UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Instituto de Física e Matemática
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática



Dissertação

Inicialização do modelo WRF pelo filtro digital

Guilherme Luís Mello Ribeiro

Pelotas, 2018

Guilherme Luís Mello Ribeiro

Inicialização do modelo WRF pelo filtro digital

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Pereira Härter
Coorientador: Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros

Pelotas, 2018

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

R484i Ribeiro, Guilherme Luís Mello

Inicialização do modelo wrf pelo filtro digital / Guilherme Luís Mello Ribeiro ; Fabricio Pereira Härter, orientador ; Régis Sperotto de Quadros, coorientador. — Pelotas, 2018.

66 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

1. Filtro passa-baixa. 2. Modelo numérico. 3. Ondas de gravidade. I. Härter, Fabricio Pereira, orient. II. Quadros, Régis Sperotto de, coorient. III. Título.

CDD : 511.8

Elaborada por Maria Beatriz Vaghetti Vieira CRB: 10/1032

Guilherme Luís Mello Ribeiro

Inicialização do Modelo WRF pelo Filtro Digital

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Modelagem Matemática, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 12 de abril de 2018

Banca examinadora:

Prof. Dr. Fabrício Pereira Harter (Orientador)
Doutor em Computação Aplicada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros (Co-Orientador)
Doutor em Matemática Aplicada pela Technische Universitaet Darmstadt, Alemanha

Profa. Dra. Daniela Buske
Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Dr. André Becker Nunes
Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

Prof. Dr. Leonardo Calvetti
Doutor em Meteorologia pela Universidade de São Paulo, Brasil

Dedico esse trabalho à minha esposa.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela conclusão de mais essa etapa;

À minha esposa Cristina pelo carinho, incentivo, dedicação e pela paciência, principalmente em lidar com minhas ausências;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabricio Pereira Härter pela oportunidade de realização deste trabalho, proporcionando-me o entendimento, mesmo que inicial, dessa importante área do conhecimento, a Meteorológica;

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros pela transmissão de conhecimento e amizade;

À coordenação do PPGMMAT, Profª. Drª. Daniela Buske, por compreender as dificuldades inerentes em estudar, trabalhar e residir em cidades distintas;

Aos demais professores do programa pela transmissão de conhecimento;

Aos colegas do programa pela amizade, apoio e troca de conhecimentos, em especial à Rafaela Sehnem pelo auxílio com o *Tex*, ao Matheus Tavares com o *Scilab* e ao bolsista de Iniciação Científica Otávio Medeiros pela contribuição na adaptação dos *scripts* para o *Phyton*;

Enfim, a todos que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Fazer, todos os dias,
as mesmas coisas e esperar resultados diferentes
é a maior prova de insanidade.
— ALBERT EINSTEIN

RESUMO

RIBEIRO, Guilherme Luís Mello. **Inicialização do modelo WRF pelo filtro digital**. 2018. 68 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

O presente trabalho trata da inicialização do modelo WRF pelo filtro digital. Essa técnica é utilizada para filtrar ondas de gravidade de alta frequência. As ondas de gravidade de alta frequência surgem devido ao desequilíbrio entre os campos de pressão e vento na condição inicial do modelo e tendem a se espalhar pelo domínio. As causas desse desequilíbrio entre os campos de pressão e vento são variadas, como: erro nos dados observados, imperfeição do método numérico que discretiza as equações diferenciais por diferenças finitas, resolução da grade, dificuldade de representar os termos não lineares das equações do modelo e o erro de truncamento em modelos espectrais. Na geração das séries temporais filtradas, surgem oscilações próximas à frequência de corte (oscilações de Gibbs), que são suavizadas com o emprego de funções denominadas de janela. Na metodologia proposta, descreve-se o funcionamento do filtro digital e da função janela mais eficiente, segundo a literatura (Dolph-Chebyshev). Investiga-se também, diferentes frequências de corte, tamanhos de série, funções janela e formas de integração para gerar a série filtrada. Além disso, são explorados os resultados por meio da simulação de um caso de ciclogênese explosiva ocorrido em 03/01/2014. Os resultados demonstram que o modelo simulou a ciclogênese, quando comparados às análises do CPTEC (usadas como referência). O filtro digital mostrou-se uma metodologia eficiente para inicialização do WRF, com grades aninhadas, sendo que os melhores resultados foram obtidos com frequência de corte de 1 hora, série de 1 hora, função janela de Dolph-Chebyshev e estratégia de integração TDFI.

Palavras-chave: Filtro passa-baixa, modelo numérico, ondas de gravidade.

ABSTRACT

RIBEIRO, Guilherme Luís Mello. **WRF model initialization by digital filter**. 2018. 68 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

The present work deals with the initialization of the WRF model by the Digital Filter. That technique is used to filter high-frequency gravity waves. High-frequency gravity waves arise due to the imbalance between the pressure and wind fields in the initial condition of the model and tend to spread through the domain. The causes of the imbalance between the pressure and wind fields are varied, such as: error in the observed data, imperfection of the numerical method that discretizes the differential equations by finite differences, grid resolution, difficulty to represent the nonlinear terms of the equations of the model and the truncation error in spectral models. In the generation of the filtered time series, oscillations occur close to the cut-off frequency (Gibbs oscillations), which are smoothed with the use of so-called window functions. In the proposed methodology, it is described the operation of the digital filter and the most efficient window function, according to a literature (Dolph-Chebyshev). Different cut-off frequencies, serial sizes, window functions and initialization shapes are also investigated to generate the filtered series. In addition, the results are explored through the simulation of a case of explosive cyclogenesis that occurred on 03/01/2014. The results demonstrate that the model simulated the cyclogenesis, when compared to CPTEC analyzes (used as reference). The Digital Filter showed an efficient methodology for the initialization of the WRF, with nested grids. The best results were obtained with 1-hour cut-off frequency, 1-hour series, Dolph-Chebyshev window function and TDFI integration estrategy.

Keywords: Low-pass filter, numeric model, gravity waves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Etapas de processamento do modelo WRF. 25
Figura 2 Sistema η de coordenadas verticais. 26
Figura 3 Grade alternada horizontal (a) e vertical (b) do tipo C de Arakawa. . 29
Figura 4 Exemplo de aninhamento de grades na grade do tipo C de Arakawa. 31
Figura 5 Oscilações de Gibbs verificadas na função salto: (a) Função salto com N = 10; (b) Função salto com incremento de termos, N = 100 e (c) Detalhe em *zoom* de uma das extremidades da função salto. . . 38
Figura 6 Estratégias de integração implementadas no WRF. 42
Figura 7 Imagem realçada do satélite Goes-13, no canal infra-vermelho termal às: (a) 06 UTC (03/01/2014); (b) 12 UTC (03/01/2014); (c) 18 UTC (03/01/2014) e (d) 00 UTC (04/01/2014). 43
Figura 8 Produto INPE-CPTEC-GPT às 00 UTC (03/01/2014): (a) Carta de superfície; (b) Carta de altitude - 850 hPa; (c) Carta de altitude - 500 hPa e (d) Carta de altitude - 250 hPa. 44
Figura 9 Fotos das consequências da CE ocorrida no dia 03/01/2014, em Santa Catarina. 46
Figura 10 Domínios de estudo: Domínio 1 - grade externa e domínio 2 - grade interna 47
Figura 11 PNMM (hPa) 00 UTC (03/01/2014) - Análise para o domínio 1 (a) e para o domínio 2 (b). 49
Figura 12 Geopotencial (mgp) e vetor vento (m/s) 00 UTC (03/01/2014) - Análise para o domínio 1 (a) e para o domínio 2 (b). 49
Figura 13 PNMM (hPa) 12 UTC (03/01/2014) - Previsão para domínio 1 (a) e domínio 2 (b). 50
Figura 14 TPS (hPa) - (a-b) domínios 1 e 2 - linha preta tracejada (sem inicialização), linha verde tracejada (FC 7,5 min, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI), linha laranja contínua (FC 15 min, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI), linha azul pontilhada (FC 30 min, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI) e linha vermelha contínua (FC de 1 h, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI). 53

Figura 15 TPS (hPa) - (a-b) domínios 1 e 2 - linha preta tracejada (sem inicialização), linha vermelha contínua (FC 1 h, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI), linha verde contínua (FC 2 h, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI), linha azul pontilhada (FC 3 h, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI) e linha laranja contínua (FC de 4 h, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI). 54
Figura 16 TPS (hPa) - (a-b) domínios 1 e 2 - linha preta tracejada (sem inicialização), linha cinza contínua (Dolph), linha vermelha contínua (Dolph-Chebyshev), linha azul contínua (Uniforme), linha laranja contínua (Lanczos), linha verde contínua (Hamming), linha amarela tracejada (Blackman), linha lilás pontilhada (Kaiser), linha roxa contínua (Potter) e linha marrom pontilhada (Recursiva). 55
Figura 17 TPS (hPa) - (a-b) domínios 1 e 2 - linha preta tracejada (sem inicialização), linha vermelha contínua (TDFI), linha azul contínua (DDFI) e linha laranja contínua (DFL). 56
Figura 18 PNMM (hPa) 00 UTC (03/01/2014) - Análise (a) sem IFD - domínio 1; (b) com IFD - domínio 1; (c) sem IFD - domínio 2 e (d) com IFD - domínio 2. 58
Figura 19 PNMM (hPa) 12 UTC (03/01/2014) - Previsão (a) sem IFD - domínio 1; (b) com IFD - domínio 1; (c) sem IFD - domínio 2 e (d) com IFD - domínio 2. 59
Figura 20 PNMM (hPa) 00 UTC (03/01/2014) - Diferença da análise para domínio 1 (a) e domínio 2 (b). 60
Figura 21 PNMM (hPa) 12 UTC (03/01/2014) - Diferença da previsão para domínio 1 (a) e domínio 2 (b). 60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Caracteres gregos

α	Inverso da densidade $(m^3.kg^{-1})$
α_d	Inverso da densidade para o ar seco $(m^3.kg^{-1})$
Δt	Passo de tempo (s)
η	Coordenada vertical da pressão hidrostática sobre o terreno
$\dot{\eta}$	Velocidade vertical contravariante ou velocidade de coordenada $(m.s^{-1})$
γ	Proporção de calor para ar seco a pressão e volume constantes (K)
μ	Diferença da pressão hidrostática entre a superfície e o topo do modelo (hPa)
μ_d	Diferença da pressão hidrostática de ar seco, entre a superfície e o topo do modelo (hPa)
Ω	Coordenada da velocidade acoplada
ω	Componente vertical da velocidade $(m.s^{-1})$
ϕ	Geopotencial (mgp)
ρ	Densidade $(kg.m^{-3})$
Θ	Temperatura potencial acoplada (K)
θ	Temperatura potencial (K)

Outros símbolos

C_p	Calor específico do ar quente a pressão constante $(J.K^{-1}.kg^{-1})$
C_v	Calor específico do ar quente a volume constante $(J.K^{-1}.kg^{-1})$
g	Aceleração da gravidade $(m.s^{-2})$
m	Fator de escala do mapa
m_x	Fator de escala do mapa na direção x
m_y	Fator de escala do mapa na direção y
P, p	Pressão (hPa)
P_{ht}	Pressão hidrostática no topo (hPa)

P_{hs}	Pressão hidrostática na superfície (hPa)
p_0	Pressão de referência ao nível do mar (hPa)
Q_m	Variável genérica da umidade acoplada $(W.m^{-2})$
q_m	Razões genéricas de mistura para a umidade
R	Termos remanescentes das equações
R_d	Constante do gás para ar seco $(J.K^{-1}.kg^{-1})$
t	Tempo (s)
U	Componente horizontal da velocidade acoplada na direção x $(m.s^{-1})$
u	Componente horizontal da velocidade na direção x $(m.s^{-1})$
V	Componente horizontal da velocidade acoplada na direção y $(m.s^{-1})$
$\overrightarrow{V}$	Vetor velocidade tridimensional acoplada $(m.s^{-1})$
v	Componente horizontal da velocidade na direção y $(m.s^{-1})$
W	Componente vertical da velocidade acoplada $(m.s^{-1})$
w	Componente vertical da velocidade $(m.s^{-1})$

Siglas

AMPS	*Antartic Mesoescale Predicition System*
ARW	*Advanced Research WRF*
AS	América do Sul
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CMC	Centro Meteorológico do Canadá
DC	Dolph-Chebyshev
DDFI	*Diabatic Digital Filter Initialization*
DFL	*Digital Filter Launch*
FC	Frequência de Corte
FD	Filtro Digital
FSL	*Forecast System Laboratory*
GPT	Grupo de Previsão de Tempo
HIRLAM	*High Resolution Limited Area Model*
HS	Hemisfério Sul
IDMN	Iniciação Dinâmica por Modos Normais
IFD	Inicialização por Filtro Digital
IMN	Inicialização por Modos Normais
IMNN	Iniciação por Modos Normais Não-linear

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IUM	*Institute of Urban Meteorology*
JP	Jato Polar
LAM	Modelo Japonês de Área Limitada
NCAR	*National Center for Atmospheric Research*
NCEP	*National Center for Environmental Prediction*
NOAA	*National Oceanic and Atmospheric Administration*
PNMM	Pressão ao nível médio do mar
RAP	*Rapid Refresh*
RS	Rio Grande do Sul
RSB	Região Sul do Brasil
RUC	*Rapid Update Cycle*
TDFI	*Twice Digital Filter Initialization*
TPS	Tendência Média da Pressão Absoluta à Superfície
WRF	*Weather Research and Forecasting Model*
WRF-C	*Weather Research and Forecasting Model Chemistry*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 Objetivos 17
1.1.1 Objetivo geral 17
1.1.2 Objetivos específicos 17
1.2 Organização do trabalho 17

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
2.1 A evolução da filtragem digital em modelos de previsão atmosférica 18
2.2 Ciclogênese 22

3 METODOLOGIA 24
3.1 O modelo WRF 24
3.1.1 Equações governantes 26
3.1.2 Discretização temporal 28
3.1.3 Discretização espacial 29
3.1.4 Condições iniciais e de fronteira 30
3.1.5 Aninhamento de grades 30
3.2 O filtro digital 31
3.2.1 Filtro passa-baixa de uma função 32
3.2.2 Teorema da convolução aplicado a uma função filtrada 33
3.2.3 Coeficientes do filtro passa-baixa 34
3.3 Aplicação da janela de Dolph-Chebyshev à série filtrada 35
3.4 As oscilações de Gibbs 36
3.5 Funções janela implementadas no WRF 38
3.6 Estratégias de integração implementadas no WRF 41
3.7 Caso de 03/01/2014 42
3.8 Domínio de estudo 46

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 48
4.1 Simulação do caso sem filtragem digital 48
4.2 Tendência média de pressão absoluta à superfície (TPS) 50
4.3 Investigando a frequência de corte 51
4.4 Investigando o tamanho da série a ser filtrada 51
4.5 Investigando as funções janela 51
4.6 Investigando a estratégia de integração 52
4.7 Análise da performance da filtragem digital 57

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS 62

REFERÊNCIAS 64
ANEXO A *NAMELIST DFI CONTROL* 68

1 INTRODUÇÃO

O *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) é um modelo de previsão atmosférica de equações primitivas desenvolvido pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) em colaboração com o *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), o *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e o *Forecast System Laboratory* (FSL). Devido as suas funcionalidades, como sistema de assimilação e demais utilitários como possibilidade de acoplamento a modelos de química (WRF-Chem), caracteriza-se por ser um sistema de previsão numérica de tempo de última geração, podendo ser implementado em várias arquiteturas de computadores e suportando diretivas de paralelismo (SKAMAROCK et al., 2005).

Todavia existem problemas que podem interferir consideravelmente nas previsões realizadas por modelos numéricos, como o WRF. Um desses problemas é o surgimento de oscilações espúrias ou ruído gerado por ondas de gravidade de alta frequência, que por sua vez, surgem de desequilíbrios entre campos de pressão e vento na condição inicial do modelo e se propagam pelo domínio mascarando os modos importantes para a previsão, como ondas de Rossby, acústicas e gravidade de baixa frequência, principalmente nas primeiras horas de processamento do modelo (HARTER, 1999).

Este desequilíbrio, que surge entre os campos de pressão e vento, possui causas variadas, como: erro nos dados observados, imperfeição do método numérico que discretiza as equações diferenciais por diferenças finitas, resolução da grade, dificuldade em representar os termos não-lineares de tais equações e ainda, o erro de truncamento em modelos espectrais (HUANG; LYNCH, 1993).

Com a finalidade de reduzir este desequilíbrio entre os campos de pressão e vento nos campos inicias do modelo utilizam-se técnicas de filtragem/inicialização, tais como o filtro digital (LYNCH; HUANG, 1991).

Estas técnicas eliminam ou atenuam ondas que não são soluções físicas do conjunto de equações do modelo. Assim, o filtro digital no WRF é um filtro passa-baixa, aplicado às series temporais dos campos do modelo. As séries temporais são geradas através de três formas possíveis de integração: adiabática (integração para

trás), diabática (integração para frente) e a combinação das duas formas de integração (SKAMAROCK et al., 2005).

Mais recentemente, com o surgimento de sistemas de assimilação de dados, a técnica de filtragem digital tem sido citada como parte integrante e indispensável para a utilização desses sistemas (ANCELL, 2012), (ZHU et al., 2013) e (PECKHAM et al., 2016).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Neste trabalho, propõe-se a inicialização do WRF por meio do filtro digital. O objetivo é acelerar o equilíbrio entre os campos de vento e pressão na condição inicial (CI) do WRF.

1.1.2 Objetivos específicos

(i) Avaliar o desempenho da inicialização por filtro digital (IFD) aplicada ao modelo com grades aninhadas;

(ii) Investigar a metodologia com relação a diferentes frequências de corte, tamanho de séries, funções janela e estratégias de integração;

(iii) Explorar os resultados através da simulação do caso de ciclogênese explosiva ocorrida no Atlântico Sul, no dia 03/01/2014, de forma a validar a técnica utilizada.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. Como verificado, o Capítulo 1 destina-se à introdução e objetivos. No Capítulo 2 consta a revisão bibliográfica, seguida pelo Capítulo 3, onde destaca-se a metodologia e os Capítulos 4 e 5, são respectivamente reservados para resultados e discussões, e conclusões e perspectivas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A evolução da filtragem digital em modelos de previsão atmosférica

CHARNEY (1955), formulou algumas sugestões com a finalidade de redução do ruído nos modos meteorológicos: trabalhar com modelos de equações simplificadas de modo a não admitir altas frequências em suas soluções ou a utilização de filtros nos modelos de equações primitivas. A priori, devido às limitações computacionais, o amplo emprego da primeira alternativa foi verificado. Atualmente, devido a evolução na área computacional, com sistemas de maior capacidade de processamento, a aplicação de filtros aos modelos de equações primitivas, tem sido empregada.

