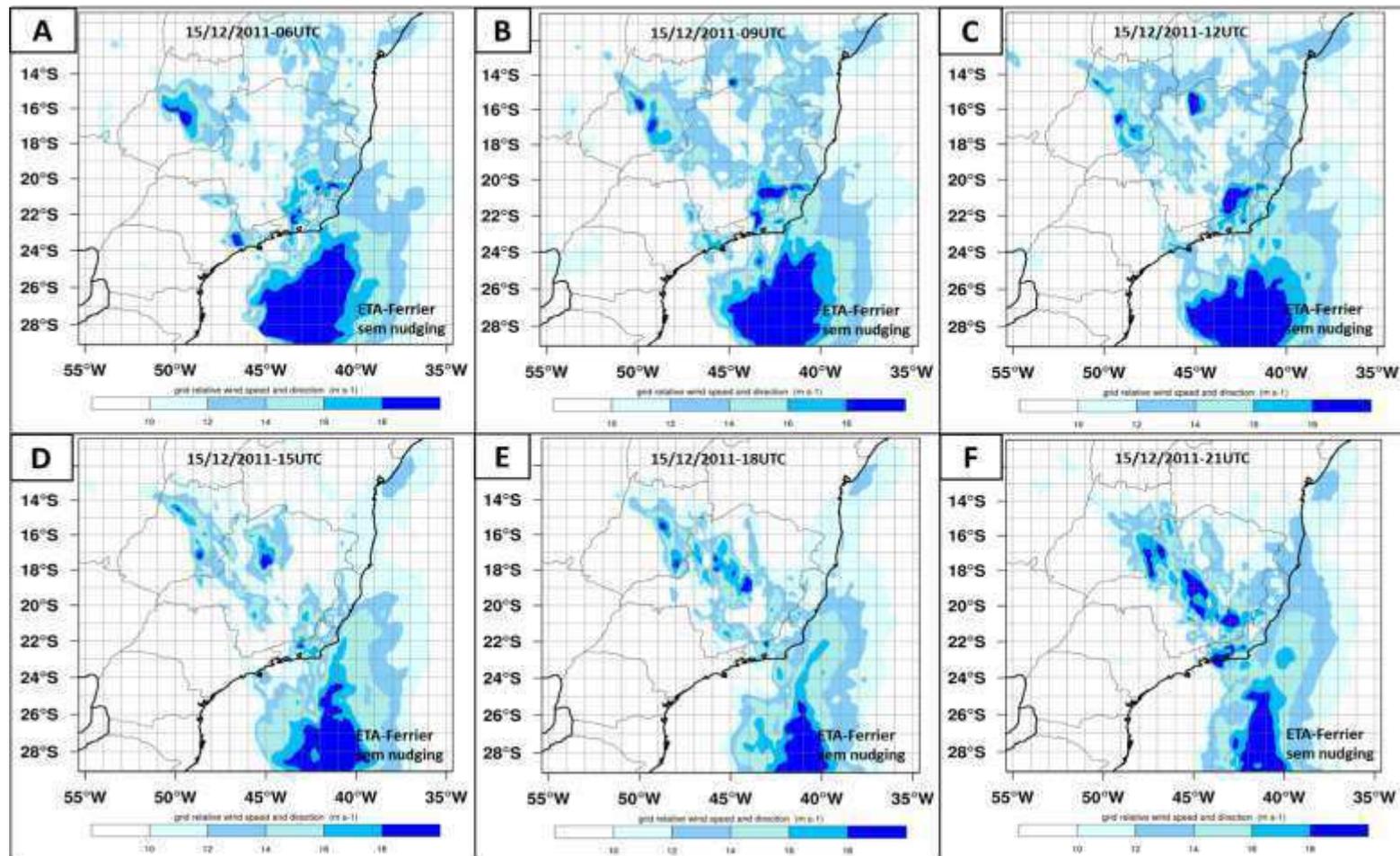


Figura 46: Velocidade do vento (m s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *ETA-Ferrier* sem uso da técnica de *spectral nudging*.

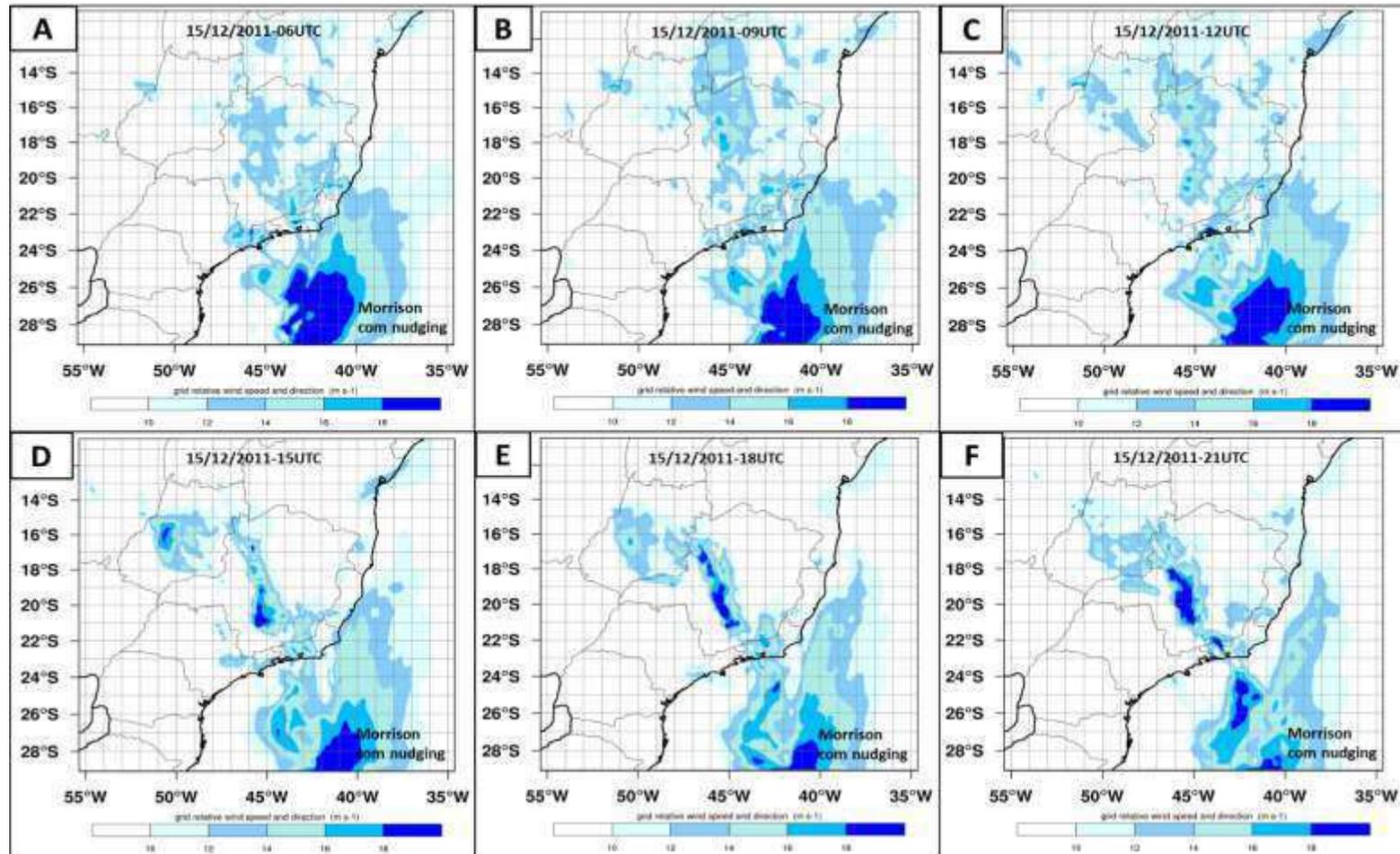


Figura 47: Velocidade do vento (m s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *Morrison double-moment* com o uso da técnica de *spectral nudging*.

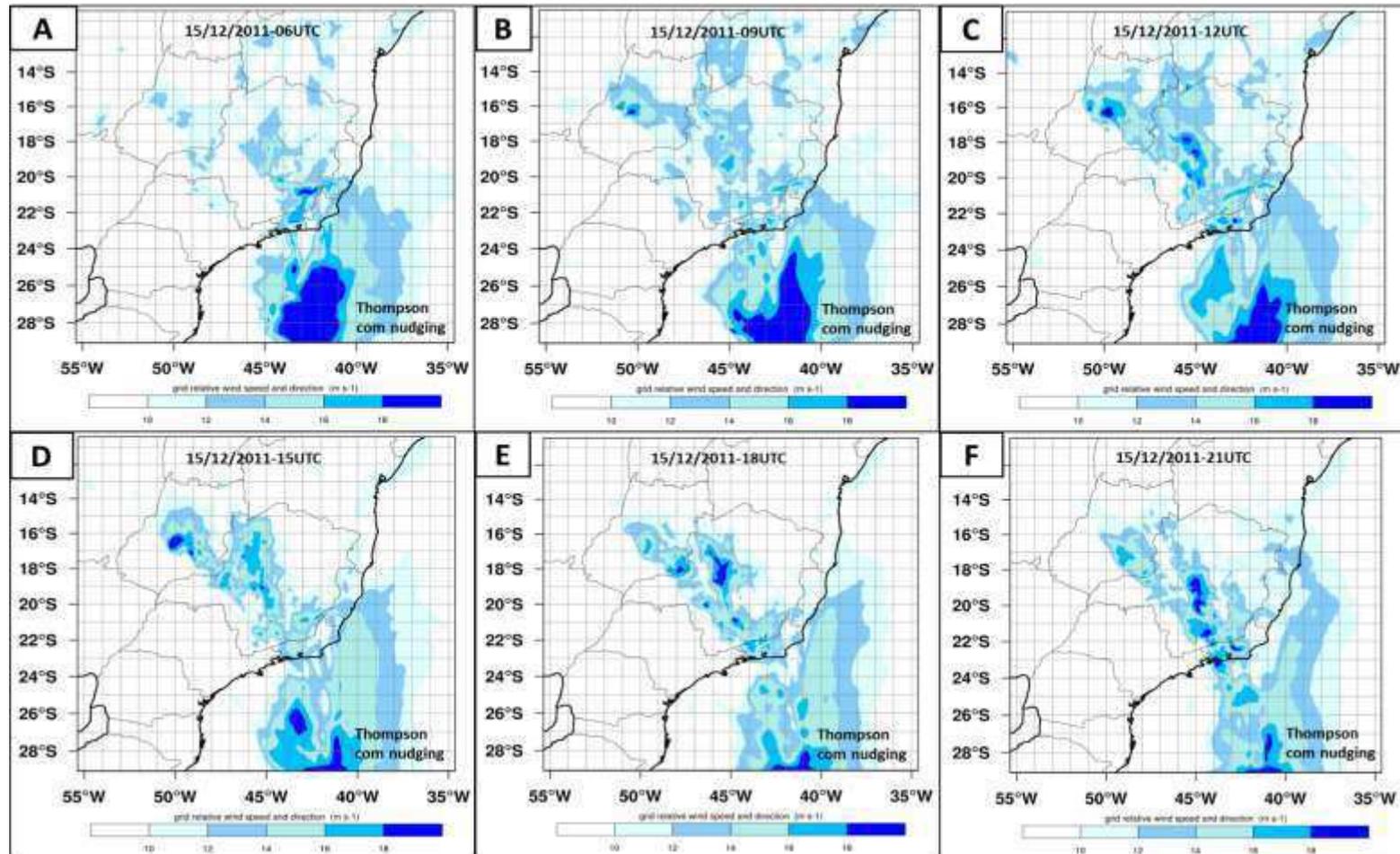


Figura 48: Velocidade do vento (m s^{-1}) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *Thompson aerosol-aware* com o uso da técnica de *spectral nudging*.