Segundo HALTINER; WILLIAMS (1980), a partir da década de 60, começou a ser muito utilizado o método de inicialização dinâmica. Nesta metodologia os dados observados/analisados são integrados várias vezes para trás e para frente a partir de um tempo inicial, com a finalidade de amortecimento das ondas de gravidade de alta frequência. Nesse sentido, o modelo tende a se ajustar antes de começar a previsão. Este método apresenta uma relação de dependência do esquema de integração usado pelo modelo, sendo necessária a integração adiabática enquanto o método é aplicado. Porém, como principal deficiência da metodologia, todas as ondas são amortecidas, sem distinção.

BRATSETH (1982), propôs a inicialização dinâmica por modos normais (IDMN) com a finalidade de amortecimento das oscilações de alta frequência. Nesta técnica, apenas uma parte das equações do modelo é integrada no tempo com o esquema avançado-atrasado (parte linear), mantendo-se os termos forçantes e não-lineares constantes. REPELLI (1991), salienta que a IDMN emprega o conceito de modos normais sem a necessidade de calculá-los explicitamente.

Uma outra técnica de inicialização é a inicialização por transformada de Laplace, aplicada por LYNCH (1985). Essa técnica foi utilizada para inicializar os dados para um modelo barotrópico de previsão sobre uma área limitada. A inicialização obteve êxito na supressão de oscilações de alta frequência durante as primeiras horas de

previsão, sendo nesse período que, segundo os autores, são verificados os maiores impactos da referida técnica.

LYNCH; HUANG (1991) aplicaram a técnica de filtragem digital para inicializar os dados do *High Resolution Limited Area Model* (HIRLAM). O método utiliza o filtro digital aplicado às séries temporais das variáveis do modelo, geradas por integrações para frente e para trás, a partir do tempo inicial. Tal metodologia mostrou-se um esquema de inicialização satisfatório. A metodologia de inicialização por filtagem digital (IFD) é comparada ao padrão de inicialização normal não linear (IMNN) usado no modelo HIRLAN. Ambos os métodos produziram resultados similares, embora a filtragem digital pareça mais eficaz na supressão do ruído nas primeiras horas de previsão. Na comparação do custo computacional entre a IFD e a IMNN, os resultados foram semelhantes. O principal apelo da técnica de filtragem digital, segundo os autores, é sua grande simplicidade no que diz respeito à concepção e aplicação.

HARMS; RAMAN; MADALA (1992), apresentam a inicialização por modos normais (IMN), técnica em que há o equilíbrio dinâmico usando os modos normais das equações linearizadas. Os autores obtiveram bons resultados apenas em modelos lineares. A IMN não foi aplicada diretamente a modelos de área limitada, devido à dificuldade prática no cálculo das soluções não lineares por modos normais destes modelos. Como forma de atenuação desses problemas, MACHENHAUER (1977) desenvolveu um esquema de inicialização por modos normais não-linear (IMNN), no qual as tendências temporais das oscilações de alta frequência são eliminadas. Tal técnica apresenta resultados eficientes na eliminação de oscilações de alta frequência em modelos não-lineares e tornou-se amplamente utilizada em centros operacionais como o *National Center for Enviromental Prediction* (NCEP).

HUANG; LYNCH (1993) apresentam a formulação de um esquema de inicialização por filtragem digital, que inclui os efeitos do processo diabático. A aplicação deste esquema resulta em previsões com menor ruído, quando comparado com a inicialização adiabática correspondente. A implementação do esquema, segundo os autores, é muito simples, exigindo apenas o cálculo dos coeficientes do filtro e pequenos ajustes no código do modelo. O custo computacional da inicialização por filtragem digital é diretamente proporcional ao tamanho do intervalo de tempo sobre o qual o filtro é aplicado. Para uma escolha cuidadosa dos pesos do filtro, com base na teoria de filtros ótimos, a extensão do filtro pode ser reduzida de um fator 2 ou 3, com um aumento correspondente de eficiência.

No outro trabalho publicado por HUANG; CEDERSKOV; KÄLLÉN (1994), os autores examinam o desempenho, em um modelo completo de assimilação de dados, de três esquemas de inicialização: o de filtragem digital adiabática de LYNCH; HUANG (1991), o de filtragem digital diabática de HUANG; LYNCH (1993) e o de modo normal não linear de CEDERSKOV (1992). Como referência, foi utilizada a inicialização por

modos normais não linear de MACHENHAUER (1977), metodologia utilizada operacionalmente pelo Instituto Meteorológico Dinamarquês na época. O referido estudo verificou um equilíbrio em termos de desempenho entre os esquemas testados e o de referência. Os autores concluíram ainda que os dois esquemas diabáticos reduzem consideravelmente o nível de ruído em comparação com os adiabáticos, embora com aumento do custo computacional. Nesse trabalho os autores verificaram a clara vantagem da inicialização por filtragem digital sobre o esquema de modos normais, quando todas as variáveis dependentes do modelo são inicializadas.

FILLION et al. (1996) implementaram o filtro digital no modelo espectral de equações primitivas, usado operacionalmente no Centro Meteorológico do Canadá (CMC). Neste trabalho a IFD foi comparada com um experimento em que os campos de pressão e vento estavam em balanço e com a IMNN num ciclo de assimilação de dados de radiossonda. De acordo com os autores, o FD foi considerado de simples implementação. A particularidade deste trabalho é que o modelo foi integrado diabaticamente doze horas para frente, concluindo que a IFD resultou em campos de pressão à superfície melhor ajustados do que a IMNN. Comparando a IFD com um experimento no qual os campos iniciais de pressão e vento estavam em balanço, não houve melhoras significativas. Analisando a performance da IFD em relação a IMNN num ciclo de assimilação de dados de radiossonda, conclui-se que o primeiro foi mais eficiente, com base nos experimentos obtidos.

INNOCENTINI; CAETANO; HARTER (2002) combinaram a técnica de assimilação de dados conhecida como relaxação newtoniana com a IFD, objetivando obter condições iniciais para o modelo japonês de área limitada (LAM). Os autores corrigiram a previsão do LAM pela assimilação de análises geradas pelo modelo global do NCEP. Além disso, a aplicação ao LAM mostra que o esquema é eficiente, apresentando baixo custo computacional e controle das oscilações de Gibbs.

HUANG et al. (2007), desenvolveram um estudo de inicialização do WRF por filtro digital no *Institute of Urban Meteorology* (IUM), na China. Os testes sem a utilização do filtro digital apresentaram altos níveis de ruído. Mas quando o modelo foi inicializado com o filtro, com resolução de 9 km e ciclo de integração de três horas, ou seja, uma hora e meia para trás e para frente, observou-se o amortecimento de ondas rápidas.

DUDA (2008), avaliou a possibilidade de utilização do filtro digital numa versão modificada do WRF, denominada de *Antartic Mesoescale Predicition System* (AMPS), devido ao fato de que, invariavelmente, havia geração de ruído na interpolação dos dados iniciais. Esse ruído pode levar à precipitação irreal, à instabilidade numérica e tende a degradar a previsão, inviabilizando a assimilação dos dados. O referido autor relata dificuldades para aplicação do filtro digital em domínios aninhados, uma necessidade no AMPS. Como alternativa a essa questão, foram analisados os domínios separadamente. Verificou-se, como resultado, que ainda ocorria geração de ruído,

porém em menor escala, quando comparada à metodologia sem o uso do filtro digital.

SMIRNOVA et al. (2009), efetuaram alguns testes na versão 3.0 do WRF. Basicamente, foram executadas previsões em tempo real com e sem a utilização da técnica de filtragem digital, com a diferença de que o ciclo de filtragem é utilizado duplamente (integração para frente e para trás) LYNCH (1997) e HUANG; YANG (2002). Como relatam os autores, esse experimento apresentou resultados bastante satisfatórios, como a tendência de ganho em precisão da variável pressão à superfície, que apresentou pequenas oscilações durante as duas primeiras horas de previsão com filtro digital.

ASHRAFI; AZADI; SABETGHADAM (2011) avaliaram a performance da IFD com diferentes funções janela aplicadas para remover as oscilações de Gibbs: (i) Blackman; (ii) Dolph; (iii) Dolph-Chebyshev; (iv) Hamming; (v) Kaiser; (vi) Lanczos; (vii) Potter; $(viii)$ recursiva e (ix) uniforme. A análise técnica destas funções demonstrou a superioridade da janela de Dolph-Chebyshev em relação às outras. Os autores descrevem ainda que existem três técnicas de inicialização por filtragem digital implementadas no WRF: (i) Filtragem digital diabática; (ii) Filtragem digital adiabática e (iii) Filtragem digital combinada (integração para frente e para trás). Nesse sentido, os testes realizados na região de Tehran, no Iran, com uma malha de 45 x 45 km, demonstrou a superioridade da técnica de filtragem digital combinada associada com a janela de Dolph-Chebyshev. Essa abordagem apresentou seu ápice de eficiência nas primeiras três horas de integração, o que vai ao encontro das necessidades do modelo de previsão, que apresenta o maior ruído nesse período.

ANCELL (2012) avaliou a IFD associada ao sistema de assimilação de dados da versão 3.0.1.1 do WRF. A IFD foi usada com função janela de Dolph-Chebyshev e integração combinada (TDFI) (1 h para frente e para trás). A avaliação do referido estudo, na região norte dos Estados Unidos, concluiu que não houve melhorias significativas na previsão, principalmente no que diz respeito a temperatura, mas houve melhoria nos campos de vento.

ZHU et al. (2013) estudaram a IFD acoplada ao WRF por meio do sistema *Rapid Refresh* (RAP), que substituiu o *Rapid Update Cycle* (RUC), associado ao *solver* ARW do WRF desde 2012 no NOAA/NCEP. Nesse estudo, os autores relatam o uso da IFD com integração diabática para frente, destacando a essencialidade de sua utilização na assimilação de dados, devido a simplicidade e efetividade para atenuar ondas de alta frequência (ruído) durante o período inicial de integração do modelo.

PECKHAM et al. (2016) avaliaram também a IFD associada ao RAP, concluindo da necessidade de uso da IFD no sistema de assimilação de dados do NOAA/NCEP. Os resultados da avaliação realizada, inclusive avaliando os pesos dos coeficientes do filtro com função janela de Dolph-Chebyshev, comprovaram a efetividade da IFD em atenuar as ondas de alta frequência, evidenciando a redução dos erros nos campos de

massa e fluxo de momento no período inicial de integração do modelo. Entretanto, os autores observaram diminuição da convecção gerada, inconsistente com a realidade.

Com base nos estudos de SKAMAROCK et al. (2005), ASHRAFI; AZADI; SABETGHADAM (2011) e PECKHAM et al. (2016), supõe-se que a abordagem da função janela de Dolph-Chebyshev apresentaria os melhores resultados. De acordo com o primeiro autor, essa função janela apresenta todas as características verificadas em um filtro ótimo, pois minimiza as diferenças entre a função de transferência do filtro e a função de transferência de passagem e parada de banda. O segundo autor reitera essa superioridade da referida função janela, pois as flutuações não desejadas, nos testes realizados, foram eliminadas nas três primeiras horas. Além disso, comparando os dados de precipitação observados por estação com os resultados de previsão efetuados com inicialização utilizando a janela de Dolph-Chebyshev e estratégia de integração diabática, verificou-se que a previsão com filtro tem redução do erro quadrático médio mínimo em relação a previsão sem filtro. Já o terceiro autor destaca que, apesar do problema de atenuação dos parâmetros de convecção na utilização da IFD com integração combinada (TDFI) e função janela de Dolph-Chebyshev, houve redução das ondas de alta frequência e redução de erros.

Além disso, de acordo com o estudo de LYNCH (1997), a função janela de Dolph-Chebyshev, tem uma expressão analítica explícita, o que facilita a implementação.

2.2 Ciclogênese

A região à leste da Cordilheira dos Andes, mais precisamente entre 30° e 50° de latitude sul, onde está localizada a região sul do Brasil (RSB), é uma região favorável à formação e intensificação de ciclones e apresenta grandes variações - tanto espaciais como temporais - das variáveis meteorológicas, como pressão, temperatura, umidade e ventos.

SINCLAIR (1995), utilizando 17 anos de dados para todo o hemisfério sul (HS), encontrou algumas regiões ciclogenéticas na América do Sul (AS). Particularmente, dois centros de máxima ocorrência durante o ano foram encontrados na vizinhança da (RSB) - um próximo ao Uruguai (máximo no inverno) e outro próximo ao golfo de San Matias, na Argentina (máximo no verão). GAN; RAO (1991) relacionam o máximo observado sobre o Uruguai à instabilidade baroclínica e efeito da montanha. O máximo sobre o golfo de San Matias, foi relacionado pelos autores, ao processo de instabilidade baroclínica na corrente dos ventos de oeste, intensificados pelo contraste continente-oceano. Segundo o modelo conceitual de ciclogênese descrito por BJERKNES; SOLBERG (1922), existem duas regiões de convergência de massa: a frente fria e a frente quente. Na RSB, as frentes frias estão fortemente relacionadas com a ocorrência de chuvas (SLEIMAN, 2008).

Um caso especial de ciclogênese, conhecido como ciclogênese explosiva (CE) é definido com o aprofundamento da pressão à superfície de $1\ Bergeron$, ou seja, $1\ mb/hora$ em um período de 24 horas para a latitude de $60°$, (SANDERS; GYAKUM, 1980). Estes ciclones estão associados a frentes frias, causando fortes ventos, altas taxas de precipitação, baixa visibilidade e altas ondas na superfície do mar, onde geralmente ocorre a sua gênese. As consequências destes sistemas são perdas materiais e vidas humanas nas áreas por ele atingidas. É importante destacar que a ciclogênese é relativamente fácil de prever, porém a característica explosiva é de difícil previsão, devido a sua intensidade e a escassez de dados sobre o oceano.

Neste trabalho, avalia-se o impacto do filtro digital, num caso de CE, ocorrido no Atlântico Sul associado a uma frente fria que causou danos em algumas cidades, tais como Blumenau e Joinvile, no estado de Santa Catarina.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, aborda-se a teoria sobre filtros passa-baixa, mais especificamente o filtro digital e a dedução de seus coeficientes, obtidos através do teorema da convolução entre duas funções, tanto discretas como contínuas. Apresenta-se funções utilizadas para remoção das oscilações de Gibbs, investiga-se os melhores parâmetros para utilização da IFD na versão 3.8 do WRF e descreve-se o caso de ciclogênese explosiva explorado neste trabalho.

3.1 O modelo WRF

De acordo com SKAMAROCK et al. (2005), basicamente, o modelo WRF executa seu processamento em três fases distintas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na etapa de pré-processamento, são preparadas as condições iniciais e de fronteira, oriundas de um modelo global. O processamento consiste na integração do modelo propriamente dita, ou seja, todas as variáveis são calculadas em cada ponto de grade tridimensional, levando-se em conta as parametrizações físicas selecionadas. Finalmente, na etapa de pós-processamento, realiza-se a verificação, tanto em ponto de grade como em ponto de estação, grafica-se os resultados e, em aplicações operacionais, os resultados são disponibilizados via *web*. A figura 1 mostra as etapas de processamento na forma de fluxograma.

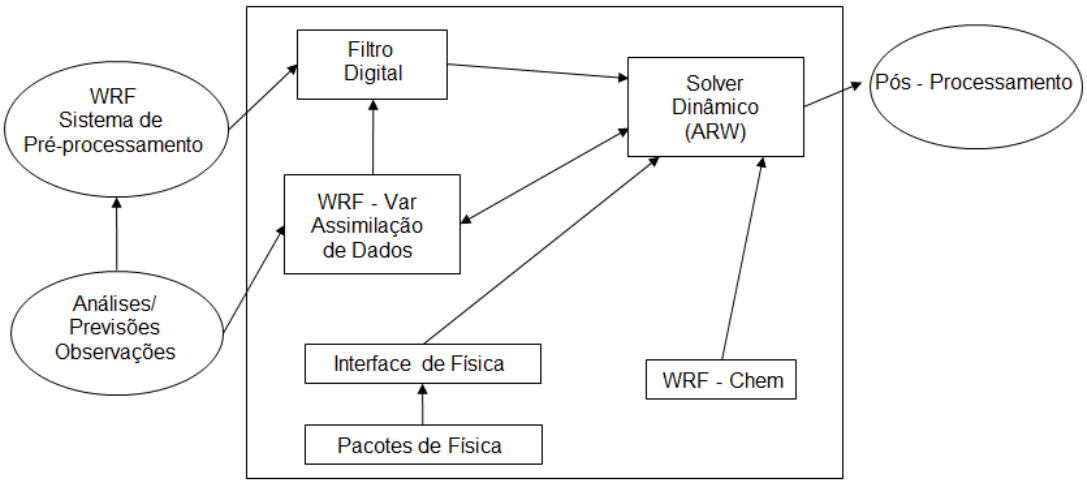


Figura 1: Etapas de processamento do modelo WRF.
Fonte: Adaptado de SKAMAROCK et al. (2005)

Quanto as equações do modelo, o WRF possui um núcleo dinâmico responsável pela solução das equações de Euler, tanto no modo hidrostático como no modo não-hidrostático, numa atmosfera totalmente incompressível em coordenada vertical η, que segue a altura do terreno. Sendo que, esse sistema de coordenadas, que acompanha o relevo na superfície, foi proposto por LAPRISE (1992) e é ilustrado na figura 2.

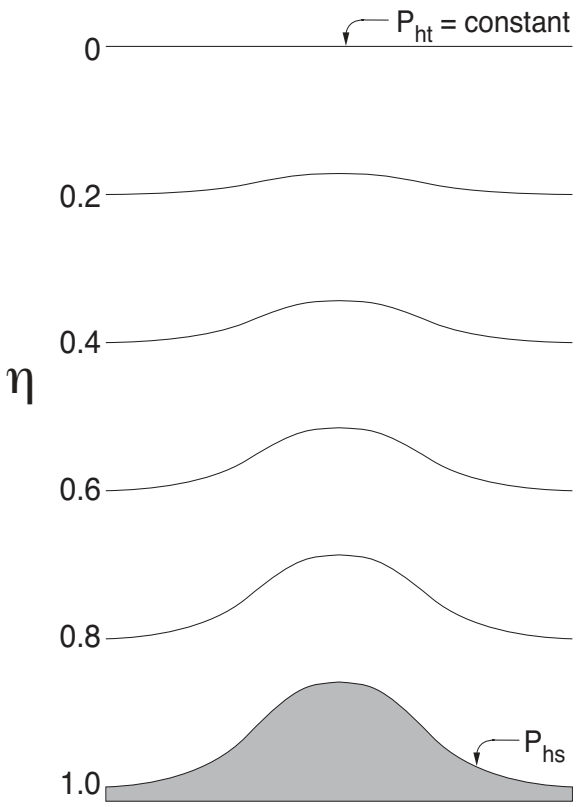


Figura 2: Sistema η de coordenadas verticais.
Fonte: SKAMAROCK et al. (2005)

Podemos definir η como:

$$\eta = \frac{(P - P_{ht})}{(P_{hs} - P_{ht})} \tag{1}$$

Onde P : Pressão no ponto considerado; P_{ht} : Pressão hidrostática no topo e P_{hs} : Pressão hidrostática na superfície.

3.1.1 Equações governantes

O modelo WRF utiliza como base um conjunto de equações que modelam o comportamento da atmosfera. Tais equações podem ser expressas na forma de Euler de fluxo diferencial:

Conservação da quantidade de movimento

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \overrightarrow{V} u) - \partial_x (p \partial_\eta \phi) + \partial_\eta (p \partial_x \phi) = F_U \tag{2}$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \overrightarrow{V} v) - \partial_y (p \partial_\eta \phi) + \partial_\eta (p \partial_y \phi) = F_V \tag{3}$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \overrightarrow{V} w) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \tag{4}$$

Conservação da energia termodinâmica

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \overrightarrow{V} \theta) = F_\theta \tag{5}$$

Conservação de massa

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \overrightarrow{V}) = 0 \tag{6}$$

Equação do geopotencial

$$\partial_t \phi + \mu^{-1} \left[(\overrightarrow{V} \cdot \nabla \phi) \right] - gW = 0 \tag{7}$$

Equação da hidrostática

$$\partial_\eta \phi = -\alpha \mu \tag{8}$$

Estado termodinâmico

$$P = P_0 \left(\frac{R_d \theta}{P_0 \alpha} \right)^\gamma \tag{9}$$

Onde $V : (u, v, w)$; θ : temperatura potencial; $\phi = gz$: geopotencial; P, p : pressão; $\alpha = \rho^{-1}$: inverso da densidade; $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$: proporção de calor para ar seco a pressão e volume constantes; R_d : constante do gás para ar seco (287) $(J \times kg^{-1} \times K^{-1})$; p_0 : pressão de referência ao nível do mar; $\overrightarrow{V} = \mu V = (U, V, W)$: vetor velocidade tridimensional acoplada; $\omega = \mu \dot{\eta}$: componente vertical da velocidade; $\Theta = \mu \theta$: temperatura potencial acoplada; F_U, F_V, F_W, F_Θ e F_{Q_m}: representam os termos forçantes devido à física do modelo, mistura turbulenta, projeções esféricas e rotações.

Essas equações são aplicadas apenas de forma idealizada, sendo necessário redefiní-las levando em consideração o efeito de Coriolis, a umidade do ar, e a projeção cartográfica utilizada. Além disso, é preciso contabilizar que as equações diferenciais possuem variáves de perturbação, como forma de diminuição dos erros de truncamento e arredondamento no cálculo dos gradientes de pressão horizontal e vertical. Assim, as equações são expressas na forma:

$$\partial_t U + m_x[\partial_x(Uu) + \partial_y(Vu)] + \partial_\eta(\Omega u) + \mu_d \alpha \partial_x p + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) (\partial_\eta p \partial_x \phi) = F_U \tag{10}$$

$$\partial_t V + m_y[\partial_x(Uv) + \partial_y(Vv)] + \left(\frac{m_x}{m_y} \right) \partial_\eta(\Omega v) + \mu_d \alpha \partial_y p + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) (\partial_\eta p \partial_y \phi) = F_V \tag{11}$$

$$\partial_t W + \left(\frac{m_x m_y}{m_y}\right)[\partial_x(Uw) + \partial_y(Vw)] + \partial_\eta(\Omega w) - \left(\frac{1}{m_y}\right) g\left[\left(\frac{\alpha}{\alpha_d}\right)(\partial_\eta p - \mu_d\right] = F_W \quad (12)$$

$$\partial_t \Theta + m_x m_y[\partial_x(U\theta) + \partial_y(V\theta)] + m_y \partial_\eta(\Omega\theta) = F_\Theta \quad (13)$$

$$\partial_t \mu_d + m_x m_y[U_x + U_y] + m_y \partial_\eta(\Omega) = 0 \quad (14)$$

$$\partial_t \phi + \left(\frac{1}{\mu_d}\right)[m_x m_y(U\partial_x\phi + V\partial y\phi) + m_y\Omega\partial_\eta\phi - m_y g W] = 0 \quad (15)$$

$$\partial_t Q_m + m_x m_y[\partial_x(Uq_m) + \partial_y(Vq_m)] + m_y\partial_\eta(\Omega q_m) = F_{Q_m} \quad (16)$$

Nesse sentido, as formas de momento ficam expressas como:

$U = \frac{\mu_d u}{m}$; $V = \frac{\mu_d v}{m}$; $W = \frac{\mu_d w}{m}$ e $\Omega = \frac{\mu_d \dot{\eta}}{m}$

Onde α_d : inverso da densidade para ar seco; η : coordenada vertical da pressão hidrostática sobre o terreno; $\dot{\eta}$: velocidade vertical contravariante ou velocidade de coordenada; μ : diferença da pressão hidrostática entre a superfície e o topo do modelo; μ_d : diferença da pressão hidrostática do ar seco, entre a superfície e o topo do modelo; Ω : coordenada da velocidade acoplada; ρ : densidade; C_p : calor específico do ar quente a pressão constante e C_v : calor específico do ar quente a volume constante; g : aceleração da gravidade; m : fator de escala do mapa; m_x : fator de escala do mapa na direção x; m_y : fator de escala do mapa na direção y; P_{ht} : pressão hidrostática no topo; P_{hs} : pressão hidrostática na superfície; Q_m : variável genérica da umidade acoplada; q_m : razões genéricas de mistura para a umidade; t : tempo; U : componente horizontal da velocidade acoplada na direção x; u : componente horizontal da velocidade na direção x; V : componente horizontal da velocidade acoplada na direção y; v : componente horizontal da velocidade na direção y e W : componente vertical da velocidade acoplada.

3.1.2 Discretização temporal

O modelo WRF utiliza um esquema de integração no passo de tempo, onde as ondas de baixa frequência são integradas por meio do método numérico de Runge Kutta de terceira ordem. Porém, o modo horizontal de propagação de ondas acústicas é solucionado com o esquema de integração para trás e para frente, e o modo vertical com o esquema implícito de Crank-Nicholson (MACEDO, 2014).

De acordo com COMIN (2012), para o núcleo ARW do WRF, as variáveis são definidas por $\phi = (U, V, W, \theta, \phi', \mu', Q_m)$ e as equações do modelo, $\phi(t) = R(\phi)$. Para avançar a solução são necessários três passos de $\phi(t)$ a $\phi(t + \Delta t)$, onde Δt é o passo de tempo utilizado para ondas lentas. O método de Runge Kutta de terceira ordem, nesse caso, possui precisão de terceira ordem apenas para as equações lineares, para as não lineares, a precisão é de segunda ordem.

$$\phi^* = \phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\phi^t) \tag{17}$$

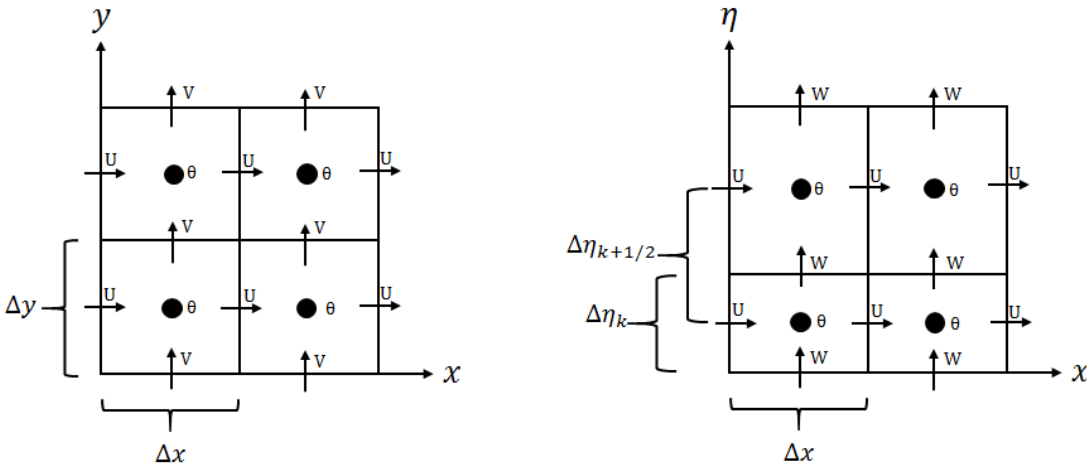
$$\phi^{**} = \phi^t + \frac{\Delta t}{2} R(\phi^*) \tag{18}$$

$$\phi^{***} = \phi^t + \Delta t R(\phi^{**}) \tag{19}$$

Onde R : termos remanescentes das equações e Δt : passo de tempo.

3.1.3 Discretização espacial

Uma malha de cálculo tridimensional, vista na figura 3, representa o espaço físico para o domínio de simulação do WRF. A discretização espacial baseia-se numa grade tipo C de Arakawa descrita por SKAMAROCK et al. (2005). No centro da malha são definidas as variáveis de pressão, enquanto que nos limites são definidas as componentes do vento. Ainda no centro da malha (onde estão definidas as variáveis relativas ao vento a 10 m e à temperatura a 2 m) as variáveis U e V são interpoladas.



(a) (b)

Figura 3: Grade alternada horizontal (a) e vertical (b) do tipo C de Arakawa.
Fonte: (SKAMAROCK et al., 2005)

Com relação aos níveis verticais da grade, os cálculos são efetuados pelos valores das variáveis na coordenada η, que é definida em relação à componente hidrostática de pressão. Cada superfície η é dividida numa rede triangular de localizações horizontais, definida no plano de uma projeção cartográfica particular.

As dimensões da malha são definidas pelo espaçamento desta e seu número de nós, sendo que uma posição é definida pelas coordenadas de latitude e longitude correspondente ao centro geométrico ou a outro ponto à escolha.

Esta grade visa impedir o desacoplamento entre os termos da equação diferencial parcial, que ocorre quando variáveis interdependentes são resolvidas no mesmo ponto de grade, necessitando apenas calcular as médias na equação discretizada para o termo de Coriolis. Em escalas de tempo reduzidas, esse termo tem pouca importância, viabilizando a indicação desse tipo de grade. O possível desacoplamento, se ocorre, provoca grande imprecisão no cálculo pelo módulo computacional, sendo necessária a aplicação de uma difusão computacional nas ondas mais curtas.

Com relação às condições de fronteira lateral e o método de relaxação de DAVIES (1983), estas originam-se das zonas de fronteira específica, que compreende o ponto mais extremo do domínio e na zona de relaxação, que são os quatro pontos adjacentes à zona específica.

3.1.4 Condições iniciais e de fronteira

São necessárias, para o WRF, condições laterais de fronteira que delimitem o estado real da atmosfera ao longo do tempo de integração das equações dinâmicas. Essas condições de fronteira são obtidas por meio de um modelo de simulação de escala global.

As condições de fronteira lateral são obtidas por interpolação das previsões do modelo global sobre os nós que contornam a malha e nos suscessivos incrementos de tempo de integração constante. A fronteira superior é uma superfície constante.

3.1.5 Aninhamento de grades

O modelo WRF permite o aninhamento de grades, de forma que um domínio menor fique inserido em um domínio maior. O domínio aninhado é controlado em suas fronteiras pelo domínio maior. Essa técnica de aninhamento possui como vantagem a possibilidade de realizar o processamento simultâneo, incrementando a resolução espacial em determinada área, sem a necessidade de reprocessar com um intervalo de tempo menor. Um exemplo de aninhamento pode ser visto na figura 4.

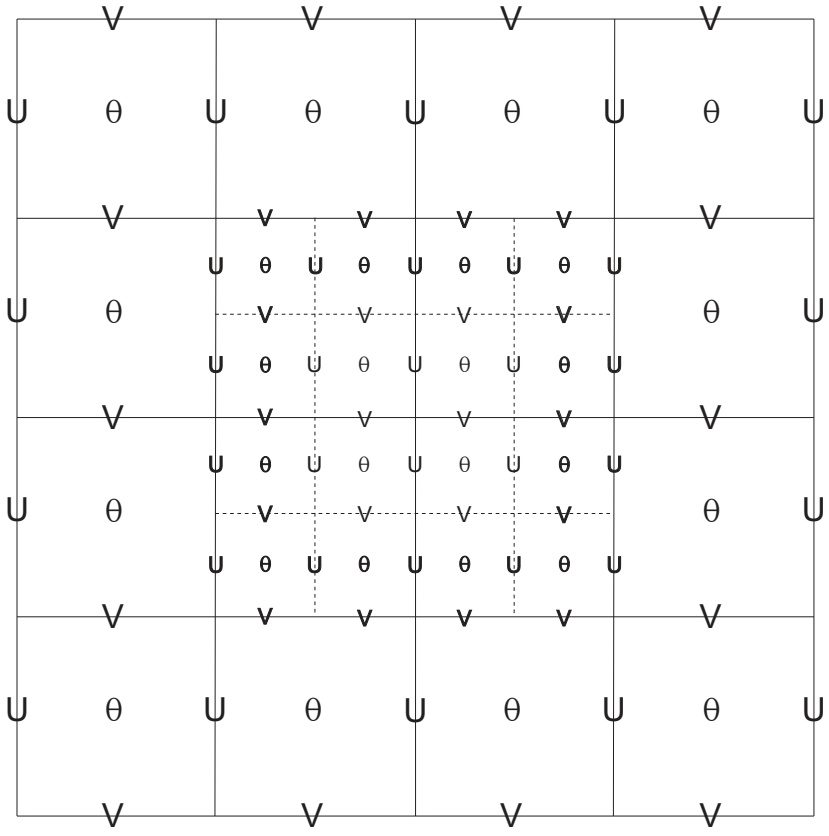


Figura 4: Exemplo de aninhamento de grades na grade do tipo C de Arakawa.
Fonte: SKAMAROCK et al. (2005)

3.2 O filtro digital

Em sua forma geral, de acordo com HARTER (1999), o filtro digital (FD) é uma convolução entre duas funções. Supondo uma sequência $\{f_n\}$ de uma variável discreta no tempo, o filtro digital não recursivo é dado por:

$$f_n^* = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h_k f_{n-k} \tag{20}$$

Onde h_k são os coeficientes constantes do filtro; f_{n-k} são os dados de entrada e f_n^* são dos dados de saída.

Os filtros digitais não recursivos dependem somente dos valores de entrada (passados e futuros). Nesse sentido e como é possível concluir, o FD é uma combinação linear dos dados de entrada $\{f_n\}$ e as propriedades do filtro são definidas pela sequência $\{h_k\}$. O objetivo desta subseção consiste em estabelecer os valores das constantes do filtro, de forma a obter a série filtrada com as propriedades requeridas.

3.2.1 Filtro passa-baixa de uma função

Dada uma função contínua $f(t)$, a transformada de Fourier e sua inversa são definidas por:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t}dt \tag{21}$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)e^{i\omega t}d\omega \tag{22}$$

Onde $F(\omega)$ representa a distribuição espectral de $f(t)$ no domínio das frequências.

Para filtrar frequências maiores que a frequência de corte ω_c, torna-se necessário definir a função:

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{se} \quad |\omega| \leq |\omega_c|, \\ 0, & \text{se} \quad |\omega| > |\omega_c|. \end{cases} \tag{23}$$

O produto $F(\omega)H(\omega)$ representa a distribuição espectral de $f(t)$ retendo apenas as frequências menores ou iguais a ω_c. Por isso, a referida função $H(\omega)$ é definida como filtro passa-baixa.

A função filtrada $f^*(t)$ é dada por:

$$f^*(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)H(\omega)e^{i\omega t}d\omega \tag{24}$$

Para uma função discreta representada por uma sequência $\{f_n\}$, tem-se:

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f_n e^{-i\omega n} \tag{25}$$

com

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} F(\omega)e^{i\omega n}d\omega \tag{26}$$

As relações vistas nas equações 25 e 26 podem ser demonstradas notando-se que:

$$\int_{-\pi}^{\pi} e^{i(m-n)\omega} = \begin{cases} 2\pi, & \text{se} \quad m = n, \\ 0, & \text{se} \quad m \neq n. \end{cases} \tag{27}$$

Multiplicando-se a equação 25 por $e^{i\omega}$ e integrando em ω de $-\pi$ a π tem-se a relação em 26.

Da mesma forma que na equação 24, o filtro passa-baixa para funções discretas resulta em:

$$f_n^* = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} F(\omega)H(\omega)e^{i\omega}d\omega \tag{28}$$

com $H(\omega)$ definido pela equação 23.

3.2.2 Teorema da convolução aplicado a uma função filtrada

A aplicação do teorema da convolução permite chegar à função filtrada, sem a necessidade de calcular a integral em 24 ou 26. Pelo teorema da convolução, as transformadas de duas funções $h(t)$ e $f(t)$ são $H(\omega)$ e $F(\omega)$. Assim, a convolução:

$$(h * f)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x)f(t-x)dx \tag{29}$$

tem a transformada $F(\omega)H(\omega)$.

Por esse teorema, tem-se:

$$F(\omega)H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (h * f)(t)e^{-i\omega t}d\omega \tag{30}$$

de onde segue, pela equações 21 e 22, que:

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)H(\omega)e^{i\omega t}d\omega = (h * f)(t) \tag{31}$$

Portanto, da equação 24, tem-se que a função filtrada $f^*(t)$ é a convolução entre $f(t)$ e $h(t)$:

$$f^*(t) = (h * f)(t) \tag{32}$$

Analogamente, para as sequências $\{f_n\}$ e $\{h_n\}$ representando duas funções discretas, a convolução entre elas é definida por:

$$(h * f)(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_k f_{(n-k)} \tag{33}$$

e o teorema da convolução estabelece que:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} (h * f)(n)e^{-i\omega n} = H(\omega)F(\omega) \tag{34}$$

Então, a frequência filtrada dada pela equação 28, com a aplicação do teorema da convolução, assume a forma:

$$f_n^* = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} F(\omega)H(\omega)e^{i\omega n}d\omega \tag{35}$$

$$f_n^* = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} (h * f)(m)e^{-i\omega n}d\omega\right] e^{i\omega n}d\omega \tag{36}$$

Utilizando as relações de ortogonalidade usadas na demonstração de 25 e 26, tem-se:

$$f_n^* = (h * f)(n) \tag{37}$$

Antes de encerrar essa seção, é apresentada a demonstração do teorema da convolução para funções discretas.