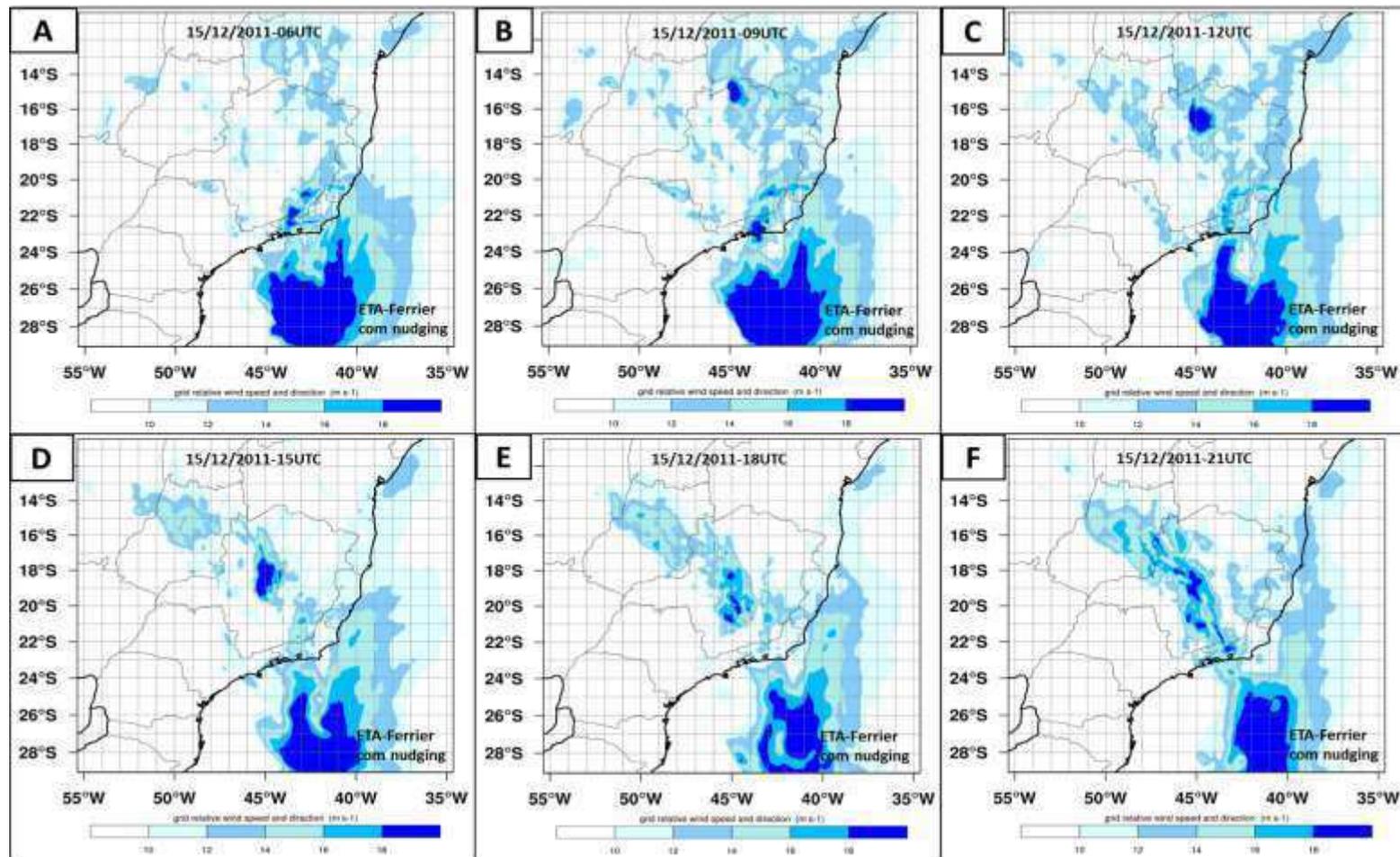


Figura 49: Velocidade do vento ($m s^{-1}$) em 850 hPa simulados para o dia 15 de dezembro de 2011 nos horários (A) 06 UTC; (B) 09 UTC; (C) 12 UTC; (D) 15 UTC; (E) 18 UTC; (F) 21 UTC com a parametrização de microfísica *ETA-Ferrier* com o uso da técnica de *spectral nudging*.

5 Conclusões

No presente trabalho foi realizado um estudo dos mecanismos que contribuíram para a ocorrência das chuvas intensas registradas no estado de Minas Gerais entre os dias 13 e 20 de dezembro de 2011, além de simular o evento com o modelo WRF, para comparar o comportamento de três parametrizações de microfísica de nuvens diferentes usando como diferencial o método de relaxamento espectral, para determinar sua contribuição na representação de um evento de menor escala condicionado por um sistema de escala maior. Os principais resultados obtidos foram os seguintes:

- A presença de um cavado na região Sul-Sudeste em todos os níveis da troposfera, em conjunto com outros fatores dinâmicos, propiciou um episódio de ZCAS que ocasionou os elevados totais de precipitação registrados.
- A chuva intensa e persistente foi o resultado da influência do acoplamento entre a escala convectiva (aquecimento da atmosfera pela liberação de calor latente) e a grande escala (queda na pressão e intensificação da convergência de vapor nos baixos níveis).
- O modelo foi capaz de fazer uma boa representação das precipitações, tanto espacial quanto temporalmente, quando comparado com os valores registrados pelas estações meteorológicas automáticas e convencionais de toda a região.
- Mediante o uso da técnica de relaxamento newtoniano o modelo foi capaz de representar de uma forma mais coerente o sistema existente, com uma maior qualidade nos resultados da simulação, principalmente quando definidas as

- parametrizações de microfísica de nuvens mais completas (*Morrison double-moment scheme* e *Thompson aerosol-aware*).
- Um dos principais mecanismos responsáveis pela intensidade e manutenção das chuvas intensas no período analisado foi o CISK (Instabilidade Condicional de Segunda Ordem), devido a uma convecção profunda com forte liberação de calor latente, que junto a efeitos topográficos contribuiu para manutenção de circulações ciclônicas nos baixos níveis.
- Outros mecanismos foram identificados, trazendo como consequência condições de instabilidade mais acentuadas, como por exemplo a detecção de um Vórtice Ciclônico em Mesoescala (VCM) inserido na região de chuvas estratiformes da ZCAS, em conjunto com forte convergência do vento em níveis médios e baixos da atmosfera e transporte de umidade por um Jato de Baixos Níveis, considerados todos como fatores relevantes para ocorrência das chuvas extremas registradas no período analisado.
- Condições locais incentivaram o processo de convecção e devido a essa forte instabilidade contribuíram para uma maior quantidade de chuva acumulada em pontos onde aconteceu esse processo local.

7 Referências Bibliográficas

- ABREU, M. L. Climatologia da estação chuvosa de Minas Gerais: de Nimer (1977) a Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Revista Geonomos**, Belo Horizonte, v. 6, n. 2, p. 17-22, Dez. 1998.
- AGÊNCIA BRASIL. **Chesf inicia estudo com painéis solares em reservatório de Sobradinho.** Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-11/chesf-inicia-estudo-com-plataformas-solares-no-lago-de-sobradinho>. Acesso em 14 de dezembro de 2018.
- ALMEIDA, M. A. F.; THÉ, A. P. G. A importância da atividade pesqueira artesanal na contribuição para preservação ambiental e cultural no Município de São Francisco/MG. **Revista Associação dos Geógrafos brasileiros**, v. 2, n. 1, 2010.
- ALMEIDA, V. A.; MARTON, E. Chuvas Intensas em Santa Catarina: Análise sinótica de um evento extremo e simulação numerica com o modelo atmosferico WRF. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, n. 2, p. 169-179, 2014.
- ALVARENGA, L. A. Precipitação no sudeste brasileiro e sua relação com a Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Revista Agrogeoambiental**, v. 4, n.2, p. 1-7, 2012.
- ALVAREZ, A. S. M.; CASTRO, D. M.; KUMAR, S.; ESTEVAN, R.; SILVA, Y. Response of the WRF model to different resolutions in the rainfall forecast over the complex Peruvian orography. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 137, n. 3-4, p. 2993-3007, 2019.

- ALVES JUNIOR, M. P. **Impacto das parametrizações de microfísica na previsão de precipitação utilizando assimilação de dados de radar**. 2017. 148p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE., São José dos Campos.
- BACELAR, T. S. **Características das condições ambientais no reservatório da UHE Sobradinho no contexto da geração fotovoltaica flutuante**. 2019. 95p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco. (UFPE), Recife/PE.
- BARBIERI, L. F. P.; CORREIA, M. F.; SILVA ARAGÃO, M. R.; VILAR, R. A. A.; MOURA, M. S. B. Impact of climate variations and land use change: a Mann-Kendall application. **Revista Geama**, v. 10, n. 1, p. 19-27, 2017.
- BARRETO, I. D. C.; SANTOS, E. F. N.; STOSIC, T. Análise de Fisher-Shannon da vazão do Rio São Francisco: A influência de barragens e reservatórios. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. 1-18, 2020.
- BJERKNES, V. Das Problem der Wettervorhersage: betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. **Meteor. Z**, v. 21, p. 1-7, 1904.
- BLAZQUEZ, J.; NUÑEZ, M. N. **Sensitivity to convective parameterization in the WRF regional model in southern South America**. In: Ninth Int. Conf. on Southern Hemisphere Meteorology and, Oceanography, Melbourne, Australia. 6p. 2009.
- BLUESTEIN, H.B. **Severe convective storms and tornadoes - Observations and Dynamics**. Springer, 2013. 456p.
- BONNER, William D. Climatology of the low level jet. **Monthly Weather Review**, v. 96, n. 12, p. 833-850, 1968.
- BOZZINI, P. L.; MELLO JUNIOR, A. V. Previsões de Precipitação de Modelos Atmosféricos como Subsídio à Operação de Sistemas de Reservatórios. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 99-109, 2020.

- BRANDÃO, R. S.; FISCH, G. F. A zona de convergência do Atlântico Sul e seus impactos nas enchentes em áreas de risco em Guaratinguetá - SP. **Revista Biociências**, v. 14, n. 2, 2009.
- CABRAL JUNIOR, J. B.; SANTOS E SILVA, C. M.; ALMEIDA, H. A.; BEZERRA, B. G.; SPYRIDES, M. H. C. Detecting linear trend of reference evapotranspiration in irrigated farming areas in Brazil's semiarid region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 138, n. 1, p. 215-225, 2019.
- CARDOSO, L. K. D. S. **Aspectos climáticos das posições da zona de convergência intertropical e dos anticiclones semipermanentes do Atlântico Sul e do Pacífico Sul: relações com regimes de chuva no nordeste do Brasil**. 2019. 89p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande/PB.
- CARVALHO, L. M. V; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88–108, 2004.
- CASTRO, C. N.; PEREIRA, C. N. Revitalização do Rio São Francisco. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental.**, v. 1, n. 17. 2017.
- CBHSF (Comitê da Bacia do Rio São Francisco). **A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: Principais características**. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>> Acesso em 31 jan. 2022.
- CHARNEY, J. G.; FJÖRTOFT, R.; NEUMANN, J. V. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. **Tellus**, v. 2, n. 4, p. 237–254, 1950.
- CHENG, C.; YAN, L.; MIRCHI, A.; MADANI, K. China's booming hydropower: Systems modeling challenges and opportunities. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 1, p. 02516002. 2017.
- CHOU, S. C.; JUSTI DA SILVA, M. G. A. Objective evaluation of ETA model precipitation forecast over South America. **Climanalise**, v.1, n. 1, p. 1-17, 1999.

- COELHO, M. A. T. **Os descaminhos do São Francisco**. Ed. São Paulo: Paz e Terra, 2005.
- COMIN, A. N.; JUSTINO, F.; PEZZI, L.; GURJÃO, C. D. S.; SHUMACHER, V.; FERNÁNDEZ, A.; SUTIL, U. A. Extreme rainfall event in the Northeast coast of Brazil: a numerical sensitivity study. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 133, n. 2, p. 141-162, 2021.
- COMITÊ BRASILEIRO DA COMISSÃO DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA (BRACIER). Com maior potencial de crescimento, eólica é complementar à hidrelétrica. Disponível em <<https://www.bracier.org.br/noticias/brasil/4329-com-maior-potencial-decrescimento-eolica-e-complementar-a-hidreletrica.html>>. Acesso em 11 mai. 2020.
- CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F. Variação do nível do reservatório de Sobradinho e seu impacto sobre o clima da região. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.8, n.1, p.157-168, 2003.
- CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA ARAGÃO, M. R. Soil occupation and atmospheric variations over Sobradinho lake área. Part two: a regional modeling study. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 94, p. 115-128, 2006.
- DANTAS, G. D.; OLIVEIRA, L. A. Análise da continuidade espacial da precipitação na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco em sua área de ocorrência no estado de Minas Gerais - Brasil, série histórica 2004 a 2017. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 23585-23595, 2021.
- DI LEONI P. C.; MAZZINO A.; BIFERALE L. Inferring flow parameters and turbulent configuration with physics-informed data assimilation and spectral nudging. **Physical Review Fluids**, v. 3, n. 10, p. 104-114, 2018.
- DOS SANTOS, E. P.; CORREIA, M. F. Eventos extremos de chuva e alterações no regime hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: Uma aplicação do índice RAI (Rainfall Anomaly Index). **Engenharia Ambiental**, v. 8, n. 2, p. 315-330, 2011.
- DOS SANTOS, E. P. **Variabilidade Climática e Eventos Hidrológicos Extremos na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. 2012. 68p. Dissertação (Mes-

trado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande/PB.

DOS SANTOS, E. P. **Variabilidade espaço-temporal de chuvas extremas na bacia hidrográfica do rio São Francisco: uma aplicação conjunta do índice RAI (Rainfall Anomaly Index) e ondaletas**. 2016. 152p. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande/PB.

DOS SANTOS, J. G. M. **Introdução ao NCAR Command Language (NCL)**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 396p, 2018.

EBERT, E. E. Ability of a Poor Man's Ensemble to Predict the Probability and Distribution of Precipitation. **Monthly Weather Review**. v.129, p.2461-2480, 2001.

ESCOBAR, G. C. J. Padrões de circulação em superfície e em 500 hPa na América do Sul e eventos de anomalias positivas de precipitação no estado de Minas Gerais durante o mês de dezembro de 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 105-124, 2014.

ESCOBAR, G. C. J. Climatologia sinótica associada com episódios de Zona De Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, **Anais do XX Congresso Brasileiro de Meteorologia**, p. 871-876, Maceió, 2018.