Para duas sequências $\{f_n\}$ e $\{h_n\}$, da relação em 25 segue:

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n e^{-i\omega n} \tag{38}$$

e

$$H(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_k e^{-i\omega k} \tag{39}$$

e o produto:

$$F(\omega)H(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n e^{-i\omega n} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_k e^{-i\omega k} \tag{40}$$

Substituindo-se k por $k - n$ no segundo somatório:

$$F(\omega)H(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n e^{-i\omega n} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_{(k-n)} e^{-i\omega(k-n)} \tag{41}$$

$$F(\omega)H(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[f_n \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} h_{(k-n)} e^{-i\omega(k-n)} e^{-i\omega n} \right) \right] \tag{42}$$

$$F(\omega)H(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[f_n \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} h_{(k-n)} e^{-i\omega k} \right) \right] \tag{43}$$

E invertendo-se a ordem dos somatórios, obtemos:

$$F(\omega)H(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[\left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} h_{(k-n)} f_n \right) e^{-i\omega k} \right] \tag{44}$$

$$F(\omega)H(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (h * f)(k) e^{-i\omega k} \tag{45}$$

que é o Teorema da Convolução apresentado na equação 34.

3.2.3 Coeficientes do filtro passa-baixa

Definindo-se h_n como a transformada inversa do filtro $H(\omega)$ dado pela equação 23, tem-se que:

$$h_n = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} H(\omega)e^{i\omega n}d\omega \tag{46}$$

Pela definição de $H(\omega)$, segue que:

$$h_n = \frac{1}{2\pi}\int_{-\omega_c}^{+\omega_c} e^{i\omega n}d\omega \tag{47}$$

$$h_n = \frac{1}{2\pi n}\left[e^{i\omega_c n} - e^{-i\omega_c n}\right] \tag{48}$$

$$h_n = \frac{sen(n\omega_c)}{n\pi} \tag{49}$$

Assim, dada uma sequência $\{f_n\}$, das equações 34 e 37, esta sequência com frequências maiores que ω_c filtradas, é obtida de:

$$f_n^* = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{sen(k\omega_c)}{k\pi} f_{n-k} \tag{50}$$

3.3 Aplicação da janela de Dolph-Chebyshev à série filtrada

Em problemas práticos, o filtro digital é aplicado a uma sequência finita de dados. Isso significa truncar a sequência $\{f_n^*\}$, o que introduz as oscilações de Gibbs próximas a frequência de corte ω_c. Para resolver esse problema, multiplica-se f_n^* por funções que suavizam as oscilações de Gibbs, as quais são definidas como funções janela (HAMMING, 1989). A nova sequência filtrada com 2N+1 elementos é dada por:

$$f_n^* = \sum_{k=-N}^{k=+N} \frac{sen(k\omega_c)}{k\pi} f_{(n-k)}\sigma(k,N) \tag{51}$$

Onde $\sigma(k,N)$ é o fator de controle do fenômeno de Gibbs. Algumas funções janela comuns são descritas posteriormente, como em HAMMING (1989).

O WRF permite a utilização de nove diferentes funções janela (1-Blackman, 2-Dolph, 3-Dolph-Chebyshev, 4-Hamming, 5-Kaiser, 6-Lanczos, 7-Potter, 8-Recursiva e 9-Uniforme), cada uma com suas especificidades. Porém, SKAMAROCK et al. (2005) e ASHRAFI; AZADI; SABETGHADAM (2011) destacam que a abordagem relacionada à janela de Dolph-Chebyshev apresenta os melhores resultados.

Neste trabalho, serão avaliadas todas as funções janela disponibilizadas pelo modelo, como forma de verificar a superioridade da janela de Dolph-Chebyshev. Além disso, será apresentada a construção da referida função janela e uma breve descrição das outras disponíveis.

A função a ser descrita foi construída com base nos polinômios de Chebyshev e, usada pela primeira vez por Dolph em 1946 no desenvolvimento de uma antena de

rádio com características direcionais ótimas (LYNCH, 1997).

Segundo HÄRTER; SILVEIRA; BONATTI (2010), define-se a função em termos da frequência ω por:

$$H(\omega) = \frac{T_{2M}[x_0 cos(\frac{\omega}{2})]}{T_{2M}(x_0)} \tag{52}$$

Quando $x_0 > 1$, a parada de banda ou frequência de corte é ω_s de forma que $x_0 cos(\frac{\omega}{2}) = 1$. Como ω varia de 0 a ω_s, $H(\omega)$ cai de 1 para $r = \frac{1}{T_{2M} x_0}$. Para $\omega_s \leq \omega \leq \pi$, $H(\omega)\, \epsilon\, [-r, +r]$. Com esta formulação, $H(\omega)$ é o filtro passa-baixa, com uma frequência de corte $\omega = \omega_s$. T_{2M} deriva dos polinômios de Chebyshev, definidos pela equação 53:

$$T_n(x) = \begin{cases} cos(ncos^{-1}x), & \text{se} \quad |x| \leq 1, \\ cosh(ncosh^{-1}x), & \text{se} \quad |x| > 1. \end{cases} \tag{53}$$

Das relações trigonométricas $T_0(x) = 1$, $T_1(x) = x$ e $T_n(x) = 2xT_{n-1} - T_{n-2}(x)$, se $n \geq 2$. Pela definição dos polinômios de Chebyshev, o filtro passa-baixa $H(\omega)$ pode ser escrito como uma expansão finita:

$$H(\omega) = \sum_{n=-M}^{M} h_n e^{(-in\omega)} \tag{54}$$

E os coeficientes h_n do filtro são obtidos pela transformada inversa de Fourier:

$$h_n = \frac{1}{N}\left[1 + 2r \sum_{m=1}^{M} T_{2M}\left(x_0 cos\left(\frac{\omega_m}{2}\right)\right) cos(m\omega_n)\right] \tag{55}$$

Quando $|n| \leq M$, a ordem do filtro é $N = 2M + 1$ e $\omega_m = \frac{2\pi m}{N}$. Uma vez que $H(\omega)$ é real, h_n também é real, de modo que $h_{-n} = h_n$. Sistematicamente, esta propriedade reduz o custo computacional do filtro . Os parâmetros x_0 e r são dados por $\frac{1}{x_0} = cos\left(\frac{\omega_s}{2}\right)$ e $r = \frac{1}{T_{2M}(x_0)}$, desde que $T_k = \frac{1}{2}\left[\left(x + \sqrt{x^2 - 1}\right)^k + \left(x - \sqrt{x^2 - 1}\right)^k\right]$.

3.4 As oscilações de Gibbs

Segundo NAZARI et al. (2008), se considerarmos uma função f de período $2L$, onde f e f' são contínuas por partes, a série de Fourier que aproxima f, converge pontualmente para os pontos onde não há descontinuidade. Entretanto, nos pontos de descontinuidade, não se observa o mesmo. Gibbs estudou a convergência da série de Fourier nas proximidades destes pontos, vindo a identificar uma perturbação, que ficou conhecida como fenômeno ou oscilações de Gibbs.

Estas oscilações, em modelos numéricos de previsão de tempo, por apresentarem ondas de diferentes frequências em sua solução, como ondas de Rossby, de gravidade e acústicas, tendem a amplificar-se no domínio, durante a integração do modelo, mascarando movimentos meteorológicos importantes e degradando a previsão (HARTER,

1999).

Para exemplificar o que ocorre, é apresentado graficamente a aproximação da função salto por somas parciais de suas respectivas séries de Fourier. Tal análise possibilita a observação dos critérios de convergência, especialmente o fenômeno de Gibbs.

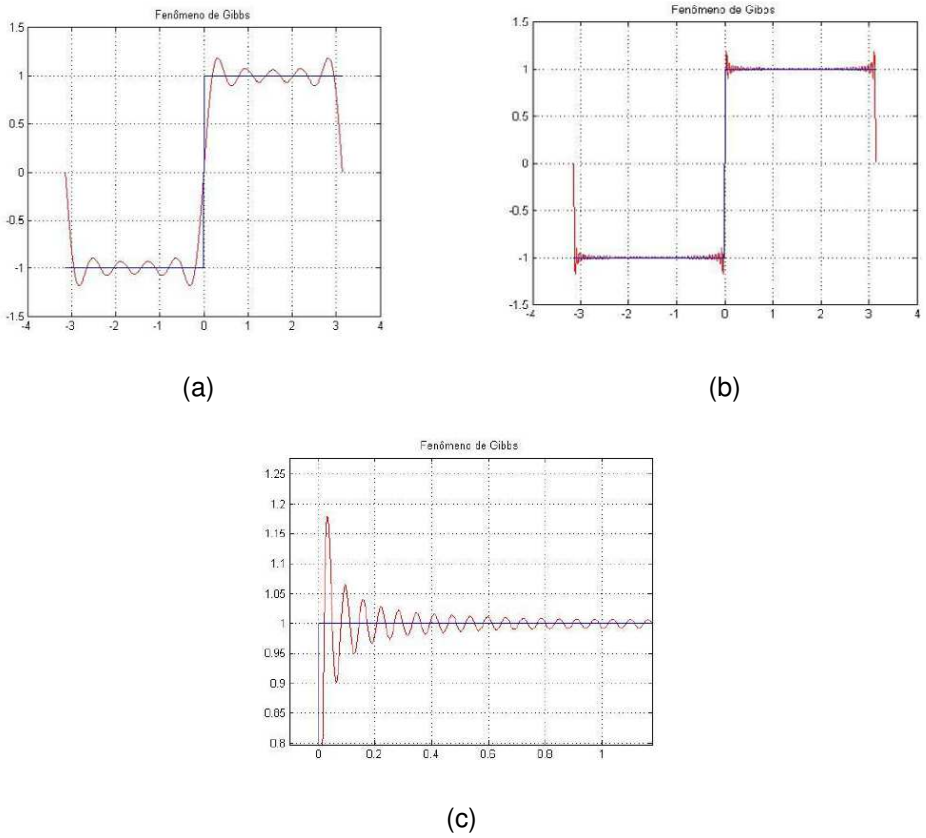
Assim, definimos a função salto como uma $f(x)$ de forma que:

$$f(x) = \begin{cases} -1, & \text{se} \quad -\pi < x < 0, \\ 1, & \text{se} \quad 0 < x < \pi. \end{cases} \tag{56}$$

Especificamente, para esta função, a soma parcial de Fourier é:

$$S_N(x) = \sum_{k=1}^{N} \frac{2}{\pi} \left[\frac{1-(-1)^k}{k} \right] sen(kx) \tag{57}$$

A figura 5 apresenta graficamente as somas parciais de Fourier para a função salto. Em (a), temos a soma de 10 termos (N = 10). Já em (b), observa-se o que ocorre com o incremento do número de termos (N = 100) e em (c) demonstra-se a aproximação em uma das extremidades da função. Por meio da figura, fica claro o aparecimento das oscilações de Gibbs.



(a) (b)

(c)

Figura 5: Oscilações de Gibbs verificadas na função salto: (a) Função salto com N = 10; (b) Função salto com incremento de termos, N = 100 e (c) Detalhe em *zoom* de uma das extremidades da função salto.

Fonte: NAZARI et al. (2008)

3.5 Funções janela implementadas no WRF

Nessa seção, serão descritas de forma sucinta as funções janela implementadas no WRF. Salienta-se que, nesse trabalho, realizou-se a avaliação da referida superiodade da função janela de Dolph-Chebyshev, descrita na seção 3.3. Nesse sentido, as funções janela implementadas no WRF são:

1) Blackman

A janela de Blackman é definida como:

$$w[n] = \begin{cases} 0,42 - 0,5cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right) + 0,08cos\left(\frac{4\pi n}{M-1}\right), & \text{se} \quad 0 \leq n \leq M, \\ 0, & \text{se} \quad diferente. \end{cases} \tag{58}$$

Esta função janela possui uma atenuação maior na banda de rejeição e por outro lado, a zona de transição se alarga.

2) Dolph

O efeito da função janela de Dolph é similar ao da janela de Hamming, executando uma melhor atenuação para altas frequências. A variável *r* define a taxa de ondulação (*ripple*). A principal característica dessa janela está em manter mínima a largura do lóbulo principal.

$$w[n] = \begin{cases} rT_{2M}\left[x_0 cos(n/2)\right], & \text{se} \quad -M \leq n \leq M, \\ 0, & \text{se} \quad diferente. \end{cases} \tag{59}$$

3) Dolph-Chebyshev

Como descrito na seção 3.3, a função janela de Dolph-Chebyshev de tamanho 2M+1 tem a seguinte expressão:

$$w[n] = \begin{cases} \frac{1}{2M+1}\left[\frac{1}{\gamma} + 2\sum_{k=1}^{M} T_k\left(\beta cos\frac{k\pi}{2M+1}\right) cos\frac{2nk\pi}{2M+1}\right], & \text{se} \quad -M \leq n \leq M, \\ 0, & \text{se} \quad diferente. \end{cases} \tag{60}$$

Onde γ é a razão entre a amplitude do lóbulo lateral e a amplitude do lóbulo principal, β é descrito pela equação 61 e T_k é o polinômio de Chebyshev de ordem k definido na equação 62:

$$\beta = cosh\left(\frac{1}{2M} cosh^{-1}\frac{1}{\gamma}\right) \tag{61}$$

$$T_k(x) = \begin{cases} cos(kcos^{-1}x), & \text{se} \quad |x| \leq 1, \\ cosh(kcosh^{-1}x), & \text{se} \quad |x| > 1. \end{cases} \tag{62}$$

4) Hamming

A janela de Hamming deriva da janela de Hann:

$$w[n] = \begin{cases} 0,5 - 0,5cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right), & \text{se} \quad 0 \leq n \leq M, \\ 0, & \text{se} \quad diferente. \end{cases} \tag{63}$$

Foi projetada de forma a unir uma boa atenuação na banda de rejeição (cararcterística da janela de Hann) e minimizar o maior lóbulo secundário da janela de Hann, distribuindo sua energia para os demais lóbulos secundários.

$$w[n] = \begin{cases} 0,54 - 0,46cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right), & \text{se} \quad 0 \leq n \leq M, \\ 0, & \text{se} \quad diferente. \end{cases} \tag{64}$$

5) Kaiser

Em casos específicos, onde é necessário o emprego de uma janela ajustável, foram desenvolvidas funções que fornecem controle sobre a ondulação por meio de um parâmetro ajustável, sendo β esse parâmetro e $I_0(\beta)$ a função de Bessel de ordem zero.

$$w[n] = \begin{cases} \frac{I_0\left[\beta\sqrt{1-\left(\frac{n}{M}\right)^2}\right]}{I_0(\beta)}, & \text{se} \quad -M \leq n \leq M, \\ 0, & \text{se} \quad diferente. \end{cases} \tag{65}$$

6) Lanczos

A janela de Lanczos é baseada na função *sinc* ao invés de *cossenos* como nas outras janelas à seguir. Esta é suficientemente grande para se estender pelos dois lóbulos do filtro passa-baixa ideal, ou seja, uma segunda função *sinc*.

$$w[n] = \begin{cases} \frac{sen\left(\frac{n\pi}{N}\right)}{\frac{n\pi}{N}}, & \text{se} \quad 0 \leq |n| \leq N, \\ 0, & \text{se} \quad diferente. \end{cases} \tag{66}$$

7) Potter

A janela de Potter, também conhecida como janela Flat Top, é caracterizada como uma soma de cossenos e utilizada para fins de calibração. Possui largura de banda aproximadamente 2,5 vezes maior que a da janela de Hanning.

$$w[n] = \begin{cases} A_0 - A_1 cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + A_2 cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) - A_3 cos\left(\frac{6\pi n}{N-1}\right) + A_4 cos\left(\frac{8\pi n}{N-1}\right), & \text{se} \quad 0 \leq n \leq N, \\ 0, & \text{se} \quad diferente. \end{cases} \tag{67}$$

Onde $A_0 = 1$, $A_1 = 1,93$, $A_2 = 1,29$, $A_3 = 0,388$ e $A_4 = 0,028$.

8) Recursiva

A função janela recursiva advém da transformada de Laplace, sendo necessário mapear o plano s no plano z, preservando as propriedades de filtragem. O parâmetro de ordem N ou número de pólos da janela, é responsável pelo decaimento ou não da solução transitória da referida função, ou seja, quanto maior a ordem de N, maior o decaimento da solução transitória.

$$w[s] = \frac{\sigma^N}{(s+\sigma)^N} \tag{68}$$

Onde s é a frequência complexa (esse parâmetro origina-se da transformada de Laplace) e $\sigma = \sqrt{\frac{1}{(2^{\frac{1}{N}}-1)}}$, quando a frequência de corte $\omega_c = 1$. Uma transformação bilinear, que mapeia o plano s no plano z é dada por $s = \frac{1}{\mu_c}\left[\frac{z-1}{z+1}\right]$, onde $\mu_c = tan(\theta_c/2)$, com $\theta_c = \omega_c \Delta t$.

9) Uniforme

A janela uniforme, também chamada de janela retangular, é pouco utilizada, principalmente em aplicações como as deste trabalho. Mas pode ser útil quando precisa-se que o ganho da função seja um valor fixo, como a unidade. Esta janela tem a seguinte expressão:

$$w[n] = \begin{cases} 1, & \text{se} \quad n = 0, 1, ..., M-1, \\ 0, & \text{se} \quad diferente. \end{cases} \tag{69}$$

3.6 Estratégias de integração implementadas no WRF

O *solver* dinâmico ARW do WRF suporta três estratégias de integração diferentes, para gerar as séries temporais filtradas: *Digital Filter Launch* (DFL), *Diabatic Digital Filter Initialization* (DDFI) e *Twice Digital Filter Initialization* (TDFI).

A estratégia DFL (LYNCH; HUANG (1994)) gera as séries temporais por meio de integração para frente, com todos os parâmetros físicos e difusivos habilitados (integração diabática para frente), a partir do ponto inicial ($t = 0$) por 2N *time steps* (intervalos de tempo). A filtragem inicia-se no ponto inicial ($t = 0$) e o ponto de partida da previsão situa-se em N *time steps*.

Para gerar as séries temporais, a estratégia DDFL (HUANG; LYNCH (1993)) inicia com uma integração adiabática para trás, partindo do ponto inicial ($t = 0$) até -N *time steps*. Em seguida, o esquema executa uma integração diabática para frente (com todos os parâmetros físicos e difusivos habilitados) de -N até N *time steps*, durante a qual ocorre a filtragem. O início da previsão situa-se no mesmo ponto inicial ($t = 0$). Na integração adiabática para trás são desabilitados os parâmetros físicos e difusivos.

Já a estratégia TDFI (LYNCH; HUANG (1994)) envolve duas aplicações do filtro digital. Inicia-se com uma integração adiabática para trás, do ponto inicial ($t = 0$) até -2N *time steps*, durante a qual a primeira filtragem é aplicada. Em seguida, inicia-se em -N uma integração diabática para frente (com todos os parâmetros físicos e difusivos habilitados) até N *time steps*, durante a qual a segunda filtragem é aplicada. Da mesma forma que no esquema DDFI, a previsão inicia-se em ($t = 0$) e na integração adiabática para trás são desabilitados os parâmetros físicos e difusivos. A figura 6 demonstra as três estratégias de integração descritas.

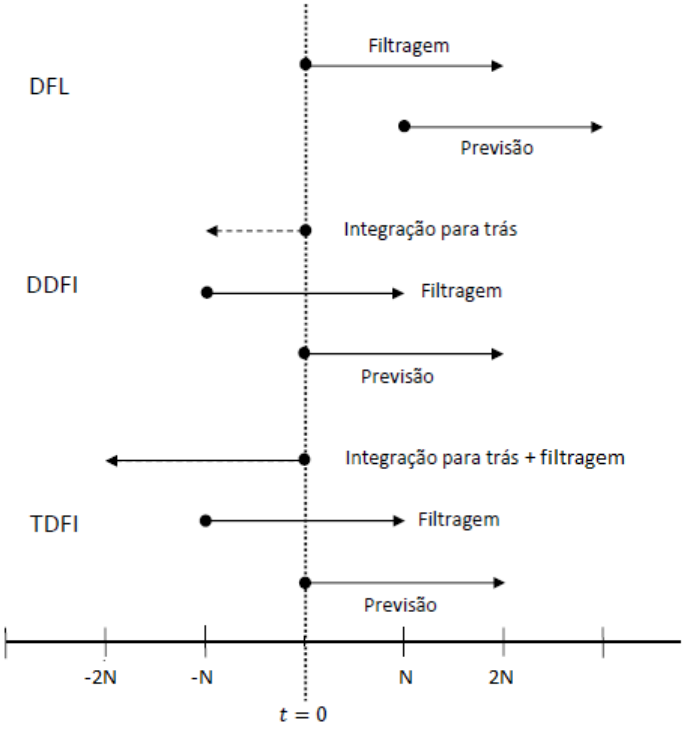


Figura 6: Estratégias de integração implementadas no WRF.
Fonte: Adaptado de SKAMAROCK et al. (2005)

3.7 Caso de 03/01/2014

A análise sinótica é feita por meio dos produtos gerados no CPTEC baseados nas análises do NCEP de 1° de resolução e nas imagens do satélite GOES-13 no canal infravermelho termal realçado, referenciados neste texto, a partir deste parágrafo, como INPE-CPTEC-GPT. Posteriormente, na seção 4, verifica-se se o WRF simulou os sistemas identificados no produto do CPTEC.

Na imagem realçada do GOES-13 das 06 e 12 UTC do dia 03/01/2014 (figura 7 (a-b)) observa-se a formação de nuvens frias e com topo alto estendendo-se do RS ao oceano Atlântico Sul, onde apresentam curvatura ciclônica. Estas nuvens com potencial de precipitação deslocam-se de sudoeste para nordeste, sendo que às 18 UTC do dia 03/01/2014 e 00 UTC do dia 04/01/2014 encontram-se sobre Santa Catarina e sul do Paraná (figura 7 (c-d)), sugerindo possibilidade de precipitação nestes estados.

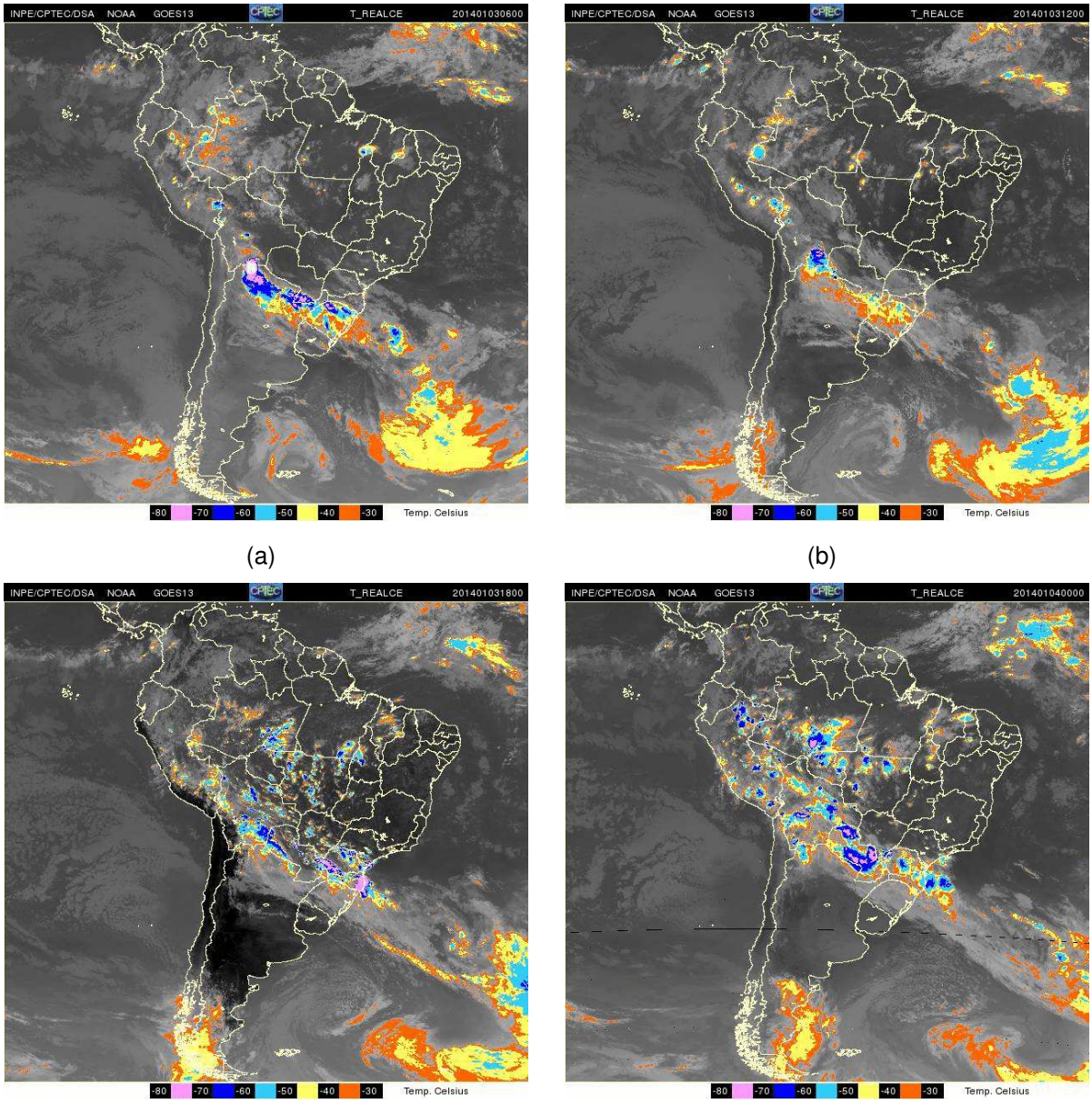


Figura 7: Imagem realçada do satélite Goes-13, no canal infra-vermelho termal às: (a) 06 UTC (03/01/2014); (b) 12 UTC (03/01/2014); (c) 18 UTC (03/01/2014) e (d) 00 UTC (04/01/2014).

Fonte: www.cptec.inpe.br

A figura 7 mostra a configuração atmosférica às 06, 12 e 18 UTC do dia 03/01/2014 e 00 UTC do dia 04/01/2014. Os campos a esquerda, na figura 8, referem-se à superfície (a) e em 500 hPa (c) e os campos a direita, referem-se a 850 hPa (b) e 250 hPa (d), respectivamente.

Embora a área de interesse neste trabalho seja o Atlântico Sul e RSB, descreve-se o panorama de grande escala sobre o Brasil, para situar o leitor sobre os sistemas sinóticos que provocam as mudanças de tempo no período de estudo.

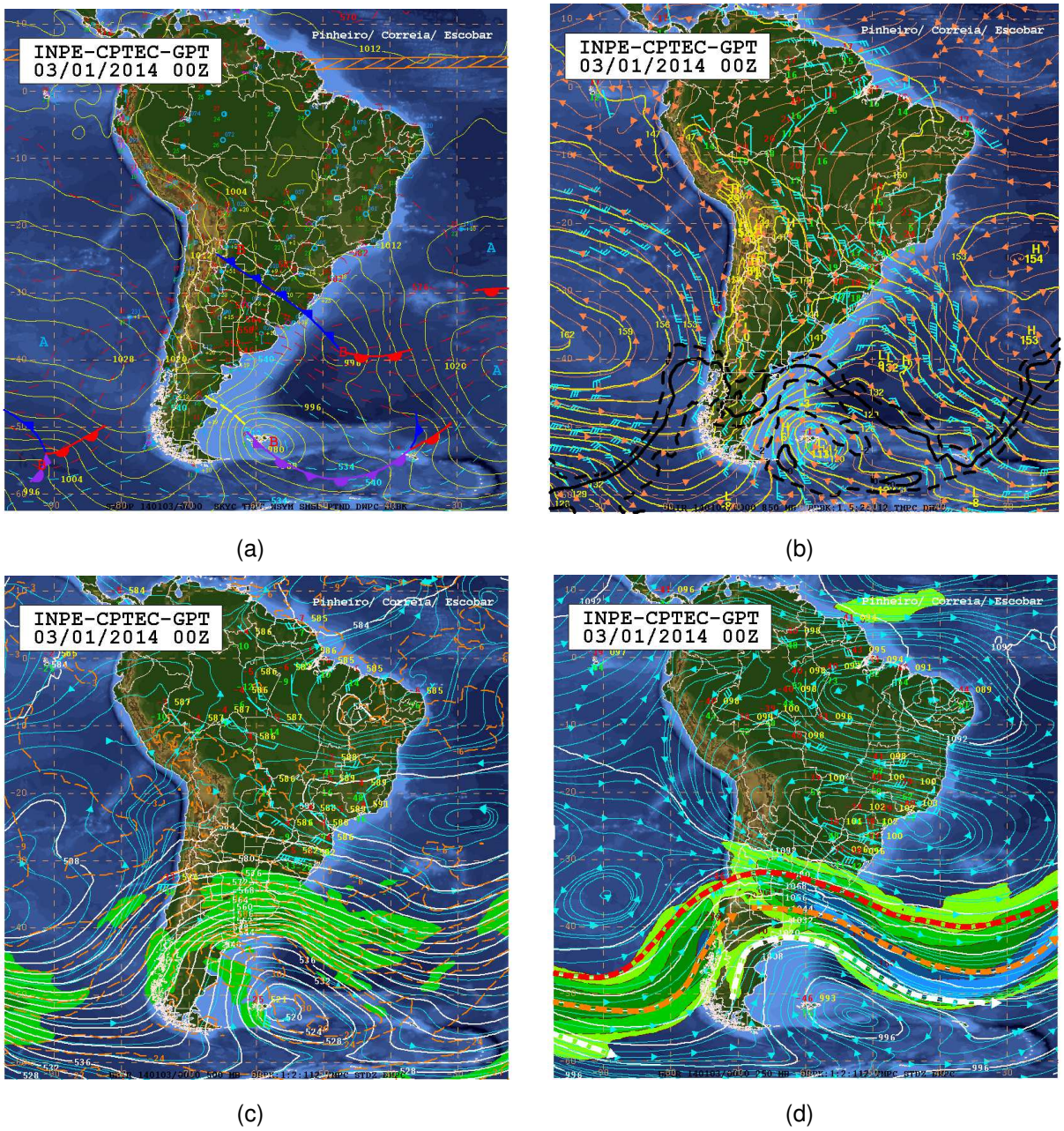


Figura 8: Produto INPE-CPTEC-GPT às 00 UTC (03/01/2014): (a) Carta de superfície; (b) Carta de altitude - 850 hPa; (c) Carta de altitude - 500 hPa e (d) Carta de altitude - 250 hPa.

Fonte: www.cptec.inpe.br

Na figura 8 (a), observa-se basicamente a zona de convergência intertropical, importante mecanismo de precipitação nas regiões norte e nordeste do Brasil, tangenciando a região norte do país. Observa-se também, a alta subtropical do Pacífico Sul e um sistema de baixa pressão em $53°$S/$58°$W. Particularmente importante para este estudo, é a presença do ciclone extratropical, com centro de 996 hPa, no Atlântico Sul, a sudeste do RS, especificamente em $40°$S/$47°$W, associada a uma frente fria com ramo frio adentrando o RS e um cavado inclinado para oeste em 250 hPa.

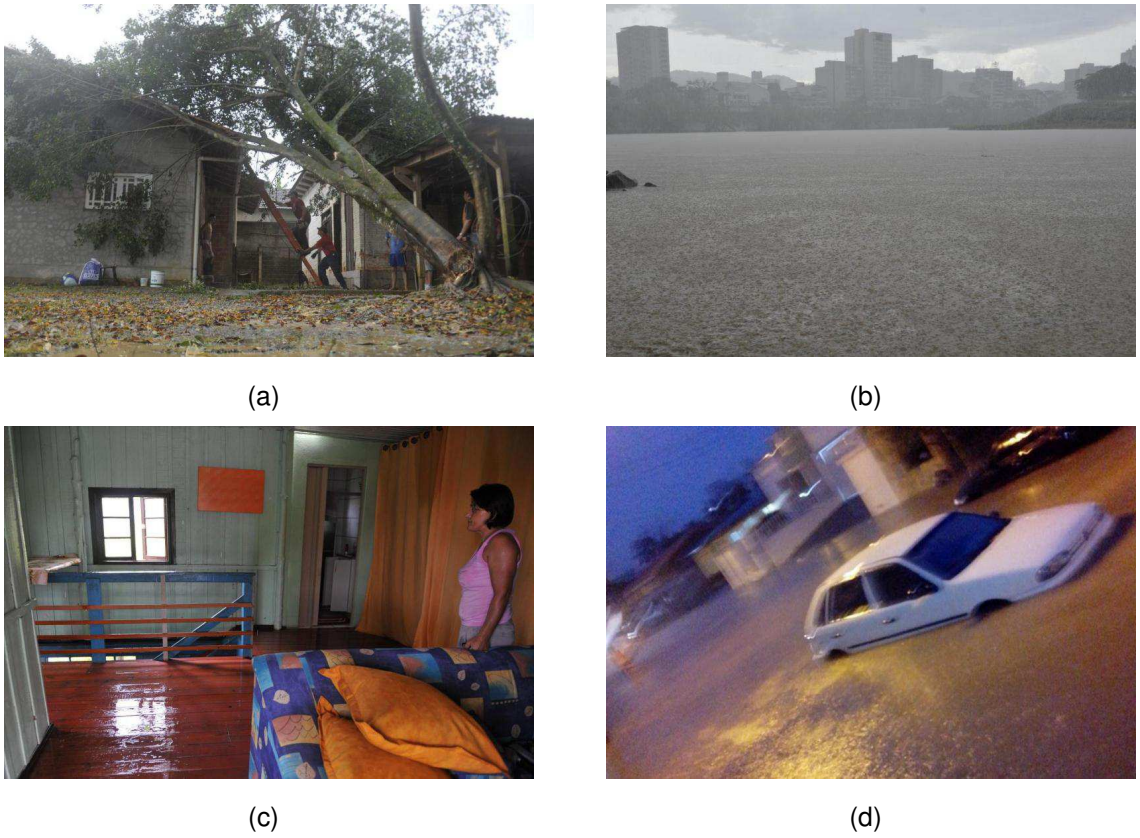
Em 850 hPa, figura 8 (b), destaca-se o jato de baixos níveis, que transporta calor e umidade da Amazônia para o sul do país e alimenta a instabilidade no sul do RS.

Nos níveis médios, 500 hPa, figura 8 (c), observa-se o escoamento zonal com um cavado pronunciado, segundo as linhas de geopotencial (brancas no mapa). Este cavado está associado à advecção de vorticidade relativa ciclônica, convecção e precipitação no seu lado leste. A inclinação do eixo do cavado em relação à baixa em superfície mostra que o sistema é baroclínico, semelhante aos identificados por GAN; RAO (1991).

Os campos em altos níveis (250 hPA - figura 8 (d)) mostram o jato subtropical (JS) (linha vermelha grossa tracejada) e o jato polar (JP) (linha laranja grossa tracejada). Esta região de ventos fortes migra em direção a latitudes mais baixas à medida que o ar frio entra no continente e, por esta razão auxilia na previsão de propagação de frentes frias. Quando posicionado em latitudes inferiores a 30°S, evita que o escoamento de norte desviado pelos Andes transporte ar quente e úmido da floresta amazônica para a RSB. No caso em questão, o jato não migra para norte o suficiente para impedir que o escoamento de norte chegue a RSB. Esta observação é confirmada pelo campo de linha de corrente (linha contínua azul), que mostra o jato de baixos níveis transportando calor e umidade de norte para sul do país.

Em síntese, a análise mostra um caso clássico de CE estudada por SINCLAIR (1995), formada na região em análise. O ciclone está associado à formação de uma frente fria que se propaga de oeste para leste segundo uma onda de Rossby, numa atmosfera baroclinicamente instável.

As consequências desta ciclogênese foram os fortes ventos e as altas taxas de precipitação conforme reportado nos jornais e mostrado na figura 9 (a-d).



(a) (b)

(c) (d)

Figura 9: Fotos das consequências da CE ocorrida no dia 03/01/2014, em Santa Catarina.

Fonte: www.dc.clicrbs.com.br

3.8 Domínio de estudo

Para a elaboração das simulações, foi necessário estabelecer a área de estudo e o intervalo de tempo (*time step*) no qual o modelo realiza as integrações. Para tanto, foram definidos dois domínios, prevendo os testes com grades aninhadas. Nesse sentido, foram delimitados um domínio maior, com grade de 27 km e um domínio menor, com grade de 9 km, inserido no domínio maior. Com relação ao *time step*, foram delimitados $180\ s$ para a grade maior e $60\ s$ para a grade menor. Cabe salientar aqui, que o modelo é rodado no modo hidrostático na grade maior e não hidrostático na menor. Os referidos domínios foram caracterizados como domínio 1 e domínio 2 e suas abrangências são exemplificadas na figura 10.