ESCOBAR, G. C. J.; CARVALHO, C. I. Situações meteorológicas associadas a episódios da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). In: CONGRESSO ARGENTINO DE METEOROLOGIA, 9, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: Editora, 2005.

ESCOBAR, G. C. J.; MATOSO, V., 2018. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS): Definição prática segundo uma visão operacional. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, **Anais do XX Congresso Brasileiro de Meteorologia**, p. 975-982, Maceió, 2018.

FAGGIANI, A. P. S.; QUADRO, M. F. L.; GONÇALVES, L. G. G.; HERDIES, D. L. Estudo das componentes do balanço hidrológico durante episódios de ZCAS. **Ciência e Natura**, v. 42, Special Edition, p. 1-23, 2020.

- FARIAS, W. R. G.; CORREIA, M. F. Descargas atmosféricas e interrupções de energia elétrica na área da CHESF: relação com variáveis atmosféricas em anos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 270-281, 2008.
- FERNÁNDEZ, R.; LAKKIS, G.; ALLENDE D.; SANTOS, R.; CREMADES, P; PULIAFITO E. Modelación de un evento meteorológico de mesoescala utilizando el modelo WRF. In: PULIAFITO, E. **Contaminación Atmosférica e Hídrica en Argentina**. Ed. Universidad Tecnológica Nacional., 2011. pp 289-298.
- FERREIRA, D. B.; BARROSO, G. R.; DANTAS, M. S.; OLIVEIRA, K. L. D.; CRISTOFARO, C.; OLIVEIRA, S. C. Comportamento pluviométrico na bacia hidrográfica do Rio São Francisco em Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 26, n. 27, p. 1-13, 2021.
- FERREIRA, J. G. A transposição das águas da bacia do rio São Francisco no contexto da resposta à seca do Nordeste. **Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade (ANPPAS)**, 2017.
- FERREIRA, R. C.; ALVES JUNIOR, M. P.; VENDRASCO, E. P.; ARAVEQUIA, J. A.; NOLASCO JUNIOR, L. R.; BISCARO, T. S. Impacto das Parametrizações de Microfísica na Previsão de Precipitação utilizando Assimilação de Dados de Radar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 123-134, 2020.
- FERRIER, B. S. A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I: Description. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 51, n. 2, p. 249-280, 1994.
- FONSECA, E. R.; MODESTO, F. A.; CARNEIRO, G. C. A.; LIMA, N. F. S.; MONTE-MOR, R. C. A. Conflitos pelo uso da água na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco—Estudos de caso no Estado da Bahia. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, 2020.
- G1 – GLOBO. **MG: chuva deixa 21 municípios em situação de emergência**. Disponível em: <https://g1.globo.com/bom-dia-brasil/noticia/2011/12/mg-chuva-deixa-21-municipios-em-situacao-de-emergencia.html>. Acesso em 25 de dezembro de 2019.

- GEORGE, J.J. **Weather Forecasting for Aeronautics**. Academic Press, New York. 1960. 673 pp.
- GOMES, N. M. O. **Transporte de vapor d'água da amazônia para o centro oeste, sul e sudeste do Brasil a partir de dados de reanálise**. 2019. 51p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande/PB.
- GOMEZ B., MIGUEZ-MACHO G., The impact of wave number selection and spin-up time in spectral nudging, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, vol. 143, n. 705, p. 1772-1786, 2017.
- GOZZO, L. F.; ROCHA, R. P.; GIMENO L.; DRUMOND, A. Climatology and numerical case study of moisture sources associated with subtropical cyclogenesis over the southwestern Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 11, p. 5636-5653, 2017.
- GRELL, G. A.; DUDHIA, J.; STAUFFER, D. R. A description of the fifth generation Penn State/ NCAR mesoscale model (MM5). **Note TN-398+ STR**, v. 122, 1995.
- GRIMM, A.M.; TEDESCHI, R.G. Influência de eventos El Niño e La Niña sobre a frequência de eventos extremos de precipitação no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004.
- GUO X.; ZHONG W., 2017: The Use of a Spectral Nudging Technique to Determine the Impact of Environmental Factors on the Track of Typhoon Megi (2010). **Atmosphere**, n. 8, v. 12, p. 257-268, 2017.
- HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Análise de desempenho de índices de instabilidade atmosférica na previsão de fenômenos convectivos de mesoescala na região metropolitana de São Paulo entre 28 de janeiro e 04 de fevereiro de 2004. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 173-206, 2012.
- HARNACK, R. P.; APFFEL, K.; CERMAK III, J. R. Heavy precipitation events in New Jersey: Attendant upper-air conditions. **Weather and forecasting**, v. 14, n. 6, p. 933-954, 1999.

- HERSBACH, H., DEE, D. ERA5 reanalysis is in production. **ECMWF newsletter**, v. 147, n.7, 2016.
- HOLTON, James R.; HAKIM, Gregory J. **An introduction to dynamic meteorology**. 4. ed. San Diego: Academic Press, v.88, 2012.
- HOUZE, R. A., Jr. Cloud Dynamics. **Academic Press**, San Diego, 573p, 2014.
- HUANG, Z.; ZHONG, L.; MA, Y.; FU, Y. Development and evaluation of spectral nudging strategy for the simulation of summer precipitation over the Tibetan Plateau using WRF (v4. 0). **Geoscientific Model Development**, v. 14, n. 5, p. 2827-2841, 2021.
- IBGE, **Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>> Acesso em: 20 jul. 2019.
- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Situação da seca observada nas regiões Norte e Nordeste do Brasil em 2016**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/notas_tecnicas/trabalho_tecnico_02-2017.pdf> Acesso em: 15 abr. 2020.
- IM, E. S.; IN, S. R.; HAN, S. O. Numerical simulation of the heavy rainfall caused by a convection band over Korea: a case study on the comparison of WRF and CReSS. **Natural Hazards**, v. 69, n. 3, p. 1681-1695, 2013.
- IORIS, A. A. R. Water resource development. In: **São Francisco river basin (Brazil): Conflicts and management perspectives**. International Water Resources Association, Aberdeen, v.26, n.1, p.24-39, 2001.
- KESSLER, E. Models of microphysical parameters and processes. **Meteorological Monographs**, v. 10, p. 26–31, 1969.
- KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos**. 1. ed. Curitiba: Organic Trading, 2006. v. 1. 109p.
- KODAMA, Y.-M. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ), Part I: Characteristics of subtrop-

- ical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 70, p. 813–835, 1992.
- KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.3, n.1, p.217-231, 1988.
- KULIGOWSKI, R.A. Self-calibrating real-time GOES rainfall algorithm for short-term rainfall estimates. **Journal of Hydrometeorology**, v. 3, p. 112-130, 2002.
- LIEBMANN, B.; KILADS, G. N.; MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; GLICK, J. D. Sub-monthly convective variability over South America and South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 12, p. 1877-1891, 1999.
- MARTINS, D. M. F.; CHAGAS, R. M.; MELO NETO, J. D. O.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 9, p. 1054-1061, 2011.
- MARTINS, R. C. G. **Estudo da sensibilidade do modelo WRF às parametrizações de microfísica de nuvens e à assimilação de dados observados**. 2014. 126p. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande/PB
- MEDIOTTE, E. J. Meta-avaliação do relatório de auditoria operacional no programa de revitalização da bacia hidrográfica do rio São Francisco sob a perspectiva da macroescola, gerencialista de políticas públicas. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 1, n. 1, p. 1-18, 2019.
- MELO, E. C. S.; CORREIA, M. F.; ARAGÃO, M. R. Expansão da agricultura irrigada e mudanças nos processos de interação superfície-atmosfera: Um estudo numérico de impacto ambiental em áreas de Caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 960-968, 2014
- MELO, E. C. S.; ARAGÃO, M. R. S.; CORREIA, M. F. Regimes do vento à superfície na área de Petrolina, Submédio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 2, p. 229-241, 2014.

- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia – Noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 2017. 206p
- MENEZES, J. F. G. **Transporte de vapor d'água em casos de ZCAS**. 2019. 54p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande/PB.
- MICHALAKES, J.; DUDHIA, J.; GILL, D.; KLEMP, J.; SKAMAROCK, W. Design of a Next-Generation Regional Weather Research and Forecast Model. **Towards teracomputing**, p. 117-124, 1998.
- MILLER, R. C. Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. **Air Weather Service**, SCOTT AFB IL, 1972, 184p.
- MINUZZI, R. B.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, J. M. N.; VIANELLO, R. L. Influência da La Niña na estação chuvosa da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, p. 345-353, 2007.
- MORALES, W.; YAMASAKI, Y. Análise da Convergência do Fluxo de Umidade Verticalmente Integrada sobre o Brasil previsto pelo modelo WRF. **Ciência e Natureza**, v. 38, n. 1, p. 371-381, 2016.
- MOREIRA, J. L. B. **Estudo da distribuição espacial das chuvas em Belo Horizonte e seu entorno**. 2002. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2002.
- MORRISON, H.; THOMPSON, G.; TATARSKII, V. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one-and two-moment schemes. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 3, p. 991–1007, 2009.
- MOTA, M. A. S.; NOBRE, CARLOS AFONSO. Relação da variabilidade da energia potencial convectiva disponível (CAPE) com a precipitação e a alta da Bolívia durante a campanha Wet-AMC/LBA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 344-355, 2006.

- NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 1, p. 121-140, 2005.
- NÓBREGA, J. N.; DOS SANTOS, C. A. C.; SOUSA, F. D. A. S.; BEZERRA, B. G.; MOURA, G. B. A; BRITO, J. I. B. Estudos de Variabilidades Interanuais e Interdecenais da Precipitação Pluvial das Regiões Hidrográficas Tocantins-Araguaia e São Francisco no Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 2, p. 1116-1130, 2021.
- OLIVEIRA, E. M. G. **Parametrizações convectivas no modelo WRF e sua relação com a precipitação durante ciclogêneses no sudeste da América do Sul**. 2014. 95p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria.
- PADILHA, S. F. **Previsões de Eventos de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro usando o Modelo WRF**. 2011. 83 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- PAL, S.; DOMINGUEZ, F.; DILLON, M. E.; ALVAREZ, J.; GARCIA, C. M.; NESBITT, S. W.; GOCHIS, D. Hydrometeorological observations and modeling of an extreme rainfall event using WRF and WRF-hydro during the RELAMPAGO field campaign in Argentina. **Journal of Hydrometeorology**, v. 22, n. 2, p. 331-351, 2021.
- PALENZUELA, Y. G. **Estudo de um evento de chuva intensa acontecido no município de Pelotas, RS, em janeiro de 2009**. 2017. 84p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Pelotas-UFPEL, Pelotas.
- PEDRO, D. F. P.; FREITAS, A. C. V.; BELOTTI, F. M. A influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) na ocorrência de deslizamentos de massa em Belo Horizonte e cidades vizinhas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 635-659, 2020.
- PEGAHFAR, N.; GHARAYLOU, M.; SHOUSHARI, M. H. Assessing the performance of the WRF model cumulus parameterization schemes for the simula-

tion of five heavy rainfall events over the Pol-Dokhtar, Iran during 1999–2019. **Natural Hazards**, v. 110, n. 2, p. 1-27, 2022.

PEREIRA, A. R. O Rio São Francisco e a hidrelétrica de Três Marias:: história e vivências dos moradores ribeirinhos (1957-1979). **Revista Hydra: Revista Discente de História da UNIFESP**, v. 5, n. 9, p. 302-322, 2021.

PEREIRA FILHO, A. J.; CARBONE, R. E.; JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P.; JOYCE, R., HALLAK, R.; RAMOS, C. G. Satellite rainfall estimates over South America—possible applicability to the water management of large watersheds. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 46, n. 2, p. 344-360, 2010.

PEREIRA, S. B.; PRUSKII, F. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do rio São Francisco e seus principais afluentes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 615-622, 2007.

PIELKE, R. A.; MCNIDER, R. T.; WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J.; NICHOLLS, M. E.; MORAN, M. D.; WELSWY, D. A.; LEE, T. J.; COPELAND, J. H. A comprehensive meteorological modeling system. - RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 49, p.69-91, 1992.

PIMONSREE, S.; RATNAMHIN, P.; VONGRUANG, P.; SUMITSAWAN, S. Impacts of Cumulus Convective Parameterization Schemes on Precipitation at Grey-Zone Resolutions: A Case Study over Complex Terrain in upper Northern Thailand. **International Journal of Environmental Science and Development**, v.7, n.5, p.359-362, 2016.

PIRES, A. P. N. Estrutura e objetivos da transposição do rio São Francisco: versões de uma mesma história. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 23, n. 1, p. 182-197, 2019.

PRIETO, R. B. **Estudo de Eventos Extremos de Chuva Persistente sobre o Rio Grande do Sul entre 2004 e 2013**. 2016. 76p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Pelotas-UFPEL, Pelotas.

- QUADRO, M. L. F. **Estudo de episódios de Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul.** 1994. 124p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE., São José dos Campos.
- QUADRO, M. F. L. **Estudo de vórtices ciclônicos de mesoescala associados a zona de convergência do Atlântico Sul.** 2012. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo
- QUADRO, M. F. L. D.; SILVA DIAS, M. A. F. D.; HERDIES, D. L.; GONÇALVES, L. G. G. D. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n.2, p. 152-162, 2012.
- QUADRO, M. F. L.; DIAS, M. A. F. S.; HERDIES, D. L. Análise de um Vórtice Ciclônico e Mesoescala Associado a ZCAS em Janeiro de 2009. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 273-287, 2016.
- REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, p. 185-204, 2010.
- RINGARD, J.; BECKER, M.; SEYLER, F.; LINGUET, L. Temporal and spatial assessment of four satellite rainfall estimates over French Guiana and North Brazil. **Remote Sensing**, v.7, n.12, p. 16441-16459, 2015.
- ROSA, L. A. S. **Segurança hídrica: um olhar sobre a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.** 2019. 190p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável), Universidade de Brasília. (UnB), Brasília/DF.
- RUIZ, J.; SAULO, C.; KALNAY, E. Comparison of methods used to generate probabilistic quantitative precipitation forecasts over South America. **Weather and Forecasting**, v. 24, n. 1, p. 319-336, 2009.
- SANTOS, M. J.; SILVA DIAS, M. A.; FREITAS, E. D. Influence of local circulations on wind, moisture, and precipitation close to Manaus City, Amazon Region, **Brazil. Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 23, p. 13233-13249, 2014

- SANTOS, E. A. B. D. **Análise da precipitação na Bacia do Rio São Francisco**. 2018. 91p. Tese (Doutorado em Biometria e Estatística Aplicada), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife/PE
- SCHAEFER, J. T. The critical success index as an indicator of warning skill. **Weather and Forecasting**, v. 5, n. 4, p. 570–575, 1990.
- SILVA, C. M. S.; FREITAS, S. R. 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, n. 2, p. 145-157, 2015.
- SILVA DIAS, M. A. F. An Increase in the Number of Tornado Reports in Brazil. **Weather Climate Society**, v. 3, p. 209-217, 2011.
- SILVA, F. B.; ALMEIDA, L. T.; VIEIRA, E. O. Impacto da agricultura irrigada na potência hidrelétrica instalada na bacia do rio São Francisco. **Revista Augustus**, v. 24, n. 49, p. 305-319, 2019.
- SILVA, L. J.; REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P. Relação da Passagem de Frentes Frias na Região Sul de Minas Gerais (RSMG) com a Precipitação e Eventos de Geada. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.14, n. 10, p.232-235, 2014.
- SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p. 355-377, 2019.
- SILVA, M. M. **Tendências e extremos da pluviosidade na região hidrográfica do Rio São Francisco**. 2021. 135p. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia/MG.
- SILVA, M. T.; AZEVEDO, P. V.; DA SILVA, V. P. R.; SILVA, B. K. N.; MARIANO, E. B.; AMORIM, M. R. B. Estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio Rio São Francisco. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 3, p. 203-211, 2017.
- SILVA, N. P. **Estudo dos Mecanismos Vinculados ao Estabelecimento de um Evento de ZCAS Através de Simulações com o Modelo WRF**. 2018. 105p.

Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo

SILVA, P. N.; ESCOBAR, G. C. J.; REBOITA, M. S. Eventos extremos de precipitação no Estado de Minas Gerais associados com a ocorrência de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1013-1023, 2020.

SILVA, P. K. D. O.; ARAGÃO, M. R. S.; CORREIA, M. F.; SANTOS, S. A. Influência de circulações locais em áreas de aproveitamento de potencial eólico na região do Lago de Sobradinho. **Ciência e Natura**, v. 38, Ed. Especial- IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, p.111-117, 2016.

SILVA, P. K. D. O. **Análise e previsão de curto prazo do vento através de modelagem estatística em áreas de potencial eólico no nordeste do Brasil**. 2017. 168p. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande/PB.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; DUDA, M. G.; HUANG, X.; WANG, W.; POWERS, J. G., **A Description of the Advanced Research WRF Version 3**. NCAR/TN-475+STR, Boulder, Colorado, USA: National Center for Atmospheric Research, 2008.

SOUSA, J. A. D. **Projeto de transposição do rio São Francisco e o agrohidronegócio no Cariri cearense**. 2019. 142p. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Pernambuco. (UFPE), Recife/PE.

SOUZA, N. S.; DE JESUS SOUZA, W.; CARDOSO, J. M. S. Caracterização hidrológica e influência da cobertura do solo nos parâmetros de vazão do Rio das Fêmeas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v.22, n.3, p.453-462, 2018.

STAUFFER D. R., SEAMAN N. L., Use of Four-Dimensional Data Assimilation in a Limited-Area Mesoscale Model. Part I: Experiments with Synoptic-Scale Data, **Monthly Weather Review**, vol. 118, n. 6, p. 1250-1277, 1990.

TARTAGLIONE, N. Relationship between precipitation forecast errors and skill scores of dichotomous forecasts. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 1, p. 355–365, 2010.

- TEIXEIRA, M. B.; DE CAMARGO, P. L. T.; JUNIOR, P. P. M. Uso das Imagens de Sensores Remotos para Análise Crítica da Degradação do Cerrado no Alto Médio São Francisco–Minas Gerais. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 245-254, 2018.
- TEIXEIRA, M. S. **Atividade de Ondas Sinópticas relacionada a episódios de chuvas intensas na região sul do Brasil**. 2004. 121p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.
- TEIXEIRA, M. S. **Caracterização física e dinâmica de episódios de chuvas intensas nas regiões sul e sudeste do Brasil**. 2009. 216p. Tese (Doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.
- TEIXEIRA, M. S.; PRIETO, R. B. Eventos Extremos de Chuva no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, entre 2004 e 2013. Parte 1: Definição dos Eventos e Estatísticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 45-52, 2020.
- THOMPSON, G.; EIDHAMMER, T. A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 71, p. 3636–3658, 2014.
- TORRES, F. L. R.; SOUZA FERREIRA, G. W.; KUKI, C. A. C.; VASCONCELLOS, B. T. C.; FREITAS, A. A.; NASCIMENTO SILVA, P.; SOUZA, C. A.; REBOITA, M. S. Validação de diferentes bases de dados de precipitação nas bacias hidrográficas do Sapucaí e São Francisco. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 368-404, 2020.
- TREISTMAN, F. **Análise das Correlações Existentes Entre Precipitação e Vazão em Usinas Hidrelétricas Brasileiras**. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 85p, 2015.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 3ª Ed., 2004.

- UVO, C. B. **A zona de convergência intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na região norte do nordeste brasileiro.** 1989. 99p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE., São José dos Campos.
- VIANELLO, R. L.; MAIA, L. F. P. G. Estudo preliminar da climatologia dinâmica do Estado de Minas Gerais. **Revista Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 138, p. 6-8, 1986.
- VILAR, R. A. A.; CORREIA, M. D. F.; NOBREGA, R. S.; ARAGÃO, M. R. S.; BARBIERI, L. F. P.; MOURA FILHO, M. G. D. Avaliação do Impacto de Secas Severas no Nordeste Brasileiro na Geração de Energia Elétrica Através do Modelo Newave: Projeção das Energias Afluentes e Armazenadas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 89-98, 2020.
- VINCENT C. L., HAHMANN A. N. The Impact of Grid and Spectral Nudging on the Variance of the Near-Surface Wind Speed, **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 54, n. 5, p. 1021-1038, 2015.
- VON STORCH H.; LANGENBERG H.; FESER F. A Spectral Nudging Technique for Dynamical Downscaling Purposes. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 1, p. 3664-3673, 2000.
- WALDRON K. M., PAEGLE J., HOREL J. D. Sensitivity of a Spectrally Filtered and Nudged Limited-Area Model to Outer Model Options. **Monthly Weather Review**, v. 124, n. 3 p. 529-547, 1996.
- WANG, H.; SUN, J.; FAN, S.; HUANG, X.Y. Indirect assimilation of radar reflectivity with WRF 3D-VAR and its impact on prediction of four summertime convective events. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 52, n. 4, p. 889-902, 2013.
- WANG, W.; BRUYÈRE, C.; DUDA, M.; DUDHIA, J.; GILL, D.; KAVULICH, M.; WERNER, K.; CHEN, M.; LIN, H. C.; MICHALAKES, J.; RIZVI, S.; ZHANG, X.; BERNER, J.; MUNOZ-ESPARZA, D.; REEN, B.; HA, S.; FOSSELL, K. **ARW version 4 modelling system user's guide.** 456 p. 2019.

- WARNER, T.T. **Numerical Weather and Climate Prediction**. 2010. University Press, Cambridge, England. 194p.
- WHITEMAN, C. D.; BIAN, X.; ZHONG, S. Low-level jet climatology from enhanced rawinsonde observations at a site in the southern Great Plains. **Journal of Applied Meteorology**, v. 36, n. 10, p. 1363-1376, 1997.
- WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. San Diego: Academic Press, v. 91, 2006.
- XUE, M.; DROEGEMEIER, K. K.; WONG, V. The advanced regional prediction system (ARPS) - a multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 75, p. 161-193, 2000.
- YANG, M. J; TUNG, Q. C. Evaluation of Rainfall Forecasts over Taiwan by Four Cumulus Parameterization Schemes. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 81, n. 5, pp. 1163-1183, 2003.
- ZELLHUBER, A; SIQUEIRA, R. Rio São Francisco em descaminho: degradação e revitalização. **Cadernos do CEAS: Revista crítica de humanidades**, 2016, n. 227, p. 3-24.

ANEXO 1

Anexo 1.1 - Mensagens METAR do Aeroporto de Pampulha para o dia 15 de dezembro de 2011

Fonte: <https://www.redemet.aer.mil.br/>

METAR Aeroporto de Pampulha (BH)			
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 150000Z 10001KT 4000 -TSRA BKN020 FEW040CB OVC100 19/18 Q1014 RERA=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 150100Z 08003KT 5000 -RA BKN020 FEW035TCU OVC100 19/18 Q1 014 RETS=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 150200Z 08001KT 9999 -RA FEW012 SCT020 OVC100 19/17 Q1014=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 150300Z 07001KT 9999 -RA SCT012 SCT020 OVC100 19/17 Q1014=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 150400Z 10001KT 9999 -RA SCT012 SCT020 OVC100 19/18 Q1013=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 150500Z 09001KT 9999 -RA SCT012 SCT020 OVC100 19/17 Q1013=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 150600Z 08001KT 5000 -RA SCT012 SCT020 OVC100 19/17 Q1012=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 150700Z 07001KT 5000 -RA BR SCT012 SCT020 OVC100 19/18 Q1 012=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 150800Z 07001KT 4000 -RA BR SCT012 SCT020 OVC100 20/18 Q1012=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 150810Z 09002KT 4000 -RA BR BKN010 SCT020 OVC070 20/18 Q1 012=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 150810Z 09002KT 4000 -RA BR BKN010 SCT020 OVC090 20/18 Q1013=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 150825Z 09002KT 3000 RA BR SCT005 BKN008 OVC070 20/18 Q10 13=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 150825Z 09002KT 2500 RA BR SCT005 BKN008 OVC070 20/18 Q10 13=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 150900Z 00000KT 2500 RA SCT005 BKN008 OVC070 19/18 Q1013=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 150934Z 00000KT 2000 RA BR SCT005 BKN006 OVC070 20/18 Q10 13=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 151000Z 00000KT 1600 RA BR SCT005 BKN006 OVC070 20/19 Q10 14=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 151006Z 28005KT 1500 RA BKN004 OVC070 20/19 Q1014=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 151006Z 28005KT 1500 RA BR BKN004 OVC070 20/19 Q1014=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 151100Z 00000KT 3000 RA BR SCT005 BKN008 OVC070 20/19 Q10 14=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 151200Z 00000KT 1600 RA BR SCT005 BKN006 OVC080 20/19 Q10 14=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 151244Z 07002KT 1200 RA BR BKN004 BKN006 OVC080 20/19 Q10 14=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 151300Z 00000KT 1200 RA BR BKN004 BKN006 OVC080 20/19 Q10 14=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 151325Z 00000KT 2000 RA BR SCT004 BKN006 OVC080 20/19 Q10 14=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 151400Z 00000KT 2000 RA BR SCT004 BKN006 OVC080 20/19 Q10 14=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 151410Z 00000KT 5000 -RA BR SCT006 BKN008 OVC080 21/19 Q1 014=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 151410Z 00000KT 5000 -RA BR SCT006 BKN008 OVC080 21/19 Q1 014 RERA=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 151500Z 00000KT 5000 -RA SCT005 BKN008 OVC100 21/19 Q1014 RERA=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 151530Z 00000KT 4000 -RA BR SCT004 BKN006 OVC080 21/19 Q1013=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 151600Z 03001KT 4000 -RA BR SCT004 BKN006 OVC080 21/20 Q1013=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 151635Z 00000KT 7000 -RA SCT005 BKN009 OVC090 22/20 Q1012=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 151700Z 00000KT 6000 -RA SCT006 BKN008 OVC090 22/20 Q1012=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 151800Z 00000KT 4000 -RA FEW006 BKN010 OVC090 22/20 Q1011=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 151900Z 26002KT 3000 -RA FEW006 BKN010 OVC090 22/20 Q1011=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 152000Z 00000KT 4000 -RA FEW006 BKN010 OVC080 21/19 Q1011=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 152020Z 00000KT 7000 -RA FEW008 BKN015 OVC070 21/19 Q1011=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 152100Z 00000KT 7000 -RA SCT008 BKN015 OVC090 21/19 Q1012=
SBBH	SPECI	15/12/2011	SPECI SBBH 152145Z 00000KT 4000 -RA BR BKN008 OVC090 21/19 Q1012=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 152200Z 00000KT 4000 -RA BR BKN008 OVC090 21/19 Q1012=
SBBH	METAR	15/12/2011	METAR SBBH 152300Z 00000KT 4000 -RA BR FEW006 BKN008 OVC090 21/19 Q1013=