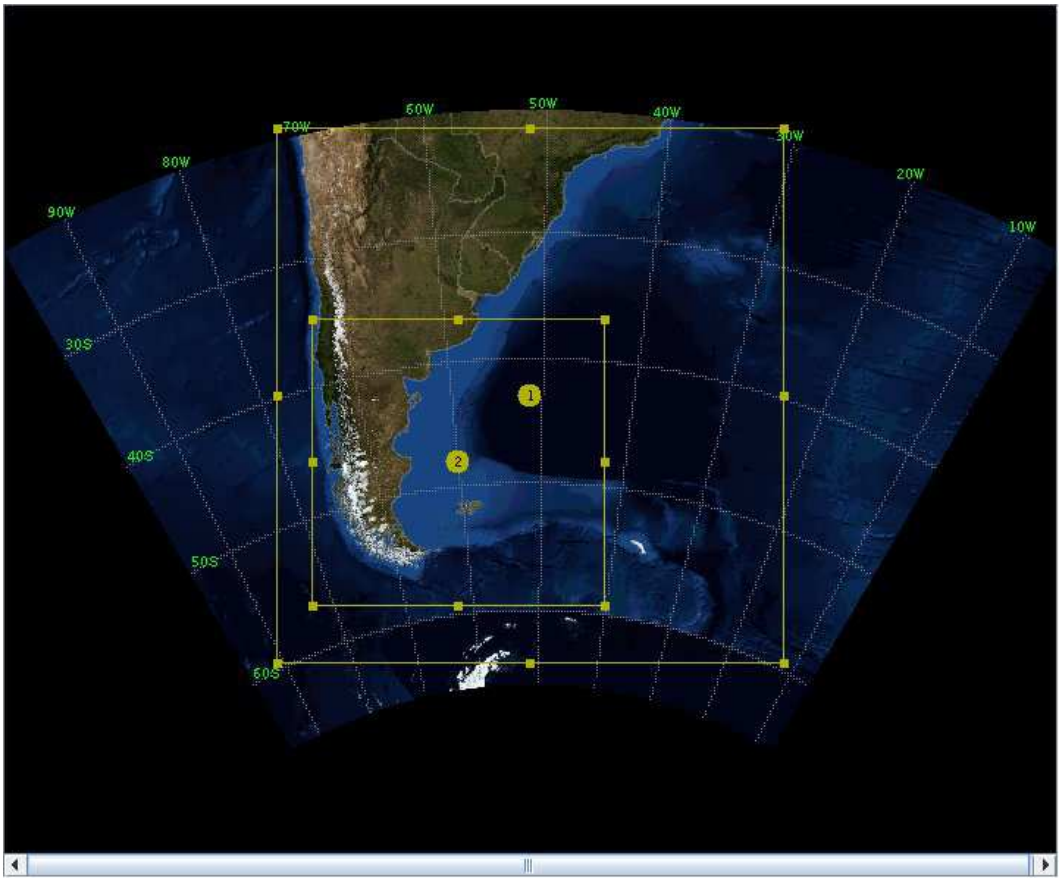


Figura 10: Domínios de estudo: Domínio 1 - grade externa e domínio 2 - grade interna

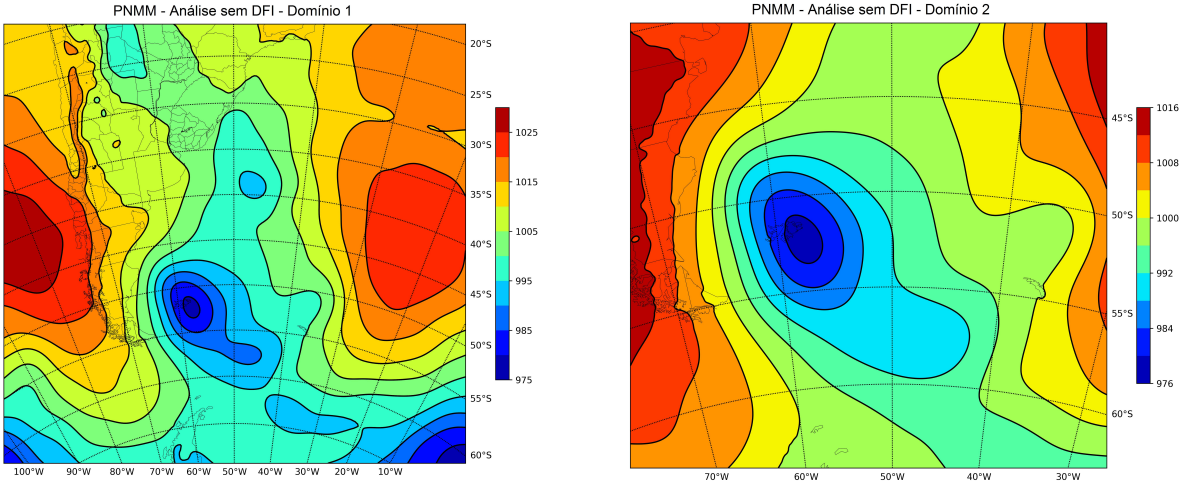
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo avalia-se a performance do método de inicialização proposto. Na seção 4.1, é verificado se a simulação reproduz o cenário sinótico descrito no produto INPE-CPTEC-GPT. Na seção 4.2 investiga-se qual a frequência de corte (FC) será aplicada no filtro. Uma vez definido este importante parâmetro, avalia-se, na seção 4.3, o tamanho da série aplicada no processo de filtragem. Definidas a FC e o tamanho da série, investiga-se na seção 4.4 a função janela que melhor atenua as oscilações de Gibbs. Na seção 4.5 investiga-se diferentes estratégias de integração do modelo para o processo de filtragem. Finalizando o capítulo, na seção 4.6, é avaliado se a inicialização aplicada satisfaz as condições de um esquema da inicialização eficiente, conforme LYNCH; HUANG (1991).

4.1 Simulação do caso sem filtragem digital

Nessa seção, apresenta-se a simulação do caso sem o filtro digital, de forma a verificar se o modelo WRF consegue reproduzir os sistemas sinóticos apresentados pelo produto INPE-CPTEC-GPT em 03/01/2014.

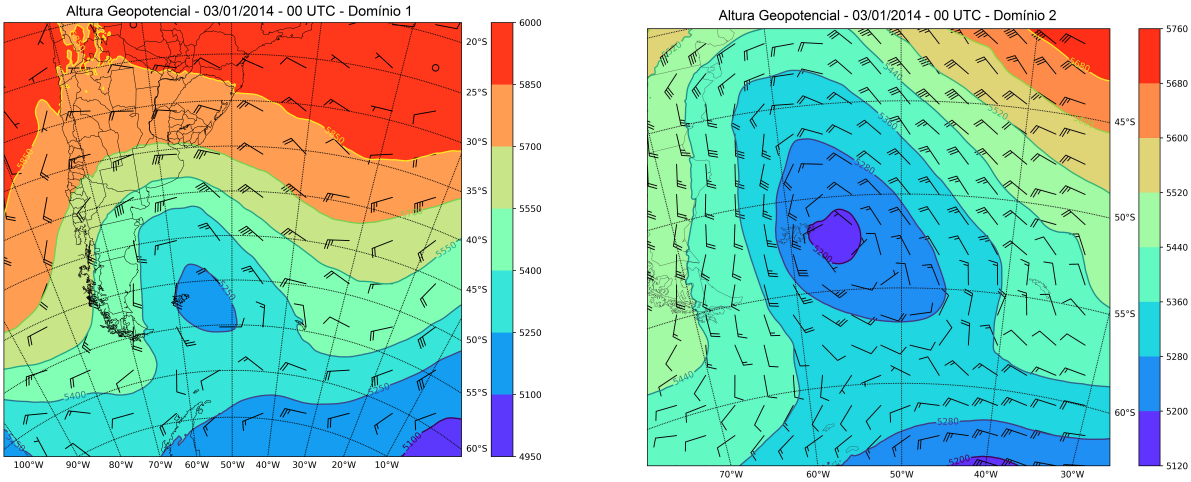
Verifica-se que, no campo de pressão ao nível médio do mar (PNMM) (00 UTC de 03/01/2014), figura 11 (a-b), o WRF reproduz o sistema de baixa pressão em $53°$S/$58°$W com núcleo em 975 hPa no domínio 1 e 976 hPa no domínio 2 e um ciclone extratropical em formação em $40°$S/$47°$W com núcleo em 995 hPa no domínio 1. Ou seja, o sistema de baixa pressão previsto pelo WRF é mais intenso e atrasado (mais ao sul) em relação ao produto INPE-CPTEC-GPT, pressupondo maior advecção de espessura e menor advecção de vorticidade. Com relação ao ciclone extratropical em formação, verifica-se a reprodução quase exata do WRF em comparação com o referido produto. Há necessidade de informar que a advecção de vorticidade é responsável pela propagação do sistema e a advecção de espessura é responsável pela amplificação e decaimento do sistema.



(a) (b)

Figura 11: PNMM (hPa) 00 UTC (03/01/2014) - Análise para o domínio 1 (a) e para o domínio 2 (b).

A circulação ciclônica, evidenciada pelas barbelas do vento, com intenso cavado em altos níves (250 hPa) na região de interesse, confirmam que o modelo WRF reproduz a onda frontal que atingiu o sul da América do Sul e Atlântico Sul, figura 12 (a-b).

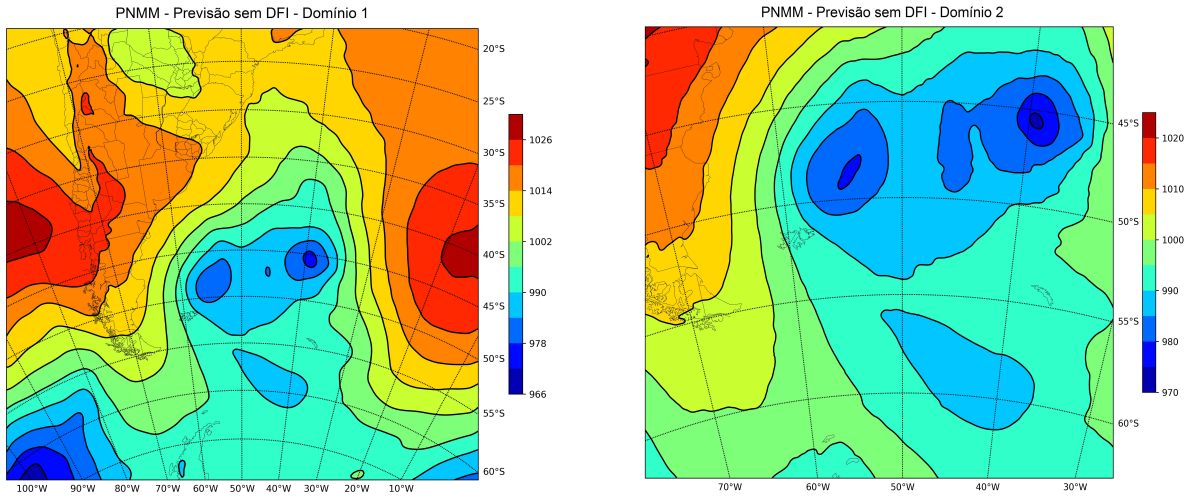


(a) (b)

Figura 12: Geopotencial (mgp) e vetor vento (m/s) 00 UTC (03/01/2014) - Análise para o domínio 1 (a) e para o domínio 2 (b).

Na figura 13 (a-b), o campo de 12 horas de previsão de PNMM confirma o decaimento do centro de baixa do ciclone extratropical em $46°$S/$38°$W com núcleo em 972 hPa no domínio 1 e 970 hPa no domínio 2, e o enfraquecimento do sistema de baixa pressão em $50°$S/$55°$W com núcleo em 978 hPa no domínio 1 e 975 hPa no domínio 2.

Nesse sentido, fica clara a característica explosiva do ciclone extratropical, pois houve a diminuição da PNMM em 23 hPa num período de 12 horas, o que corresponde a $1,15$ $Bergeron$ para a latitude média do deslocamento $(46°)$. Portanto, conclui-se o mesmo que em AVILA; NUNES; ALVES (2016) ou seja, que na verdade o ciclone extratropical em formação é o que possui a característica explosiva e que realmente atingiu a região de interesse e não o sistema de baixa pressão, que encontra-se em fase de enfraquecimento.



(a) (b)

Figura 13: PNMM (hPa) 12 UTC (03/01/2014) - Previsão para domínio 1 (a) e domínio 2 (b).

4.2 Tendência média de pressão absoluta à superfície (TPS)

No intuito de avaliar a aplicação da IFD e sua capacidade em remover oscilações espúrias de alta frequência, verificou-se que o modelo reproduziu os sistemas atuantes no período simulado, evidenciando a ciclogênese no Atlântico Sul, de acordo com AVILA; NUNES; ALVES (2016). Todavia, antes de se aplicar a IFD, faz-se necessário definir os seguintes parâmetros do filtro: frequência de corte (FC), tamanho da série a ser filtrada, função janela e estratégia de integração. Para tal, grafa-se a evolução temporal da tendência média de pressão absoluta à superfície (TPS), variável que fornece o total de ruído integrado na camada sobre o domínio, conforme equação 70.

$$TPS = \left(\frac{1}{IJ}\right) \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} \left| \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{ij} \tag{70}$$

4.3 Investigando a frequência de corte

Definida a variável TPS, avaliou-se a IFD com série de 1 hora para frequências de corte (FC) de 7,5 minutos, 15 minutos, 30 minutos e 1 hora, função janela de Dolph-Chebyshev (DC) e integração TDFI. Observa-se a atenuação na TPS com todas as FC, em comparação ao esquema não inicializado, sendo que a FC de 1 hora apresenta melhor resultado. Este efeito é reproduzido tanto no domínio 1 como no domínio 2, embora no domínio 1 a atenuação tenha sido maior. O resultado desse experimento é mostrado na figura 14 (a-b). Salienta-se que, nos gráficos a seguir, o tempo (em horas h) é plotado no eixo das abscissas e no eixo das ordenadas é plotada a TPS (em hectopascal hPa).

4.4 Investigando o tamanho da série a ser filtrada

Uma vez definida a FC a ser utilizada, explora-se o tamanho da série de variáveis aplicada na filtragem, pois há implicação direta entre o tamanho da série e o custo computacional da IFD. Para tal, realizou-se a simulação com FC de 1 h e séries geradas por 1, 2, 3 e 4 horas de integração, função janela de Dolph-Chebyshev (DC) e integração TDFI. Isso é apresentado na figura 15 (a-b).

Tanto para o domínio 1, como para o domínio 2, verifica-se a atenuação da TPS em todas as séries, em comparação ao esquema não inicializado. Ainda visualiza-se a similaridade da eficiência de todos os tamanhos de série. Entretanto, é demonstrada a superioridade da série de 1 h, por apresentar menores oscilações na TPS e por necessitar de menor custo computacional para ser gerada.

4.5 Investigando as funções janela

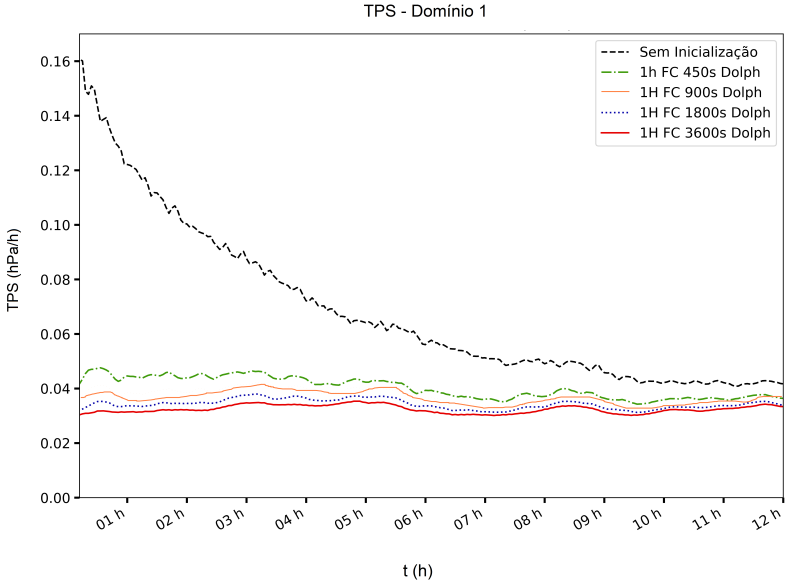
Definidas a FC e o tamanho de série, investiga-se dentre as funções janela implementadas no WRF, qual melhor reduz as oscilações de Gibbs. Nas figuras 16 (a-b), grafa-se para os domínios 1 e 2 respectivamente, as integrações com as funções janelas implementadas no WRF: Blackman; Dolph; Dolph-Chebyshev; Hamming; Kaiser; Lanczos; Potter; Recursiva e Uniforme.

O resultado da simulação demonstrou a eficiência da IFD em todas as funções janela, quando comparamos ao esquema sem inicialização. Entretanto, observa-se a superioridade da função janela de Dolph-Chebyshev, por apresentar menor ruído durante a integração do modelo, nos dois domínios.

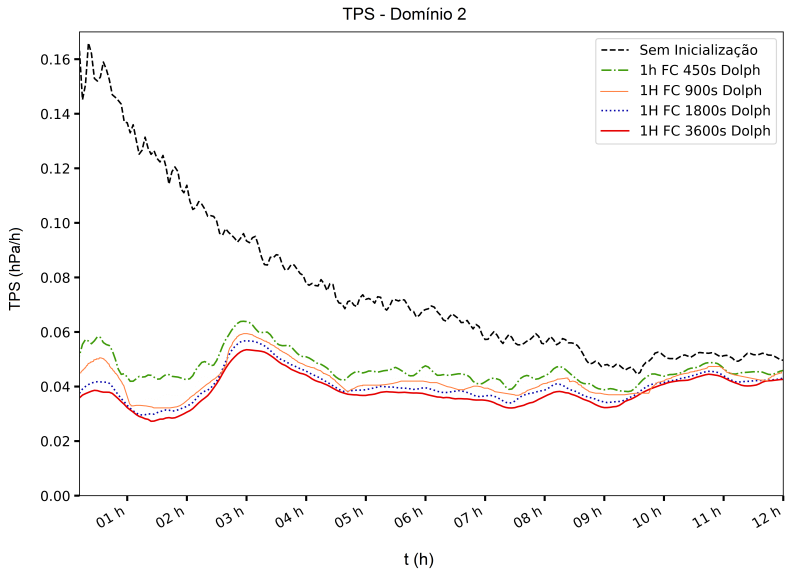
4.6 Investigando a estratégia de integração

Nessa seção, foram testadas as estratégias de integração DFL, DDFI e TDFI, com as definições feitas anteriormente, ou seja, FC de 1 h, série de 1 h e função janela de Dolph-Chebyshev. Os resultados dessa simulação são apresentados na figura 17 (a-b).

Analisando-se os resultados, verifica-se a superioridade das estratégias de integração TDFI e DDFI, em relação ao esquema não inicializado e a estratégia DFL. Entretanto, devido à similaridade de desempenho das estratégias TDFI e DDFI no caso estudado, optou-se em seguir a literatura (ANCELL (2012) e SKAMAROCK et al. (2005)) que indicam a superioridade da estratégia TDFI. Esse resultado é extensivo aos dois domínios estudados.