Anexo 1.2 - Mensagens METAR do Aeroporto de Pampulha para o dia 16 de dezembro de 2011
 Fonte: <https://www.redemet.aer.mil.br/>

METAR Aeroporto de Pampulha (BH)			
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16000Z 0000KT 4000 -RA FEW006 BKN008 OVC090 21/19 Q1014=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16010Z 0000KT 4000 -RA BR FEW006 BKN008 OVC090 20/19 Q1014=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16020Z 0000KT 4000 -RA BR FEW006 BKN008 OVC090 20/19 Q1014=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16030Z 0000KT 4000 -RA SCT006 BKN008 OVC090 20/19 Q1013=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16040Z 0000KT 4000 -RA SCT006 BKN008 OVC090 20/19 Q1012=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16050Z 0000KT 4000 -RA SCT006 BKN008 OVC090 20/19 Q1012=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16060Z 0000KT 4000 -RA SCT006 BKN008 OVC090 20/19 Q1012=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16070Z 0900KT 4000 -RA SCT006 BKN008 OVC090 20/19 Q1012=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16080Z 0800KT 4000 -RA BR FEW006 BKN008 OVC090 20/19 Q1012=
SBBH	SPECI	16/12/2011	SPECI SBBH 160826Z 0000KT 4000 -RA BR SCT004 BKN006 OVC090 20/18 Q1 012=
SBBH	SPECI	16/12/2011	SPECI SBBH 160826Z 0000KT 2500 -RA BR SCT004 BKN006 OVC090 20/18 Q1 012=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16090Z 2800KT 3500 -RA BR FEW004 BKN006 OVC100 20/18 Q1013=
SBBH	SPECI	16/12/2011	SPECI SBBH 160923Z 0000KT 5000 BR BKN006 OVC090 20/18 Q1013=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16100Z 0000KT 3000 -RA BR BKN006 OVC090 20/18 Q1014=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16110Z 3001KT 7000 BKN006 OVC090 20/18 Q1014=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16120Z 3001KT 5000 -RA BR FEW006 BKN008 OVC100 20/18 Q1 015=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16130Z 3002KT 9000 -RA BKN008 OVC100 21/19 Q1015=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16140Z 3005KT 9000 -RA BKN008 OVC100 22/19 Q1015=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16150Z 3002KT 9999 BKN012 OVC100 23/19 Q1014=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16160Z 3100KT 9999 BKN012 BKN100 24/18 Q1013=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16170Z 3200KT 9999 -RA BKN012 BKN100 25/18 Q1013=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16180Z 3100KT 5000 -RA BR BKN012 BKN100 24/20 Q1012=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16190Z 0000KT 8000 BKN012 FEW030TCU BKN100 23/20 Q1012=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16200Z 0000KT 9999 BKN012 BKN100 24/20 Q1012=
SBBH	SPECI	16/12/2011	SPECI SBBH 162013Z 0000KT 9999 BKN012 BKN100 23/20 Q1012=
SBBH	SPECI	16/12/2011	SPECI SBBH 162013Z 0000KT 9999 BKN020 BKN100 23/20 Q1012=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16210Z 0000KT 9999 SCT020 BKN100 23/20 Q1012=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16220Z 0500KT 8000 -TSRA SCT015 FEW030CB BKN100 23/19 Q1013=
SBBH	METAR	16/12/2011	METAR SBBH 16230Z 0000KT 6000 -TSRA SCT015 FEW030CB BKN100 22/20 Q1015=

Anexo 1.3 - Mensagens METAR do Aeroporto de Pampulha para o dia 17 de dezembro de 2011

Fonte: <https://www.redemet.aer.mil.br/>

METAR Aeroporto de Pampulha (BH)			
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 170000Z 17003KT 6000 -TSRA SCT015 FEW030CB BKN100 21/19 Q1015=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 170100Z 00000KT 9999 SCT015 BKN100 21/19 Q1016 RETS=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 170200Z 00000KT 5000 -DZ BKN012 BKN100 21/19 Q1015=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 170300Z 00000KT 9000 BKN012 BKN100 21/20 Q1015=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 170400Z 00000KT 5000 -RA BR BKN012 OVC090 21/20 Q1014=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 170500Z 27001KT 8000 BKN012 BKN090 21/19 Q1014=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 170600Z 28001KT 4000 RA BR BKN010 OVC080 20/18 Q1015=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 170700Z 00000KT 4000 -RA BR BKN010 OVC080 20/18 Q1015 RERA=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 170800Z 00000KT 4000 -RA BR FEW007 BKN010 OVC080 20/18 Q1015=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 170900Z 00000KT 5000 -RA SCT007 BKN010 OVC080 20/18 Q1016=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 171000Z 00000KT 5000 -RA SCT007 BKN010 OVC080 20/19 Q1016=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 171100Z 00000KT 4000 -RA SCT007 BKN010 OVC080 20/19 Q1016=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 171200Z 00000KT 5000 -RA BR SCT007 BKN010 OVC080 20/19 Q1017=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 171300Z 05002KT 5000 BR SCT007 BKN010 OVC080 22/20 Q1017=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 171400Z 00000KT 8000 BKN012 BKN090 23/17 Q1017=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 171500Z 33002KT 6000 -RA BKN012 BKN100 23/19 Q1016=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 171600Z 30004KT 9999 BKN012 BKN100 23/20 Q1016=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 171700Z 30003KT 9999 BKN012 BKN100 25/19 Q1014=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 171800Z 30004KT 9999 BKN012 BKN100 24/18 Q1014=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 171900Z 28003KT 6000 -RA BKN012 BKN100 24/19 Q1014=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 172000Z 00000KT 9999 BKN012 BKN100 24/19 Q1014=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 172100Z 00000KT 9999 SCT012 BKN100 23/19 Q1014=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 172200Z 00000KT 9999 SCT012 BKN100 23/19 Q1015=
SBBH	METAR	17/12/2011	METAR SBBH 172300Z 00000KT 9999 -RA SCT020 BKN100 22/20 Q1015=

Anexo 1.4 - Mensagens METAR do Aeroporto de Pampulha para o dia 18 de dezembro de 2011

Fonte: <https://www.redemet.aer.mil.br/>

METAR Aeroporto de Pampulha (BH)			
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 180000Z 28001KT 9999 -RA SCT020 BKN100 22/19 Q1016=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 180100Z 00000KT 9999 -RA SCT020 BKN100 21/19 Q1016=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 180200Z 00000KT 4000 -RA BKN012 OVC090 20/19 Q1017=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 180300Z 00000KT 4000 -RA BKN012 OVC080 20/19 Q1016=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 180400Z 00000KT 4000 RA SCT006 BKN012 OVC080 20/19 Q1016=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 180500Z 00000KT 4000 RA SCT006 BKN012 OVC080 20/19 Q1015=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 180600Z 00000KT 4000 -RA SCT007 BKN010 OVC080 20/19 Q1015 RERA=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 180700Z 00000KT 4000 -RA SCT007 BKN010 OVC080 20/19 Q1015=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 180800Z 00000KT 3000 RA SCT006 BKN010 OVC080 20/18 Q1016=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH COR 180900Z 00000KT 3000 RA SCT006 BKN010 OVC080 20/19 Q1016=
SBBH	SPECI	18/12/2011	SPECI SBBH 180938Z 00000KT 2000 RA BKN006 BKN010 OVC080 20/18 Q1016=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 181000Z 00000KT 2000 RA BKN006 BKN010 OVC080 20/19 Q1017=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 181100Z 00000KT 3000 -RA BKN006 BKN010 OVC080 20/19 Q1017 RERA=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 181200Z 00000KT 3000 -RA BKN006 BKN010 OVC080 20/19 Q1017=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 181300Z 00000KT 3000 -RA BKN006 BKN010 OVC080 21/19 Q1017=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 181400Z 00000KT 4000 -RA BKN006 BKN010 OVC080 22/19 Q1017=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 181500Z 30001KT 4000 -RA SCT006 BKN010 OVC080 23/19 Q1017=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 181600Z 28001KT 4000 -RA SCT006 BKN010 OVC080 23/19 Q1016=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 181700Z 30001KT 4000 -RA BKN008 OVC080 22/19 Q1015=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 181800Z 00000KT 9999 -RA BKN008 OVC080 22/19 Q1014=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH COR 181900Z 00000KT 6000 -RA SCT008 BKN015 OVC080 22/19 Q1014=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 182000Z 00000KT 6000 -RA SCT008 BKN015 OVC080 22/19 Q1014=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 182100Z 00000KT 9999 SCT013 OVC080 22/19 Q1014=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 182200Z 00000KT 9999 SCT013 OVC080 21/19 Q1015=
SBBH	METAR	18/12/2011	METAR SBBH 182300Z 00000KT 9999 -RA SCT015 OVC080 21/19 Q1015=

Anexo 1.5 - Mensagens METAR do Aeroporto Carlos Prates para o dia 15 de dezembro de 2011

Fonte: <https://www.redemet.aer.mil.br/>

METAR Aeroporto Carlos Prates (BH)			
SBPR	SPECI	15/12/2011	SPECI SBPR 150811Z 14005KT 3000 -RA BKN010 OVC080 19/19 Q1014=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR COR 150900Z 14003KT 3000 RA BKN010 OVC080 19/19 Q1014=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR 151000Z 35003KT 2500 RA SCT008 BKN010 OVC080 19/19 Q1015=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR 151100Z 36001KT 3000 RA SCT008 BKN010 OVC080 19/19 Q1015=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR 151200Z 06002KT 3000 -RA BKN010 OVC080 20/19 Q1015=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR COR 151300Z 05005KT 1500 RA BKN010 OVC080 20/19 Q1016=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR 151400Z 04006KT 3000 -RA BKN010 OVC080 20/19 Q1015=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR 151500Z 06005KT 3000 RA BKN010 OVC080 20/20 Q1015=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR 151600Z 01002KT 4000 -RA BKN010 OVC080 20/20 Q1015 RERA=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR 151700Z 06006KT 5000 BR SCT010 BKN015 OVC080 21/20 Q1013=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR 151800Z 09005KT 1000 +RA SCT008 BKN012 OVC080 22/21 Q1012=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR 151900Z 05002KT 2000 -RA SCT008 BKN010 OVC080 21/20 Q1012 RERA=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR 152000Z 05007KT 5000 BR FEW008 SCT010 OVC080 21/20 Q1012 RERA=
SBPR	METAR	15/12/2011	METAR SBPR 152100Z 09005KT 9000 FEW008 SCT015 BKN080 20/20 Q1012=

Anexo 1.6 - Mensagens METAR do Aeroporto Carlos Prates para o dia 16 de dezembro de 2011

Fonte: <https://www.redemet.aer.mil.br/>

METAR Aeroporto Carlos Prates (BH)			
SBPR	SPECI	16/12/2011	SPECI SBPR 160811Z 04011KT 5000 BR SCT008 SCT010 BKN080 20/19 Q1015=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 160900Z 36010KT 3000 -RA BR BKN010 OVC080 19/19 Q1014=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 161000Z 10004KT 5000 -RA BR BKN010 OVC080 20/19 Q1015=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 161100Z 04007KT 5000 -RA BR BKN010 OVC080 19/19 Q1015=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 161200Z 03006KT 3000 BR BKN010 OVC080 20/19 Q1016=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 161300Z 04009KT 5000 BR BKN010 OVC080 20/20 Q1016=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 161400Z 01009KT 5000 BR BKN013 OVC090 22/20 Q1016=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 161500Z 02001KT 9999 BKN015 BKN080 22/20 Q1015=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 161600Z 03009KT 5000 -RA BKN015 BKN080 21/19 Q1015=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 161700Z 03006KT 9999 SCT020 SCT080 24/20 Q1014=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 161800Z 01006KT 6000 -RA SCT020 SCT080 22/20 Q1013=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 161900Z 04005KT 9999 SCT020 BKN080 23/20 Q1013=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 162000Z 07006KT 9999 SCT020 BKN080 23/20 Q1013=
SBPR	METAR	16/12/2011	METAR SBPR 162100Z 09005KT 9999 SCT025 BKN080 22/20 Q1014=

Anexo 1.7 - Mensagens METAR do Aeroporto Carlos Prates para o dia 17 de dezembro de 2011
 Fonte: <https://www.redemet.aer.mil.br/>