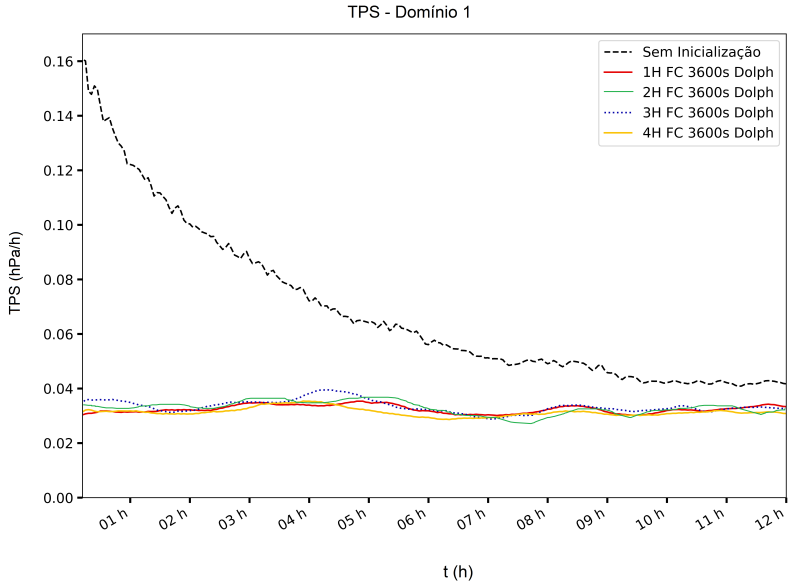


(a) TPS domínio 1

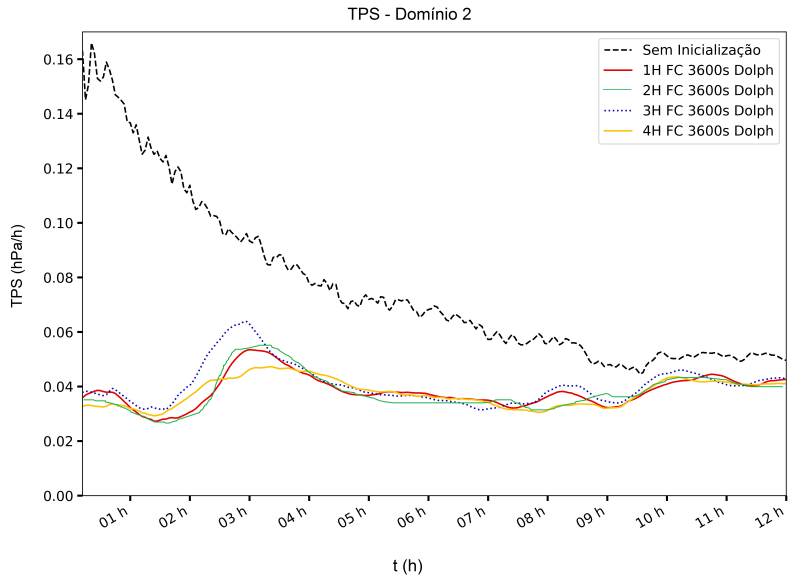


(b) TPS domínio 2

Figura 14: TPS (hPa) - (a-b) domínios 1 e 2 - linha preta tracejada (sem inicialização), linha verde tracejada (FC 7,5 min, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI), linha laranja contínua (FC 15 min, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI), linha azul pontilhada (FC 30 min, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI) e linha vermelha contínua (FC de 1 h, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI).

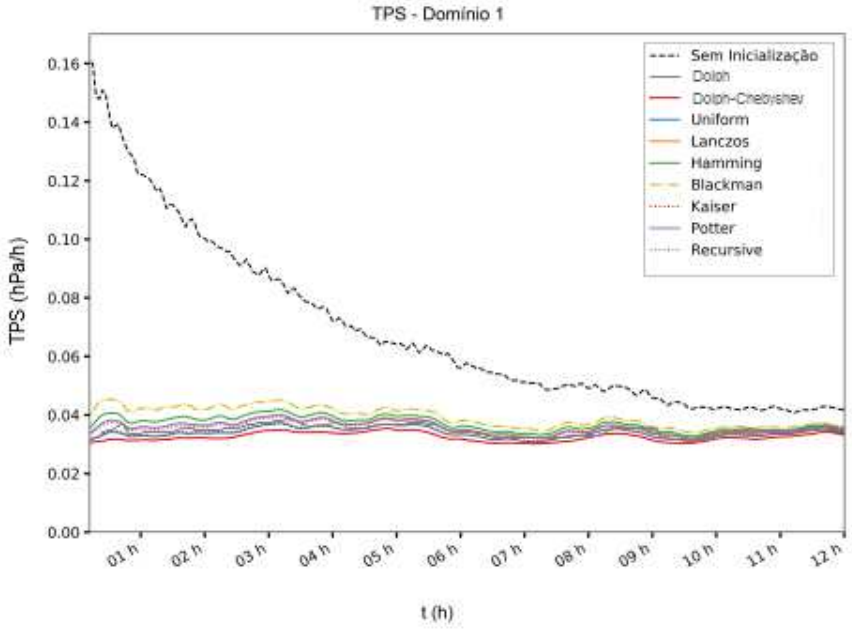


(a) TPS domínio 1

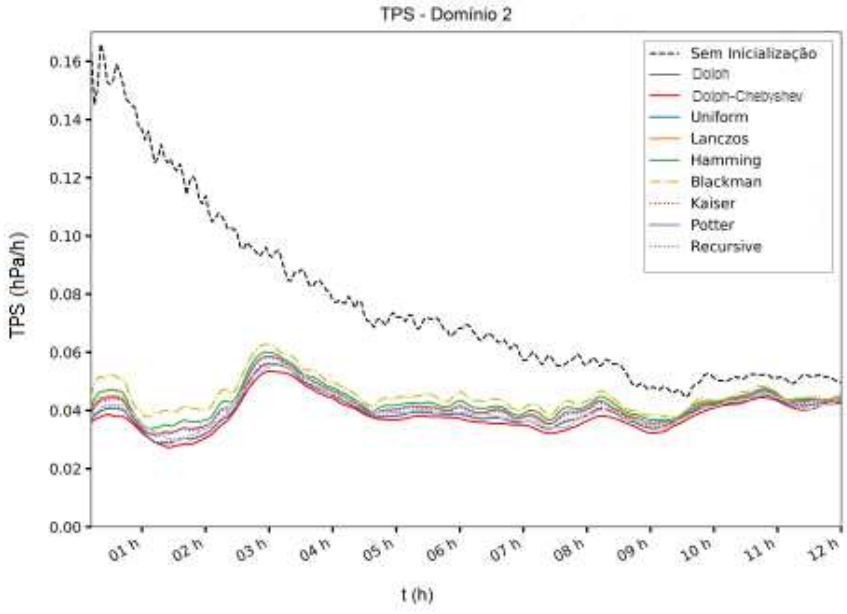


(b) TPS domínio 2

Figura 15: TPS (hPa) - (a-b) domínios 1 e 2 - linha preta tracejada (sem inicialização), linha vermelha contínua (FC 1 h, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI), linha verde contínua (FC 2 h, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI), linha azul pontilhada (FC 3 h, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI) e linha laranja contínua (FC de 4 h, série de 1 h, janela de DC e integração TDFI).

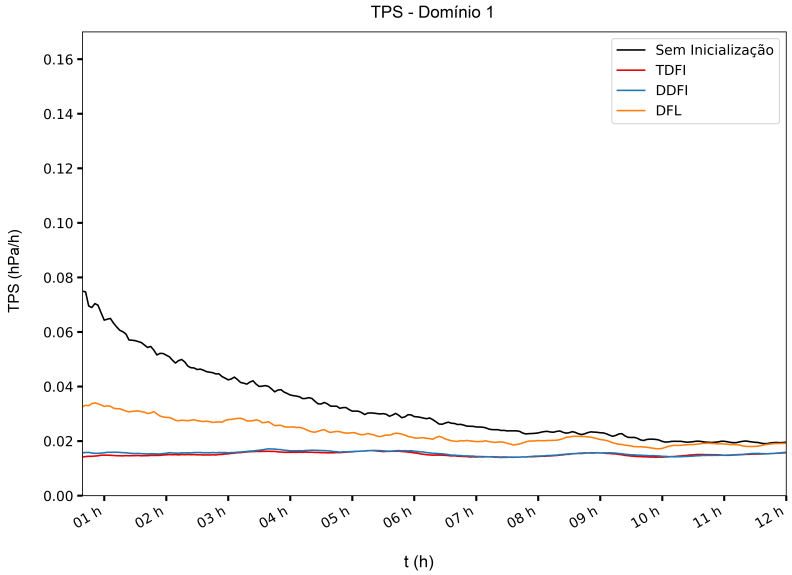


(a) TPS domínio 1

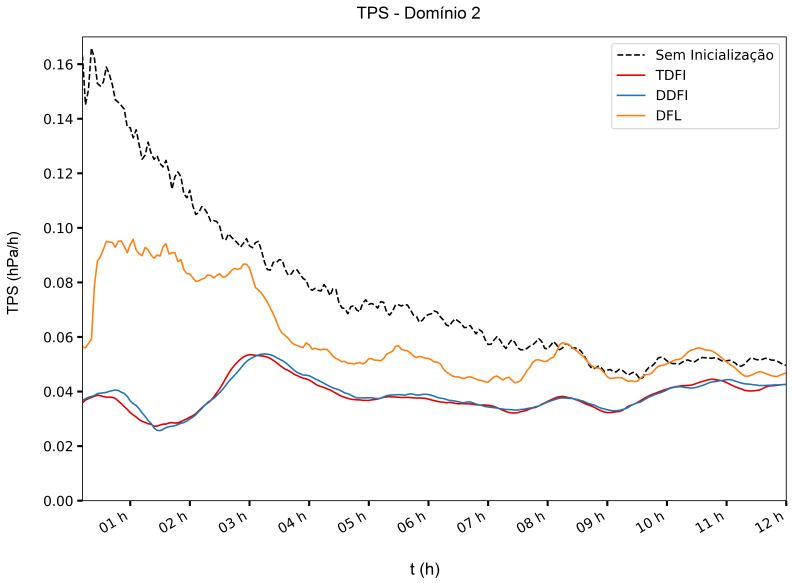


(b) TPS domínio 2

Figura 16: TPS (hPa) - (a-b) domínios 1 e 2 - linha preta tracejada (sem inicialização), linha cinza contínua (Dolph), linha vermelha contínua (Dolph-Chebyshev), linha azul contínua (Uniforme), linha laranja contínua (Lanczos), linha verde contínua (Hamming), linha amarela tracejada (Blackman), linha lilás pontilhada (Kaiser), linha roxa contínua (Potter) e linha marrom pontilhada (Recursiva).



(a) TPS domínio 1



(b) TPS domínio 2

Figura 17: TPS (hPa) - (a-b) domínios 1 e 2 - linha preta tracejada (sem inicialização), linha vermelha contínua (TDFI), linha azul contínua (DDFI) e linha laranja contínua (DFL).

A análise dos resultados das seções 4.3-4.6, permite observar quais parâmetros apresentaram os melhores resultados no modelo WRF, para o caso estudado, sendo eles: (i) frequência de corte de 1 h; (ii) série de 1 h; (iii) função janela de Dolph-

Chebyshev e (iv) estratégia de integração TDFI. Esses parâmetros estão indicados no *namelist dfi control* (ANEXO A).

4.7 Análise da performance da filtragem digital

A análise das seções anteriores subsidiam a conclusão a respeito dos melhores parâmetros para inicializar o modelo WRF: (i) frequência de corte de 1 h; (ii) série de 1 h; (iii) função janela de Dolph-Chebyshev e (iv) estratégia de integração TDFI.

Entretanto, segundo LYNCH; HUANG (1991), um sistema de inicialização eficiente deve apresentar três características essenciais:

(i) remove oscilações de alta frequência da previsão;

(ii) não degrada a previsão e

(iii) as mudanças feitas nos campos iniciais são aceitavelmente pequenas.

Nesse sentido, para avaliar as três características essenciais de um sistema de inicialização eficiente, foram comparados os campos de análise e previsão, com e sem IFD, para os dois domínios estudados, cujos resultados são mostrados nas figuras 18 (a-d) e 19 (a-d). Além disso, como os campos nestas figuras são muito parecidos, foram gerados gráficos contendo a subtração entre os campos com e sem IFD, para os dois domínios, o que é demonstrado nas figuras 20 (a-b) e 21 (a-b).

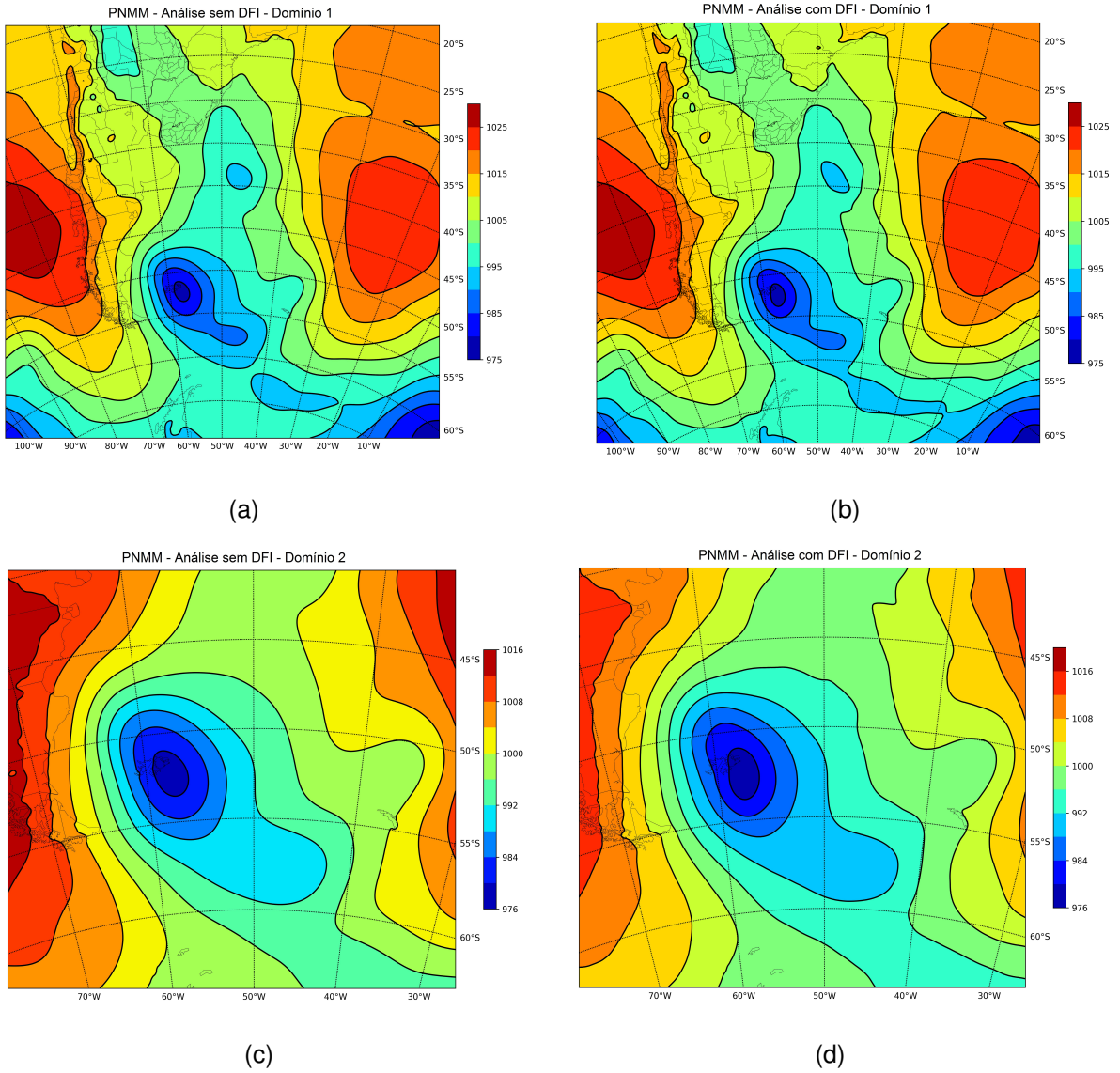
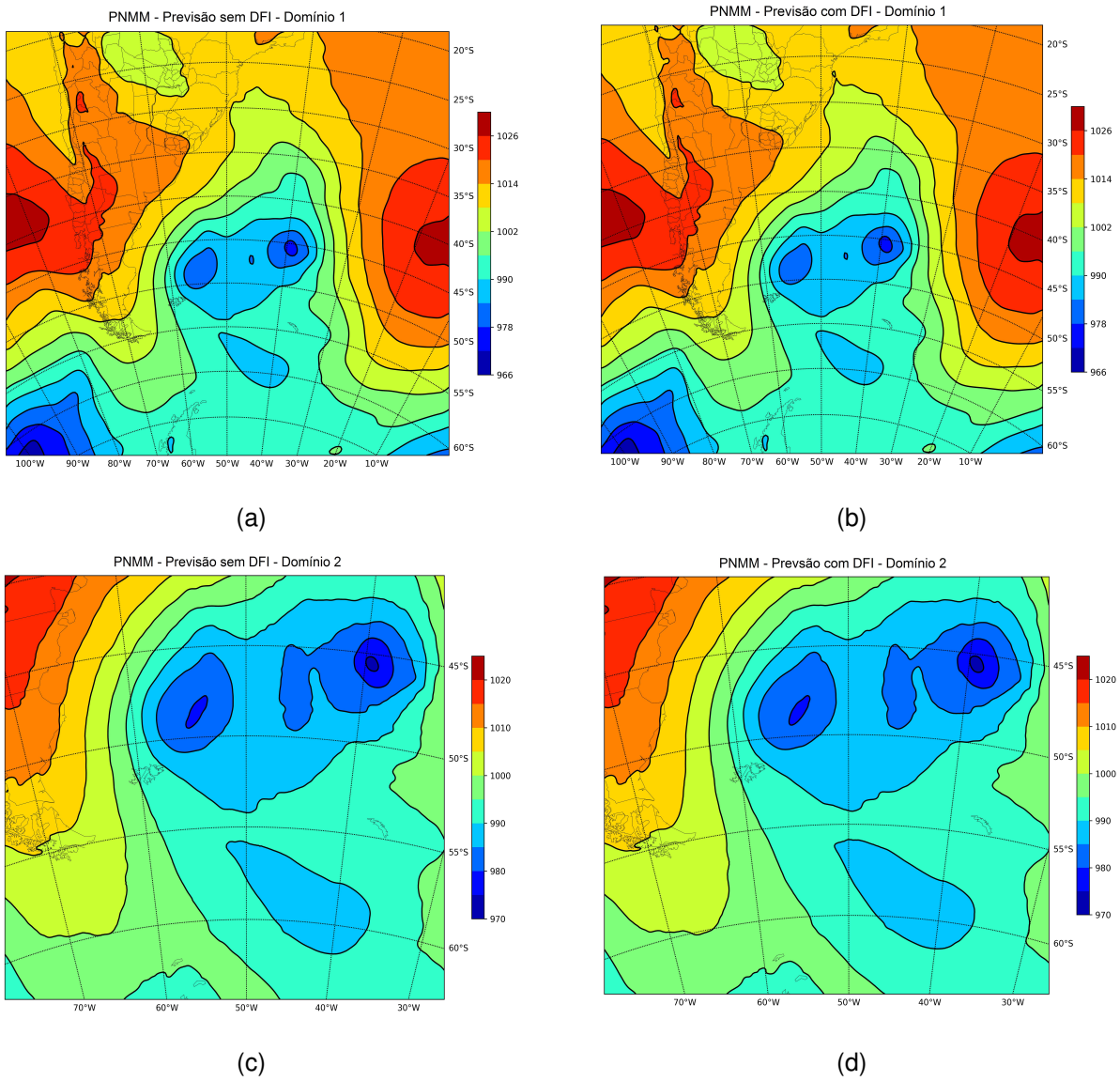
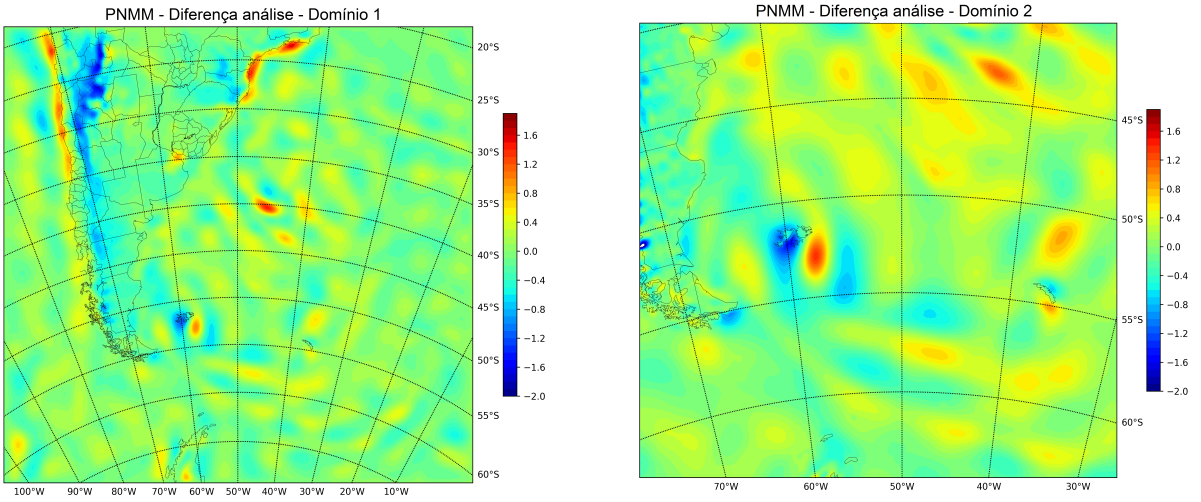