METAR Aeroporto Carlos Prates (BH)			
SBPR	SPECI	17/12/2011	SPECI SBPR 170811Z 02004KT 3000 -RA BR SCT004 BKN010 OVC080 19/19 Q1016=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 170900Z 06004KT 5000 BR SCT004 SCT010 BKN080 19/19 Q1016=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 171000Z 06006KT 6000 SCT005 BKN010 BKN080 20/19 Q1017=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 171100Z 04006KT 5000 BR SCT005 BKN010 BKN080 20/19 Q1017=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 171200Z 06006KT 9999 BKN010 BKN080 21/20 Q1018=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 171300Z 06006KT 9999 BKN010 BKN080 22/20 Q1018=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 171400Z 08005KT 9999 SCT010 BKN015 BKN080 22/20 Q1018=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 171500Z 02005KT 9999 BKN015 BKN080 22/20 Q1017=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 171600Z 04004KT 9999 BKN015 BKN080 22/21 Q1017=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 171700Z 02007KT 9999 BKN015 FEW030TCU BKN080 24/21 Q1016=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 171800Z 04010KT 9999 BKN015 FEW030TCU BKN080 23/20 Q1015=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 171900Z 01006KT 9999 VCSH FEW012 BKN020 BKN080 23/20 Q1015=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 172000Z 07005KT 9999 SCT020 BKN080 23/20 Q1015=-
SBPR	METAR	17/12/2011	METAR SBPR 172100Z 09007KT 9999 SCT025 BKN080 23/20 Q1015=-

Anexo 1.8 - Mensagens METAR do Aeroporto Carlos Prates para o dia 18 de dezembro de 2011
 Fonte: <https://www.redemet.aer.mil.br/>

METAR Aeroporto Carlos Prates (BH)			
SBPR	SPECI	18/12/2011	SPECI SBPR 180812Z 00000KT 3000 RA BKN010 OVC080 19/19 Q1017=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR 180900Z 18002KT 3000 RA BKN010 OVC080 19/19 Q1017=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR 181000Z 07003KT 3000 RA BKN010 OVC080 19/19 Q1018=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR 181100Z 06008KT 3000 RA BKN010 OVC080 19/19 Q1018=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR 181200Z 04003KT 4000 -RA SCT007 BKN010 OVC080 20/19 Q1018 RERA=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR 181300Z 03003KT 3000 -RA SCT007 BKN010 OVC080 20/19 Q1018=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR 181400Z 05005KT 4000 -RA FEW007 BKN010 OVC080 21/20 Q1018=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR 181500Z 04005KT 5000 -RA BKN012 OVC080 22/20 Q1018=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR 181600Z 03005KT 5000 -RA BKN012 OVC080 22/20 Q1017=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR 181700Z 01004KT 9999 -RA BKN012 OVC080 21/20 Q1016=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR 181800Z 06005KT 9999 -RA BKN012 OVC080 21/20 Q1015=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR 181900Z 07004KT 9999 -RA BKN012 OVC080 22/20 Q1015=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR COR 182000Z 06004KT 9999 SCT015 OVC080 22/20 Q1015=-
SBPR	METAR	18/12/2011	METAR SBPR 182100Z 08003KT 5000 -RA BKN025 OVC080 21/20 Q1015=-

Anexo 1.9 - Mensagens METAR do Aeroporto Tancredo Neves (CONFINS) para o dia 15 de dezembro de 2011
 Fonte: <https://www.redemet.aer.mil.br/>

METAR Aeroporto Tancredo Neves -CONFINS- (BH)			
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 15000Z 2200KT 7000 -TSRA FEW010 BKN030 FEW040CB BKN100 17/16 Q1014=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 150100Z 17004KT 9999 -RA SCT010 BKN030 BKN100 17/16 Q1015 RETS=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 150200Z 18004KT 9999 -RA FEW010 BKN030 17/16 Q1014=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 150300Z 20002KT 9999 FEW010 BKN030 16/16 Q1014=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 150400Z 18003KT 9999 FEW010 BKN030 17/16 Q1014=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 150500Z 22002KT 6000 -RA FEW002 BKN030 17/16 Q1013=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 150600Z 15002KT 9999 SCT025 BKN080 17/17 Q1012=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 150700Z 12004KT 9999 SCT025 BKN080 18/17 Q1012=
SBCF	SPECI	15/12/2011	SPECI SBCF 150735Z 00000KT 2500 -RA BR FEW010 SCT025 BKN080 18/17 Q1013=
SBCF	SPECI	15/12/2011	SPECI SBCF 150735Z 00000KT 2500 RA BR FEW010 SCT025 BKN080 18/17 Q1013=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 150800Z 11005KT 2500 -RA BR BKN020 BKN080 18/17 Q1013 RERA=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 150900Z 03003KT 2500 -RA BKN008 SCT025 OVC100 18/17 Q1014=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 151000Z 05001KT 2000 -RA BR BKN002 SCT025 OVC100 18/17 Q1014=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 151100Z 04002KT 2500 -RA BR SCT002 BKN005 OVC100 18/17 Q1014=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 151200Z 09005KT 2000 -RA BR SCT002 BKN012 OVC100 18/18 Q1014=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 151300Z 01011KT 2000 -RA BR BKN003 SCT015 OVC100 18/17 Q1015=
SBCF	SPECI	15/12/2011	SPECI SBCF 151320Z 03007KT 3000 -RA BR BKN005 SCT015 OVC100 18/17 Q1015=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 151400Z 03008KT 4000 -RA BR BKN005 SCT015 OVC100 19/18 Q1015=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 151500Z 05007KT 4000 -RA BKN007 SCT020 OVC100 20/18 Q1014=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 151600Z 05004KT 4000 -RA BR BKN005 BKN020 OVC100 20/19 Q1014=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 151700Z 05006KT 9000 BKN010 BKN030 OVC100 21/18 Q1013=
SBCF	SPECI	15/12/2011	SPECI SBCF 151735Z 06006KT 4000 -RA BR BKN010 BKN030 OVC100 21/18 Q1012=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 151800Z 07006KT 4000 -RA BR BKN007 BKN030 OVC100 20/19 Q1012=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 151900Z 35009KT 3000 RA BR BKN007 BKN030 OVC100 19/17 Q1012=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 152000Z 02004KT 9000 BKN012 BKN030 OVC100 19/18 Q1012 RERA=
SBCF	SPECI	15/12/2011	SPECI SBCF 152034Z 07007KT 0800 R16/P2000 R34/P2000 FG BKN004 BKN030 BKN100 19/18 Q1012=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 152100Z 07007KT 0800 R16/P2000 R34/P2000 FG VV002 18/18 Q1012=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 152200Z 07005KT 0800 R16/P2000 R34/P2000 FG VV002 18/18 Q1012=
SBCF	METAR	15/12/2011	METAR SBCF 152300Z 04005KT 9999 SCT015 BKN100 18/18 Q1013=

Anexo 1.10 - Mensagens METAR do Aeroporto Tancredo Neves (CONFINS) para o dia 16 de dezembro de 2011
 Fonte: <https://www.redemet.aer.mil.br/>

METAR Aeroporto Tancredo Neves -CONFINS- (BH)			
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 160000Z 06004KT 9999 -RA BKN015 BKN100 19/18 Q1014=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 160100Z 10004KT 3000 -RA BR BKN015 BKN100 18/18 Q1014=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 160200Z 10005KT 5000 -RA BKN010 BKN100 18/18 Q1014=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 160300Z 06006KT 6000 -RA FEW002 BKN010 BKN100 18/18 Q1014=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 160400Z 06006KT 4000 -RA FEW002 BKN006 BKN100 18/18 Q1013=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 160500Z 02005KT 6000 -RA FEW002 BKN006 BKN100 18/18 Q1013=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 160600Z 03004KT 8000 SCT003 BKN006 BKN100 18/18 Q1013=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 160700Z 02009KT 5000 -RA BR SCT001 BKN006 BKN100 18/17 Q1012=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 160800Z 03009KT 6000 BKN006 BKN015 BKN100 18/17 Q1012=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 160900Z 02010KT 4000 -RA BR BKN005 SCT020 BKN100 17/17 Q1013=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 161000Z 03008KT 9999 BKN005 SCT020 BKN100 17/16 Q1014=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 161100Z 03007KT 9999 BKN006 SCT020 BKN100 18/17 Q1015=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 161200Z 02007KT 9999 BKN006 SCT025 BKN100 18/18 Q1015=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 161300Z 01005KT 9999 BKN010 SCT025 BKN100 19/17 Q1015=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 161400Z 35014KT 3000 RA BR BKN010 SCT025 BKN100 19/18 Q1015=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 161500Z 02010KT 9999 BKN010 SCT025 BKN100 20/18 Q1015 RERA=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 161600Z 02011KT 9999 BKN012 BKN080 22/18 Q1014=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 161700Z 10005KT 5000 -TSRA BKN012 FEW035CB BKN080 21/18 Q1014=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 161800Z 04010KT 9999 -RA BKN012 FEW035TCU BKN100 22/18 Q1012 RETS=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 161900Z 03009KT 9999 BKN020 FEW040TCU BKN100 22/17 Q1012=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 162000Z 04008KT 9999 BKN020 BKN100 22/18 Q1013=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 162100Z 05007KT 3000 -RA BKN020 BKN100 21/17 Q1013=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 162200Z 05008KT 8000 -TSRA BKN012 FEW035CB BKN100 20/18 Q1013=
SBCF	METAR	16/12/2011	METAR SBCF 162300Z 03003KT 9999 -TSRA BKN012 FEW035CB BKN100 20/18 Q1015=

Anexo 1.11 - Mensagens METAR do Aeroporto Tancredo Neves (CONFINS) para o dia 17 de dezembro de 2011
 Fonte: <https://www.redemet.aer.mil.br/>

METAR Aeroporto Tancredo Neves -CONFINS- (BH)			
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 170000Z 05006KT 9999 BKN020 BKN100 19/18 Q1015 RETS=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 170100Z 05002KT 9999 BKN020 BKN100 19/18 Q1016=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 170200Z 04004KT 9999 BKN013 BKN100 19/17 Q1016=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 170300Z 05003KT 9999 BKN013 BKN100 19/17 Q1016=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 170400Z 05004KT 9999 BKN013 BKN100 18/17 Q1016=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 170500Z 03002KT 9999 BKN013 BKN100 18/17 Q1015=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 170600Z 04005KT 9999 BKN013 BKN100 17/17 Q1015=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 170700Z 04003KT 9999 BKN013 BKN100 17/16 Q1014=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 170800Z 05004KT 4000 -RA FEW007 BKN013 BKN100 18/17 Q1015=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 170900Z 04004KT 5000 -RA BKN011 BKN100 18/17 Q1016=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 171000Z 03005KT 1400 R16/P2000 R34/P2000 RA BR BKN002 BKN010 BKN100 18/17 Q1017=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 171100Z 06003KT 1600 R16/P2000 R34/P2000 -RA BR BKN002 BKN010 BKN100 18/17 Q1017 RERA=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 171200Z 06004KT 4000 -RA BKN004 BKN010 BKN100 18/18 Q1017=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 171300Z 08007KT 4000 -RA BKN005 BKN020 BKN100 19/18 Q1017=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 171400Z 03011KT 9999 BKN008 BKN025 BKN100 21/18 Q1017=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 171500Z 01011KT 5000 -RA BKN008 BKN025 BKN100 21/18 Q1016=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 171600Z 02012KT 9999 BKN030 BKN100 21/18 Q1016=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 171700Z 01012KT 9999 BKN025 BKN100 22/18 Q1014=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 171800Z 03012KT 9999 BKN020 BKN100 22/18 Q1014=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 171900Z 02010KT 9999 BKN020 BKN100 21/17 Q1014=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 172000Z 04010KT 9999 SCT020 BKN100 22/17 Q1014=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 172100Z 03004KT 9999 SCT025 BKN100 21/18 Q1014=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 172200Z 02008KT 9999 SCT025 BKN100 21/18 Q1015=
SBCF	METAR	17/12/2011	METAR SBCF 172300Z 04005KT 9999 SCT025 BKN100 20/18 Q1015=

Anexo 1.12 - Mensagens METAR do Aeroporto Tancredo Neves (CONFINS) para o dia 18 de dezembro de 2011
 Fonte: <https://www.redemet.aer.mil.br/>

METAR Aeroporto Tancredo Neves -CONFINS- (BH)			
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 180000Z 06008KT 9999 -RA BKN012 BKN080 19/17 Q1016=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 180100Z 08006KT 9999 BKN012 BKN080 18/17 Q1016=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 180200Z 00000KT 8000 -RA BKN012 BKN080 18/17 Q1017=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 180300Z 00000KT 4000 -RA BKN012 BKN080 18/17 Q1016=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 180400Z 05001KT 2500 -RA BKN004 OVC080 18/17 Q1016=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 180500Z 00000KT 3000 -RA BKN002 OVC080 18/17 Q1016=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 180615Z 00000KT 1000 R16/P2000 R34/P2000 -RA BR BKN001 OVC080 18/17 Q1015=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 180700Z 23002KT 1000 R16/1000 R34/0650 -RA BR BKN001 OVC080 18/17 Q1016=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 180800Z 18001KT 1500 R16/P2000 R34/P2000 -RA BR BKN005 OVC080 17/17 Q1016=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 180900Z 04003KT 1500 R16/P2000 R34/P2000 -RA BR BKN005 OVC080 17/17 Q1017=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 181000Z 02008KT 1000 R34/1800 R16/P2000 RA BR BKN004 OVC080 18/17 Q1017=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 181100Z 05006KT 2000 -RA BR BKN008 OVC080 17/17 Q1017 RERA=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 181200Z 07005KT 2500 -RA BR BKN004 OVC080 18/17 Q1018=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 181300Z 06006KT 5000 -RA BR BKN004 OVC080 19/17 Q1018=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 181400Z 04005KT 8000 BKN006 OVC080 20/18 Q1018=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 181500Z 03005KT 5000 -RA BKN008 OVC100 20/17 Q1017=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 181600Z 02006KT 9999 BKN008 OVC100 20/18 Q1016=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF COR 181700Z 03005KT 8000 -RA BKN008 OVC100 20/17 Q1016=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 181800Z 04004KT 8000 -RA BKN008 OVC100 20/18 Q1015=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 181900Z 06007KT 9999 BKN008 OVC080 20/18 Q1014=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 182000Z 06004KT 9999 BKN008 BKN080 20/17 Q1014=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 182100Z 09003KT 9999 FEW010 BKN080 19/17 Q1014=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 182200Z 09003KT 9999 FEW010 BKN080 19/17 Q1015=
SBCF	METAR	18/12/2011	METAR SBCF 182300Z 00000KT 9999 FEW010 BKN070 19/18 Q1016=

ANEXO 2

Anexo 2.1 - Dados meteorológicos registrados pela estação automática de Belo Horizonte no dia 15 de dezembro de 2011.

Fonte: <https://tempo.inmet.gov.br/>

BELO HORIZONTE (PAMPULHA) (A521)											
Data	Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pressão (hPa)			Chuva mm
		Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	
15/12/2011	0	18,8	20,5	18,8	94,0	94,0	92,0	915,6	915,7	914,5	11,0
15/12/2011	1	18,6	18,9	18,6	95,0	95,0	94,0	915,5	915,7	915,5	7,0
15/12/2011	2	18,3	18,6	18,3	94,0	95,0	94,0	915,4	915,7	915,4	2,0
15/12/2011	3	18,5	18,5	18,2	94,0	94,0	93,0	915,2	915,5	915,2	1,2
15/12/2011	4	18,9	19,0	18,5	94,0	94,0	94,0	914,3	915,2	914,3	0,2
15/12/2011	5	19,0	19,1	18,9	94,0	94,0	94,0	914,1	914,3	914,1	4,8
15/12/2011	6	19,1	19,2	19,0	94,0	94,0	94,0	913,7	914,1	913,7	1,4
15/12/2011	7	19,3	19,4	19,1	93,0	94,0	93,0	913,8	913,8	913,5	0,2
15/12/2011	8	19,1	19,3	19,1	95,0	95,0	93,0	914,0	914,2	913,8	6,2
15/12/2011	9	19,0	19,2	19,0	95,0	95,0	95,0	914,4	914,4	914,0	8,0
15/12/2011	10	19,0	19,1	18,9	95,0	95,0	95,0	914,9	915,0	914,4	18,0
15/12/2011	11	19,2	19,2	19,0	96,0	96,0	95,0	915,3	915,4	914,9	29,6
15/12/2011	12	20,0	20,0	19,2	95,0	96,0	95,0	915,4	915,4	915,3	1,2
15/12/2011	13	19,2	20,0	19,1	95,0	95,0	95,0	915,7	915,7	915,4	27,6
15/12/2011	14	19,6	19,7	19,0	96,0	96,0	95,0	915,7	915,9	915,7	23,8
15/12/2011	15	20,4	20,5	19,5	95,0	96,0	95,0	915,0	915,7	915,0	1,0
15/12/2011	16	20,1	20,4	20,0	95,0	95,0	95,0	914,4	915,1	914,4	8,4
15/12/2011	17	21,7	21,7	20,1	93,0	95,0	92,0	913,7	914,4	913,7	0,4
15/12/2011	18	20,9	21,7	20,9	93,0	93,0	91,0	912,9	913,7	912,9	2,0
15/12/2011	19	20,7	21,0	20,7	94,0	94,0	93,0	912,6	912,9	912,6	7,6
15/12/2011	20	20,5	20,7	20,3	93,0	94,0	93,0	912,7	912,8	912,6	2,6
15/12/2011	21	20,0	20,5	20,0	94,0	94,0	93,0	913,0	913,1	912,7	0,0
15/12/2011	22	20,0	20,0	19,9	94,0	94,0	94,0	913,5	913,6	913,0	0,2
15/12/2011	23	19,9	20,0	19,9	95,0	95,0	94,0	914,5	914,5	913,5	0,8

Anexo 2.2 - Dados meteorológicos registrados pela estação automática de Belo Horizonte no dia 16 de dezembro de 2011.

Fonte: <https://tempo.inmet.gov.br/>

BELO HORIZONTE (PAMPULHA) (A521)											
Data	Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pressão (hPa)			Chuva mm
		Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	
16/12/2011	0	19,8	19,9	19,8	95,0	95,0	95,0	914,9	915,0	914,5	2,4
16/12/2011	1	19,8	19,9	19,8	95,0	95,0	95,0	915,1	915,1	914,9	1,2
16/12/2011	2	19,9	19,9	19,7	95,0	95,0	95,0	914,8	915,1	914,8	1,6
16/12/2011	3	19,8	19,9	19,7	95,0	95,0	95,0	914,4	914,9	914,4	0,2
16/12/2011	4	19,5	19,8	19,5	96,0	96,0	95,0	914,0	914,4	913,9	6,6
16/12/2011	5	19,6	19,6	19,5	96,0	96,0	96,0	913,5	914,0	913,5	0,4
16/12/2011	6	19,6	19,6	19,5	96,0	96,0	96,0	913,6	913,6	913,4	4,8
16/12/2011	7	19,6	19,6	19,6	96,0	96,0	96,0	913,3	913,6	913,3	0,2
16/12/2011	8	19,5	19,6	19,4	95,0	96,0	95,0	913,7	913,7	913,3	1,0
16/12/2011	9	19,1	19,5	19,1	95,0	95,0	95,0	914,3	914,3	913,7	0,2
16/12/2011	10	19,4	19,4	19,0	95,0	95,0	95,0	914,9	914,9	914,3	0,2
16/12/2011	11	19,1	19,4	19,0	95,0	95,0	95,0	915,7	915,7	914,9	0,6
16/12/2011	12	19,7	19,7	19,1	94,0	95,0	94,0	916,0	916,0	915,7	0,0
16/12/2011	13	20,3	20,6	19,7	93,0	95,0	93,0	916,1	916,2	915,9	0,2
16/12/2011	14	21,2	21,6	20,2	87,0	93,0	87,0	915,9	916,1	915,9	0,4
16/12/2011	15	22,9	23,2	21,2	80,0	90,0	79,0	915,4	915,9	915,4	0,0
16/12/2011	16	21,9	23,1	21,7	85,0	85,0	79,0	914,8	915,5	914,7	0,0
16/12/2011	17	26,0	26,0	21,9	73,0	85,0	72,0	914,2	914,8	914,2	0,0
16/12/2011	18	21,4	26,0	21,4	86,0	86,0	68,0	913,7	914,2	913,7	1,4
16/12/2011	19	22,8	22,8	21,0	86,0	92,0	85,0	913,5	913,8	913,5	1,6
16/12/2011	20	23,0	23,5	22,6	84,0	87,0	81,0	913,9	914,0	913,4	0,0
16/12/2011	21	21,9	23,1	21,9	87,0	87,0	82,0	913,9	913,9	913,7	0,0
16/12/2011	22	21,7	21,9	21,2	88,0	91,0	87,0	914,6	914,6	913,9	0,0
16/12/2011	23	20,8	21,7	20,7	92,0	92,0	88,0	916,2	916,2	914,6	2,2

Anexo 2.3 - Dados meteorológicos registrados pela estação automática de Belo Horizonte no dia 17 de dezembro de 2011.

Fonte: <https://tempo.inmet.gov.br/>

BELO HORIZONTE (PAMPULHA) (A521)											
Data	Hora UTC	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pressão (hPa)			Chuva mm
		Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	
17/12/2011	0	19,9	20,8	19,9	94,0	94,0	92,0	916,3	916,4	916,2	3,2
17/12/2011	1	19,7	20,0	19,6	94,0	94,0	93,0	916,7	916,8	916,3	0,6
17/12/2011	2	19,9	19,9	19,7	95,0	95,0	94,0	916,5	916,8	916,5	0,6
17/12/2011	3	19,9	20,1	19,8	95,0	95,0	95,0	916,3	916,5	916,3	0,0
17/12/2011	4	20,0	20,3	19,9	95,0	95,0	94,0	915,7	916,3	915,7	0,8
17/12/2011	5	19,9	20,0	19,9	95,0	95,0	95,0	915,6	915,8	915,6	0,6
17/12/2011	6	19,1	19,9	19,1	95,0	95,0	94,0	916,0	916,1	915,4	7,0
17/12/2011	7	18,9	19,1	18,9	95,0	95,0	95,0	916,0	916,1	915,9	5,8
17/12/2011	8	18,8	18,9	18,8	96,0	96,0	95,0	916,2	916,2	916,0	3,4
17/12/2011	9	19,1	19,1	18,8	96,0	96,0	96,0	916,7	916,7	916,2	0,8
17/12/2011	10	19,5	19,6	19,1	95,0	96,0	95,0	917,1	917,1	916,7	0,0
17/12/2011	11	19,9	20,2	19,5	94,0	95,0	94,0	917,5	917,6	917,1	0,0
17/12/2011	12	20,9	20,9	19,9	92,0	95,0	91,0	917,8	917,8	917,5	0,2
17/12/2011	13	21,9	22,0	20,6	87,0	92,0	86,0	918,0	918,0	917,8	0,0
17/12/2011	14	22,1	22,8	21,3	83,0	89,0	80,0	917,7	918,0	917,7	0,0
17/12/2011	15	22,5	23,5	21,7	80,0	85,0	78,0	917,1	917,7	917,1	0,0
17/12/2011	16	22,4	23,2	21,3	91,0	92,0	80,0	916,6	917,1	916,6	0,6
17/12/2011	17	24,0	24,2	22,4	81,0	91,0	79,0	915,7	916,6	915,7	0,0
17/12/2011	18	23,0	25,3	22,6	80,0	85,0	73,0	915,2	915,7	915,2	0,0
17/12/2011	19	22,9	24,2	22,9	81,0	81,0	74,0	915,1	915,2	914,9	0,0
17/12/2011	20	23,2	23,2	22,3	81,0	85,0	80,0	915,1	915,2	914,9	0,0
17/12/2011	21	22,3	23,2	22,3	81,0	82,0	79,0	915,4	915,5	915,1	0,0
17/12/2011	22	21,7	22,3	21,6	85,0	85,0	81,0	915,9	915,9	915,2	0,0
17/12/2011	23	21,2	21,7	21,1	89,0	89,0	85,0	916,4	916,4	915,9	0,2

Anexo 2.4 - Dados meteorológicos registrados pela estação automática de Belo Horizonte no dia 18 de dezembro de 2011.

Fonte: <https://tempo.inmet.gov.br/>

BELO HORIZONTE (PAMPULHA) (A521)											
Data	Hora UTC	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pressão (hPa)			Chuva mm
		Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	
18/12/2011	0	20,8	21,4	20,8	91,0	91,0	88,0	916,9	916,9	916,4	0,4
18/12/2011	1	20,2	20,9	20,2	93,0	94,0	91,0	917,3	917,3	916,8	1,2
18/12/2011	2	19,5	20,2	19,4	95,0	95,0	92,0	917,6	917,7	917,2	2,0
18/12/2011	3	19,2	19,5	19,1	95,0	95,0	95,0	917,2	917,6	917,2	33,4
18/12/2011	4	19,1	19,2	19,1	96,0	96,0	95,0	916,8	917,2	916,7	21,6
18/12/2011	5	18,9	19,2	18,9	96,0	96,0	96,0	916,2	916,7	916,2	5,4
18/12/2011	6	18,9	18,9	18,9	96,0	96,0	96,0	916,3	916,4	916,2	10,2
18/12/2011	7	18,9	19,0	18,8	96,0	96,0	96,0	916,5	916,5	916,3	4,4
18/12/2011	8	18,9	18,9	18,8	96,0	96,0	96,0	916,7	916,7	916,5	7,6
18/12/2011	9	18,9	18,9	18,9	96,0	96,0	96,0	917,2	917,2	916,7	5,6
18/12/2011	10	19,0	19,0	18,9	96,0	96,0	96,0	917,7	917,7	917,2	12,8
18/12/2011	11	19,2	19,3	19,0	96,0	96,0	96,0	918,0	918,0	917,7	2,2
18/12/2011	12	19,9	20,1	19,1	96,0	96,0	96,0	918,3	918,3	918,0	1,4
18/12/2011	13	19,8	20,1	19,5	95,0	96,0	95,0	918,3	918,4	918,3	1,4
18/12/2011	14	20,9	21,1	19,8	93,0	95,0	93,0	918,1	918,4	918,1	0,6
18/12/2011	15	22,3	22,3	20,9	88,0	94,0	86,0	917,6	918,1	917,6	0,0
18/12/2011	16	22,2	22,5	21,5	85,0	89,0	85,0	917,0	917,6	917,0	0,0
18/12/2011	17	21,5	23,0	21,5	91,0	91,0	85,0	916,3	917,0	916,3	1,0
18/12/2011	18	21,5	21,6	21,1	90,0	93,0	90,0	915,7	916,3	915,7	1,8
18/12/2011	19	21,7	22,0	21,3	88,0	91,0	87,0	915,1	915,7	915,1	0,0
18/12/2011	20	21,5	21,8	21,5	88,0	88,0	85,0	915,1	915,2	915,0	0,0
18/12/2011	21	21,0	21,5	21,0	90,0	90,0	87,0	915,5	915,5	915,1	0,0
18/12/2011	22	20,3	21,0	20,3	93,0	93,0	90,0	915,8	915,8	915,5	0,0
18/12/2011	23	20,0	20,5	20,0	94,0	94,0	93,0	916,3	916,3	915,8	0,6

Anexo 2.5 - Dados meteorológicos registrados pela estação automática de Florestal no dia 15 de dezembro de 2011.