Figura 18: PNMM (hPa) 00 UTC (03/01/2014) - Análise (a) sem IFD - domínio 1; (b) com IFD - domínio 1; (c) sem IFD - domínio 2 e (d) com IFD - domínio 2.



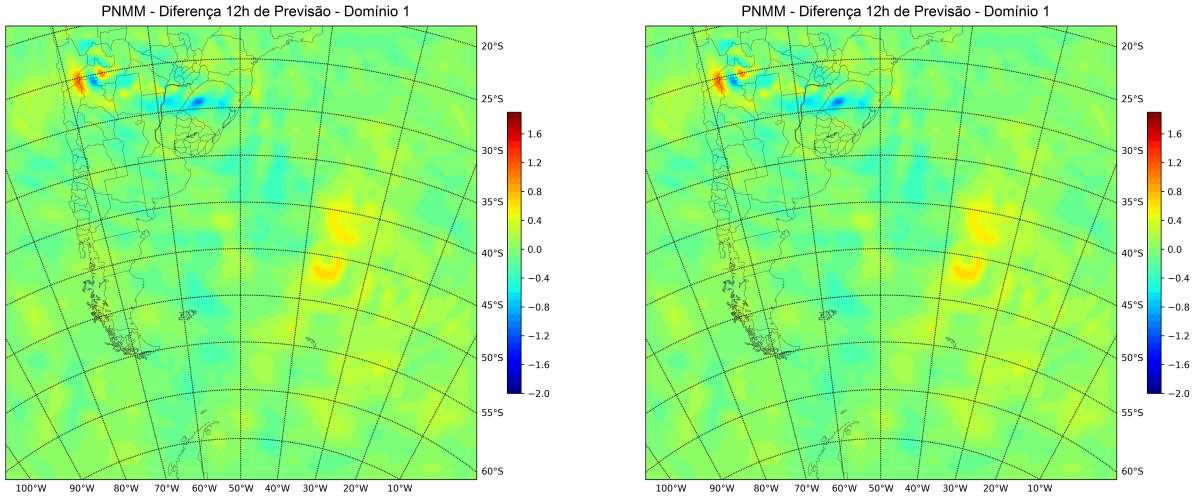
(a) (b) (c) (d)

Figura 19: PNMM (hPa) 12 UTC (03/01/2014) - Previsão (a) sem IFD - domínio 1; (b) com IFD - domínio 1; (c) sem IFD - domínio 2 e (d) com IFD - domínio 2.



(a) (b)

Figura 20: PNMM (hPa) 00 UTC (03/01/2014) - Diferença da análise para domínio 1 (a) e domínio 2 (b).



(a) (b)

Figura 21: PNMM (hPa) 12 UTC (03/01/2014) - Diferença da previsão para domínio 1 (a) e domínio 2 (b).

Primeiramente, a partir dos resultados obtidos com a evolução temporal da variável TPS, verifica-se que a IFD satisfaz a primeira condição essencial para um sistema eficiente, segundo LYNCH; HUANG (1991), pois os níveis de ruído foram atenuados em todas as simulações realizadas.

Com base nos resultados obtidos nas figuras 18 (a-d), 19 (a-d), 20 (a-b) e 21 (a-b), onde foram comparados os campos de PNMM de análise e previsão, com e sem IFD, nos dois domínios e os campos de subtração, também de PNMM de análise e

previsão, com e sem IFD, nos dois domínios, conclui-se que o sistema de inicialização utilizado satisfaz a segunda e terceira condições essenciais para um sistema eficiente, segundo LYNCH; HUANG (1991), pois a previsão não foi degradada e as mudanças feitas nos campos iniciais realmente foram pequenas, permitindo avaliar que o sistema de inicialização utilizado neste estudo é um sistema eficiente, de acordo com os referidos autores.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Modelos numéricos de previsão de tempo apresentam ondas de gravidade de alta frequência nas primeiras horas de integração. Essas ondas de gravidade de alta frequência surgem devido ao desequilíbrio entre os campos de pressão e vento na condição inicial do modelo e tendem a se espalhar pelo domínio. Entre as causas deste desequilíbrio pode-se citar: erro nos dados observados, imperfeição do método numérico que discretiza as equações diferenciais por diferenças finitas, resolução da grade, dificuldade de representar os termos não lineares das equações do modelo e o erro de truncamento em modelos espectrais.

A IFD consolidou-se como a mais eficiente técnica de inicialização para modelos de área limitada. O FD, aplicado às séries temporais do modelo, elimina as oscilações acima da frequência de corte, acelerando o equilíbrio entre os campos de pressão e vento. A IFD, utilizada como sistema de inicialização deve satisfazer as condições de um sistema eficiente: (i) filtrar as ondas de gravidade de alta frequência; (ii) não degradar a previsão e (iii) as mudanças geradas nos campos iniciais devem ser pequenas.

Todavia, na aplicação do FD, surgem oscilações próximas à frequência de corte. Essas oscilações, denominadas oscilações de Gibbs, são causadas pela impossibilidade de trabalhar-se como uma série temporal infinita, ou seja, precisa-se truncar a série. Para corrigir esse problema faz-se o uso de funções janela.

Para avaliar-se a performance da IFD no modelo WRF, propôs-se simular um caso de CE ocorrido em 03/01/2014. Esse caso foi caracterizado por consideráveis perdas materiais no estado de Santa Catarina, causadas por fortes ventos e altos níveis de precipitação.

Portanto, foram feitas simulações para se atribuir os parâmetros ótimos para a aplicação da IFD. Na primeira delas, avaliou-se a capacidade do WRF em reproduzir a CE ocorrida em 03/01/2014, donde concluiu-se que o referido modelo reproduziu satisfatoriamente o sistema de baixa pressão que atingiu o sul da América do Sul e Atlântico Sul e quase exatamente o ciclone extratropical explosivo que atingiu o estado de Santa Catarina, ambos em comparação ao produto INPE-CPTEC-GPT. Nas

simulações seguintes, buscou-se identificar os parâmetros ótimos para a utilização da IFD no WRF. Inicialmente investigou-se a FC, avaliando-se a IFD com série de 1 h para frequências de corte de 7,5; 15; 30 e 60 min, função janela de Dolph-Chebyshev e estratégia de integração TDFI, o que permitiu observar que a frequência de corte de 1 h apresenta o melhor resultado. À seguir, uma vez definida a FC, explorou-se o tamanho das séries temporais, com FC de 1 h, janela de DC, estratégia de integração TDFI e séries geradas por 1, 2, 3 e 4 h. Desta simulação concluiu-se que a série de 1 h apresenta melhor desempenho. Após, definidos a FC e o tamanho de série, investigou-se o desempenho das nove funções janela implementadas no WRF, com estratégia de integração TDFI. A função janela de Dolph-Chebyshev mostrou-se mais eficiente na remoção do ruído. Finalmente, definidos a FC, o tamanho de série e a função janela, analisou-se as três estratégias de integração das séries temporais filtradas implementadas no modelo, levando a concluir que a estratégia TDFI apresenta a melhor performance.

Conclui-se, nesse momento, que o modelo WRF foi capaz de reproduzir a CE com grades aninhadas e a técnica de IFD mostrou-se eficiente em amortecer as oscilações espúrias, como em SMIRNOVA et al. (2009), ASHRAFI; AZADI; SABETGHADAM (2011) e PECKHAM et al. (2016). Ainda conclui-se que o sistema cumpre os requisitos de um sistema de inicialização eficiente, pois filtra as ondas de gravidade de alta frequência, não degrada a previsão e as mudanças geradas nos campos iniciais são pequenas.

Por fim, conclui-se que as principais contribuições deste trabalho são: (i) fornecer, através de experimentação científica, parâmetros de referência para todos os usuários do WRF e (ii) mostrar que a inicialização, aplicada à grade maior, também reduz o ruído gerado na grade menor, porém com menor intensidade, pois a grade menor é gerada com maior interpolação, uma das fontes geradoras de ondas de gravidade rápidas. Como trabalhos futuros deve-se investigar o comportamento da IFD combinada com técnicas de Assimilação de Dados.

REFERÊNCIAS

ANCELL, B. C. Examination of analysis and forecast errors of high-resolution assimilation, bias removal, and digital filter initialization with an ensemble Kalman filter. **Monthly Weather Review**, v.140, n.12, p.3992–4004, 2012.

ASHRAFI, K.; AZADI, M.; SABETGHADAM, S. Effects of various digital filter initialization methods on results of weather research and forecasting (WRF) model. **Iranian Journal of Geophysics**, v.5, n.1, p.16–33, 2011.

AVILA, V. D.; NUNES, A. B.; ALVES, R. C. M. Análise de um Caso de Ciclogênese Explosiva Ocorrido em 03/01/2014 no Sul do Oceano Atlântico (Analysis of an explosive cyclogenesis case occurred in 03/01/2014 on the south of the Atlantic Ocean). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9, n.4, p.1088–1099, 2016.

BJERKNES, J.; SOLBERG, H. **Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation**. Grondahl, 1922.

BRATSETH, A. M. A simple and efficient approach to the initialization of weather prediction models. **Tellus**, v.34, n.4, p.352–357, 1982.

CEDERSKOV, A. **Diabatic nonlinear normal mode initialization for a limited area model**. 1992. Master Thesis — Copenhagen University, Copenhagen.

CHARNEY, J. The use of the primitive equations of motion in numerical prediction. **Tellus**, v.7, n.1, p.22–26, 1955.

COMIN, A. **Sensibilidade às parametrizações físicas do WRF nas previsões dos parâmetros atmosféricos em Shetland do Sul e Deception**. 2012. Dissertação de Mestrado — PPGM/UFSM, Santa Maria/RS.

DAVIES, H. C. Limitations of some common lateral boundary schemes used in regional NWP models. **Monthly Weather Review**, v.111, n.5, p.1002–1012, 1983.

DUDA, M. G. Preliminary testing of digital filtering initialization in AMPS. **National Center for Atmospheric Research**, p.1–3, 2008.

FILLION, L.; MITCHELL, H.; RITCHIE, H.; STANIFORTH, A. The impact of a digital filter finalization technique in a global data assimilation system. **Oceanographic Literature Review**, v.1, n.43, p.15, 1996.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v.119, n.5, p.1293–1302, 1991.

HALTINER, G. J.; WILLIAMS, R. T. **Numerical prediction and dynamic meteorology**. John Wiley & Sons Inc, 1980.

HAMMING, R. W. **Digital filters**. Courier Corporation, 1989.

HARMS, D. E.; RAMAN, S.; MADALA, R. V. An examination of four-dimensional data-assimilation techniques for numerical weather prediction. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.73, n.4, p.425–440, 1992.

HARTER, F. P. **Uso de filtro digital para iniciar um modelo de área limitada**. 1999. Dissertação de Mestrado — PPGM/INPE, São José dos Campos/SP.

HÄRTER, F.; SILVEIRA, R.; BONATTI, G. An assessment of the DFI on DWD-HRM. **Far East Journal of Applied Mathematics**, v.48, p.25–38, 2010.

HUANG, X.-Y.; CEDERSKOV, A.; KÄLLÉN, E. A comparison between digital filtering initialization and nonlinear normal-mode initialization in a data assimilation system. **Monthly Weather Review**, v.122, n.5, p.1001–1015, 1994.

HUANG, X.-Y.; CHEN, M.; WANG, W.; KIM, J.-W.; SKAMAROCK, W.; HENDERSON, T. Development of Digital Filter Initialization for WRF and its implementation at IUM. In: PREPRINTS: 8TH ANNUAL WRF USER'S WORKSHOP, 2007. **Anais...** 2007.

HUANG, X.-Y.; LYNCH, P. Diabatic digital-filtering initialization: Application to the HIRLAM model. **Monthly Weather Review**, v.121, n.2, p.589–603, 1993.

HUANG, X.-Y.; YANG, X. **A new implementation of digital filtering initialization schemes for HIRLAM**. HIRLAM-5 Project, 2002.

INNOCENTINI, V.; CAETANO, E.; HARTER, F. P. A FIRST-GUESS FIELD PRODUCED BY MERGING DIGITAL FILTER AND NUDGING TECHNIQUES (’). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.17, n.2, p.125–140, 2002.

LAPRISE, R. The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. **Monthly Weather review**, v.120, n.1, p.197–207, 1992.

LYNCH, P. Initialization of a barotropic limited-area model using the Laplace transform technique. **Monthly Weather Review**, v.113, n.8, p.1338–1344, 1985.

LYNCH, P. The Dolph–Chebyshev window: A simple optimal filter. **Monthly Weather Review**, v.125, n.4, p.655–660, 1997.

LYNCH, P.; HUANG, X. Initialization of the HIRLAM model using a Digital Filter. **Monthly Weather Review**, v.114, n.8, p.1445–1455, 1991.

LYNCH, P.; HUANG, X.-Y. Diabatic initialization using recursive filters. **Tellus A**, v.46, n.5, p.583–597, 1994.

MACEDO, L. R. **O impacto da técnica de assimilação de dados 3DVAR nos prognósticos do modelo WRF**. 2014. Dissertação de Mestrado — PPGM/UFRGS, Porto Alegre/RS.

MACHENHAUER, B. On the dynamics of gravity oscillations in a shallow water model, with applications to normal mode initialization. **Beitr. Phys. Atmos.**, v.50, p.253–271, 1977.

NAZARI, L. F. et al. Séries de Fourier e o fenômeno de Gibbs. **UFSC**, v.119, n.5, p.1293–1302, 2008.

PECKHAM, S. E.; SMIRNOVA, T. G.; BENJAMIN, S. G.; BROWN, J. M.; KENYON, J. S. Implementation of a digital filter initialization in the WRF Model and its application in the Rapid Refresh. **Monthly Weather Review**, v.144, n.1, p.99–106, 2016.

REPELLI, C. A. **Iniciação dinâmica por modos normais de um modelo barotrópico de área limitada na presença de forçante**. 1991. Dissertação de Mestrado — INPE, São José dos Campos/SP.

SANDERS, F.; GYAKUM, J. R. Synoptic-dynamic climatology of the bomb. **Monthly Weather Review**, v.108, n.10, p.1589–1606, 1980.

SINCLAIR, M. R. A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v.123, n.6, p.1601–1619, 1995.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; WANG, W.; POWERS, J. G. **A description of the advanced research WRF version 2**. DTIC Document, 2005.

SLEIMAN, J. **Veranicos ocorridos na porção noroeste do estado do Rio Grande do Sul entre 1978 e 2005 e sua associação às condições climáticas na atmosfera**. 2008. Dissertação de Mestrado — USP, São Paulo/SP.

SMIRNOVA, T.; PECKHAM, S.; BENJAMIN, S.; BROWN, J. M. Implementation and testing of WRF digital filter initialization (DFI) at NOAA/Earth system research laboratory. **Conference on Weather Analysis and Forecasting**, v.23, n.19, p.10–21, 2009.

ZHU, K.; PAN, Y.; XUE, M.; WANG, X.; WHITAKER, J. S.; BENJAMIN, S. G.; WEYGANDT, S. S.; HU, M. A regional GSI-based ensemble Kalman filter data assimilation system for the rapid refresh configuration: Testing at reduced resolution. **Monthly Weather Review**, v.141, n.11, p.4118–4139, 2013.

ANEXO A *NAMELIST DFI CONTROL*

$dfi\ control$
$dfi\ opt = 3,$
$dfi\ nfilter = 7,$
$dfi\ write\ filtered\ input = .true.,$
$dfi\ write\ dfi\ history = .false.,$
$dfi\ cutoff\ seconds = 3600,$
$dfi\ time\ dim = 3600,$
$dfi\ bckstop\ year = 2014,$
$dfi\ bckstop\ month = 01,$
$dfi\ bckstop\ day = 03,$
$dfi\ bckstop\ hour = 06,$
$dfi\ bckstop\ minute = 00,$
$dfi\ bckstop\ second = 00,$
$dfi\ fwdstop\ year = 2014,$
$dfi\ fwdstop\ month = 01,$
$dfi\ fwdstop\ day = 04,$
$dfi\ fwdstop\ hour = 00,$
$dfi\ fwdstop\ minute = 00,$
$dfi\ fwdstop\ second = 00,$