Fonte: <https://tempo.inmet.gov.br/>

FLORESTAL (A535)											
Data	Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pressão (hPa)			Chuva mm
		Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	
15/12/2011	0	18,9	19,2	18,9	91,0	91,0	90,0	927,1	927,4	926,1	3,0
15/12/2011	1	18,8	18,9	18,7	92,0	92,0	91,0	927,1	927,3	926,9	3,2
15/12/2011	2	18,9	19,0	18,8	92,0	92,0	92,0	927,1	927,6	927,1	8,6
15/12/2011	3	18,9	19,0	18,8	92,0	92,0	92,0	926,5	927,2	926,5	0,8
15/12/2011	4	18,9	18,9	18,8	93,0	93,0	92,0	926,2	926,6	926,1	8,2
15/12/2011	5	19,0	19,1	18,9	93,0	93,0	93,0	925,8	926,4	925,8	6,0
15/12/2011	6	19,1	19,2	18,9	93,0	93,0	93,0	925,3	925,9	925,3	0,2
15/12/2011	7	19,2	19,3	19,0	93,0	93,0	93,0	926,0	926,1	925,2	10,4
15/12/2011	8	19,1	19,2	19,0	93,0	93,0	93,0	926,0	926,0	925,7	14,8
15/12/2011	9	19,2	19,3	19,0	93,0	93,0	93,0	926,2	926,2	925,9	1,2
15/12/2011	10	19,6	19,6	19,2	93,0	93,0	93,0	926,6	926,7	926,2	1,0
15/12/2011	11	20,0	20,0	19,5	93,0	93,0	93,0	926,9	927,0	926,6	1,2
15/12/2011	12	21,1	21,1	20,0	92,0	93,0	92,0	926,9	927,1	926,9	0,2
15/12/2011	13	21,9	21,9	21,0	88,0	92,0	88,0	926,9	927,1	926,9	0,4
15/12/2011	14	21,8	22,2	21,3	87,0	89,0	84,0	926,7	927,0	926,7	2,6
15/12/2011	15	20,7	21,7	20,6	91,0	91,0	87,0	926,5	926,9	926,5	6,8
15/12/2011	16	22,1	22,2	20,7	89,0	91,0	89,0	925,6	926,6	925,6	1,2
15/12/2011	17	22,7	22,7	22,1	84,0	89,0	84,0	925,0	925,6	925,0	0,0
15/12/2011	18	23,0	23,1	22,5	82,0	85,0	82,0	924,3	925,0	924,2	0,4
15/12/2011	19	22,6	23,0	22,5	86,0	86,0	82,0	924,0	924,3	924,0	0,4
15/12/2011	20	22,5	22,8	22,5	84,0	86,0	83,0	924,0	924,0	923,8	0,0
15/12/2011	21	21,7	22,5	21,7	87,0	87,0	84,0	924,2	924,2	924,0	0,2
15/12/2011	22	20,6	21,7	20,6	90,0	90,0	87,0	925,0	925,0	924,2	2,2
15/12/2011	23	20,5	20,7	20,5	91,0	91,0	90,0	925,9	925,9	924,9	3,8

Anexo 2.6 - Dados meteorológicos registrados pela estação automática de Florestal no dia 16 de dezembro de 2011.

Fonte: <https://tempo.inmet.gov.br/>

FLORESTAL (A535)											
Data	Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pressão (hPa)			Chuva mm
		Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	
16/12/2011	0	20,1	20,5	20,1	92,0	92,0	91,0	926,1	926,4	925,9	11,6
16/12/2011	1	20,2	20,4	20,1	92,0	92,0	91,0	926,7	926,7	926,1	0,6
16/12/2011	2	20,2	20,3	20,1	92,0	92,0	92,0	926,5	926,7	926,5	3,0
16/12/2011	3	19,5	20,2	19,4	92,0	92,0	92,0	926,1	926,6	926,1	4,8
16/12/2011	4	19,5	19,6	19,5	92,0	92,0	92,0	925,5	926,1	925,5	2,2
16/12/2011	5	19,8	19,8	19,5	92,0	92,0	92,0	925,1	925,6	925,1	0,0
16/12/2011	6	20,1	20,1	19,8	92,0	92,0	92,0	925,1	925,2	925,1	0,0
16/12/2011	7	20,0	20,1	20,0	92,0	92,0	92,0	924,8	925,1	924,8	0,4
16/12/2011	8	19,7	20,0	19,7	92,0	92,0	92,0	925,4	925,4	924,8	1,0
16/12/2011	9	19,6	19,8	19,6	90,0	92,0	90,0	925,9	925,9	925,4	0,0
16/12/2011	10	19,7	19,7	19,5	90,0	90,0	89,0	926,4	926,4	925,9	0,0
16/12/2011	11	19,9	19,9	19,7	90,0	90,0	90,0	927,1	927,2	926,4	0,0
16/12/2011	12	20,4	20,5	19,9	90,0	90,0	88,0	927,4	927,5	927,1	0,0
16/12/2011	13	21,9	22,0	20,3	83,0	90,0	82,0	927,6	927,7	927,4	0,2
16/12/2011	14	21,8	22,4	21,6	83,0	86,0	79,0	927,4	927,7	927,4	0,0
16/12/2011	15	22,3	22,5	21,8	82,0	83,0	81,0	927,0	927,4	927,0	0,0
16/12/2011	16	23,8	23,8	21,3	78,0	88,0	77,0	926,4	927,1	926,4	0,8
16/12/2011	17	25,2	25,6	23,8	72,0	78,0	68,0	925,6	926,4	925,6	0,0
16/12/2011	18	25,0	25,4	23,9	69,0	79,0	69,0	924,7	925,7	924,7	0,2
16/12/2011	19	25,0	25,3	24,8	67,0	71,0	65,0	924,7	925,1	924,6	0,0
16/12/2011	20	24,2	25,3	24,2	72,0	72,0	66,0	924,8	925,0	924,7	0,0
16/12/2011	21	22,4	24,2	22,4	83,0	83,0	70,0	925,2	925,3	924,7	0,0
16/12/2011	22	20,2	22,4	20,2	92,0	92,0	83,0	927,1	927,2	925,1	32,4
16/12/2011	23	19,6	20,1	19,6	92,0	92,0	92,0	927,6	927,6	927,1	3,4

Anexo 2.7 - Dados meteorológicos registrados pela estação automática de Florestal no dia 17 de dezembro de 2011.

Fonte: <https://tempo.inmet.gov.br/>

FLORESTAL (A535)											
Data	Hora UTC	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pressão (hPa)			Chuva mm
		Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	
17/12/2011	0	19,6	19,7	19,5	92,0	92,0	92,0	927,9	928,0	927,6	0,2
17/12/2011	1	19,5	19,7	19,5	92,0	92,0	92,0	928,4	928,4	927,9	2,6
17/12/2011	2	19,5	19,6	19,5	93,0	93,0	92,0	928,5	928,6	928,3	5,0
17/12/2011	3	19,6	19,7	19,5	93,0	93,0	93,0	928,0	928,5	928,0	7,8
17/12/2011	4	19,6	19,7	19,4	93,0	93,0	93,0	927,4	928,0	927,1	19,6
17/12/2011	5	19,2	19,7	19,2	93,0	93,0	93,0	927,5	927,8	927,2	61,4
17/12/2011	6	19,4	19,4	18,8	93,0	93,0	93,0	927,6	927,7	927,5	46,4
17/12/2011	7	19,5	19,6	19,4	93,0	93,0	93,0	927,7	927,7	927,6	5,0
17/12/2011	8	19,2	19,5	19,2	93,0	93,0	93,0	927,7	927,8	927,6	2,8
17/12/2011	9	19,4	19,5	19,2	93,0	93,0	93,0	928,1	928,1	927,7	0,0
17/12/2011	10	19,9	19,9	19,4	93,0	93,0	93,0	928,6	928,7	928,1	0,0
17/12/2011	11	21,0	21,0	19,9	92,0	93,0	92,0	928,8	928,9	928,6	0,0
17/12/2011	12	21,5	22,3	20,9	84,0	92,0	83,0	929,4	929,4	928,8	0,0
17/12/2011	13	22,4	22,5	21,5	82,0	85,0	80,0	929,3	929,5	929,3	0,0
17/12/2011	14	23,1	23,6	22,4	76,0	82,0	75,0	929,2	929,3	929,2	0,0
17/12/2011	15	22,9	24,1	22,1	85,0	87,0	73,0	928,7	929,2	928,7	0,6
17/12/2011	16	24,5	24,6	22,6	78,0	85,0	76,0	927,9	928,7	927,9	0,6
17/12/2011	17	23,4	25,1	22,8	81,0	84,0	71,0	927,3	927,9	927,3	0,4
17/12/2011	18	23,3	24,3	23,3	79,0	81,0	74,0	926,7	927,4	926,7	0,2
17/12/2011	19	24,3	24,6	23,2	74,0	82,0	72,0	926,4	926,8	926,4	0,0
17/12/2011	20	24,9	25,4	24,3	69,0	74,0	68,0	926,2	926,4	926,1	0,0
17/12/2011	21	23,1	24,9	23,1	84,0	84,0	69,0	926,5	926,7	926,2	0,0
17/12/2011	22	21,6	23,1	21,6	83,0	86,0	78,0	927,5	927,6	926,5	0,0
17/12/2011	23	20,4	21,6	20,3	91,0	91,0	83,0	928,2	928,2	927,5	2,4

Anexo 2.8 - Dados meteorológicos registrados pela estação automática de Florestal no dia 18 de dezembro de 2011.

Fonte: <https://tempo.inmet.gov.br/>

FLORESTAL (A535)											
Data	Hora UTC	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pressão (hPa)			Chuva mm
		Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	
18/12/2011	0	19,3	20,5	19,2	93,0	93,0	91,0	928,8	929,0	928,2	34,8
18/12/2011	1	19,4	19,4	19,3	93,0	93,0	93,0	929,0	929,1	928,7	3,4
18/12/2011	2	19,7	19,7	19,4	93,0	93,0	93,0	929,4	929,5	929,0	4,2
18/12/2011	3	19,0	19,9	19,0	93,0	93,0	93,0	928,8	929,5	928,8	12,6
18/12/2011	4	19,0	19,1	18,9	93,0	93,0	93,0	928,4	928,9	928,4	3,4
18/12/2011	5	18,9	19,1	18,9	93,0	93,0	93,0	928,0	928,4	927,9	2,0
18/12/2011	6	18,8	19,0	18,8	93,0	93,0	93,0	928,1	928,2	928,0	5,6
18/12/2011	7	19,0	19,0	18,8	93,0	93,0	93,0	928,1	928,3	928,0	9,6
18/12/2011	8	19,0	19,0	19,0	93,0	93,0	93,0	928,0	928,2	928,0	12,6
18/12/2011	9	19,1	19,1	19,0	93,0	94,0	93,0	928,6	928,6	928,0	9,6
18/12/2011	10	19,3	19,4	19,1	93,0	93,0	93,0	929,1	929,1	928,6	2,6
18/12/2011	11	19,6	19,7	19,3	93,0	93,0	93,0	929,4	929,5	929,1	1,2
18/12/2011	12	19,8	19,8	19,5	93,0	93,0	93,0	929,9	930,0	929,4	0,6
18/12/2011	13	20,6	20,6	19,8	92,0	93,0	92,0	929,8	930,0	929,8	0,8
18/12/2011	14	21,3	21,3	20,5	89,0	92,0	88,0	929,6	929,9	929,6	0,2
18/12/2011	15	21,6	21,8	21,3	86,0	89,0	85,0	929,2	929,7	929,2	0,6
18/12/2011	16	22,6	22,9	21,6	81,0	87,0	79,0	928,7	929,3	928,7	0,2
18/12/2011	17	23,1	23,5	22,6	78,0	81,0	76,0	927,6	928,7	927,6	0,0
18/12/2011	18	23,5	23,6	22,9	74,0	78,0	71,0	927,0	927,6	927,0	0,0
18/12/2011	19	23,5	23,8	23,2	73,0	75,0	71,0	926,5	927,0	926,5	0,0
18/12/2011	20	22,8	23,6	22,8	76,0	76,0	72,0	926,6	926,7	926,5	0,0
18/12/2011	21	21,8	22,8	21,8	85,0	85,0	75,0	926,9	927,0	926,6	0,0
18/12/2011	22	20,6	21,8	20,6	90,0	90,0	85,0	927,3	927,4	926,9	0,8
18/12/2011	23	20,3	20,6	20,2	92,0	92,0	90,0	927,8	927,9	927,3	0,6