Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Avaliação da Previsibilidade do Modelo WRF-Hydro em Modelagens Hidrometeorológicas com Diferentes Resoluções na Bacia do Taquari-Antas

Ludmila P. de Souza¹, Rita de C. M. Alves², Gabriel B. Munchow³

¹Doutoranda em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. Autor para correspondência, e-mail: ludmila.pochmann@gmail.com; ²Prof. Dra. em Meteorologia CEPARM, UFRGS, Porto Alegre, Brasil. ³Mestre em Meteorologia, CEPARM, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

Artigo recebido em 02/08/2019 e aceite em 15/12/2019

RESUMO

O presente estudo avalia o modelo WRF-Hydro uma ferramenta de previsão acoplada chuva/solo/vazão, buscando aperfeiçoar o grau de agilidade e confiabilidade das previsões na região considerada de grande vulnerabilidade, a bacia hidrográfica do Taquari-Antas/RS, localizada na região Sul do Brasil. A avaliação consistiu em analisar os resultados e a previsibilidade do modelo com diferentes resoluções espaciais na simulação de evento extremo ocorrido em janeiro de 2010. A primeira simulação foi realizada com duas grades do modelo meteorológico com 50 e 10 km e com a rede de canais com resolução de 1000 m. E a outra com três grades de 25, 5 e 1 km para meteorologia e rede de canais com 250 m. Tais aplicações foram avaliadas usando comparações da magnitude e da variabilidade dos fluxos da superfície da bacia, como precipitação e vazão do modelo com dados observados. Os resultados seguem as observações locais e apresentam boa qualidade, indicando o uso da ferramenta em sistemas de alerta contra cheias nesta e em outras regiões. *Palavras-chave:* previsão numérica, eventos extremos, WRF-Hydro, monitoramento de bacias hidrográficas e modelagem hidrometeorológica.

Predictability of the Wrf-Hydro Model in Hydrometeorological Modeling with Different Resolutions in the Taquari-Antas Basin

ABSTRACT

The present study evaluates the WRF-Hydro model, a rainfall/soil/flow coupled forecasting tool, aiming to improve the agility and reliability of the predictions in the region considered to be of great vulnerability, the Taquari-Antas/RS basin located in the region South of Brazil. The evaluation consisted of analyzing the results and predictability of the model with different spatial resolutions in the extreme event simulation that occurred in January 2010. The first simulation was performed with two grids of the 50 and 10 km meteorological model and with the channel network with resolution of 1000 m. And the other with three grids of 25, 5 and 1 km for meteorology and network of channels with 250 m. Evaluated using comparisons of magnitude and variability of basin surface fluxes, such as precipitation and flow of the model with observed data. The results follow local observations and present good results to serve as a tool in flood warning systems in this and other regions.

Keywords: numerical forecasting, extreme events, WRF-Hydro, hydrological basin monitoring and hydro-meteorological modeling.

Introdução

A maior preocupação com a mudança no clima, é que o aumento de eventos extremos vai ocorrer. Nos últimos anos já se pode observar considerável aumento na incidência de eventos climáticos, causando perdas econômicas e de vidas (Houghton et al., 2001). A infraestrutura social

torna-se cada vez mais sensível às condições de tempo e clima severos (Steffen et al., 2004), que seriam ainda mais exacerbados pelas mudanças previstas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

Especificamente no Estado do Rio Grande do Sul (RS), precipitações pluviais são bem

distribuídas ao longo do ano. Porém, tem sido cada vez mais impactado por eventos meteorológicos severos. Uma região notadamente afetada por processos ambíguos, é o Vale do Taquari, localizado na Região Central do Estado e pertencente a Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (BHTA). Trata-se de uma região densamente povoada e com vasto registro de incidentes de extremos. Há anos, centros de monitoramento e pesquisa como, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e a Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), investem em tecnologias e projetos de monitoramento do volume de chuvas e no acompanhamento da evolução dos níveis dos rios pertencentes a bacia.

Neste âmbito, em apoio à implantação de uma estratégia integrada de prevenção de riscos associados a regimes hidrológicos na BHTA, realizou-se avaliação da utilização do pacote Hydro de extensão hidrológica para o modelo atmosférico WRF (*Weather Research and Forecasting*), que realiza simulações e previsões hidrometeorológicas acopladas.

O WRF-Hydro foi utilizado para simulação de evento extremo ocorrido em 2010 na BHTA para análise de seus resultados com diferentes resoluções espaciais e topográficas em busca de melhor metodologia e novas ferramentas que auxiliem nos prognósticos, alertas e apoio na prevenção de riscos associados podendo ser incorporadas futuramente ao sistema nacional de monitoramento e previsão de desastres extremos no Rio Grande do Sul e no Brasil.

Material e Métodos

Área de estudo

A área de estudo localiza-se na região Sul do Brasil e faz parte da região hidrográfica do Atlântico Sudeste (Figura 1). A BHTA, fica na região nordeste do RS entre as latitudes 28° 10' e 29° 57' S e longitudes 49° 56' e 52° 38' W. Abrangendo uma área de 26.428 Km², incluindo 119 municípios (SEMA, 2010). A bacia mostra regimes torrenciais com escoamentos superficiais rápidos e bruscas variações de vazão, essas

características provocam cheias com situação de inundação com frequência quase anual, ocorrendo eventualmente mais de uma vez no ano. De acordo com os registros históricos, o rio Taquari inundou o Vale do Taquari (região mais baixa da bacia) cerca de 44 vezes no período 70 anos (entre 1940 e 2010). As maiores cheias registradas ocorreram nos anos de 1873, 1912 e 1941 (Ferri e Togni, 2012).

O uso do modelo WRF

O *Weather Research and Forecasting* (WRF) (Skamarock, et al. 2008) é um modelo numérico atmosférico de mesoescala difundido e utilizado mundialmente para fins de pesquisa, ensino e operação de previsão de tempo. Foi desenvolvido através da cooperação de diversas instituições norte americanas, entre elas o *National Oceanic and Atmospheric Administration's* (NOAA), o *National Center for Atmospheric Research's* (NCAR), a Universidade de Oklahoma, *Department of Defense's Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory* (NRL), e *Federal Aviation Administration* (FAA). Pode ser empregado em simulações atmosféricas da escala de dezenas de metros a centenas de quilômetros. Possui dois núcleos dinâmicos: o ARW (*Advanced Research WRF*) e o NMM (*Nonhydrostatic Mesoscale Model*). Nesse estudo foi utilizada a versão ARW, a qual é mais amplamente utilizada e desenvolvida.

O WRF é um modelo de código livre disponível para download no endereço <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/downloads.html>.

WRF-Hydro

Sendo originalmente concebido como uma estrutura de modelo acoplado, projetado para facilitar união do modelo de previsão de tempo WRF e componentes de modelos hidrológicos terrestres (Gochis et al., 2018). O sistema de modelagem WRF-Hydro foi desenvolvido pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) junto a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dentre outros.

Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Taquari-Antas. Fonte: Siqueira, 2015.

O WRF-Hydro permite uma melhor representação de fluxos da superfície da terra e dos processos hidrológicos terrestres relacionados com a redistribuição espacial das águas na superfície, subsolo e de canal em altíssima resolução espacial (tipicamente de 1 km ou menos), utilizando uma variedade de abordagens baseadas na física e conceituais. Sendo tanto uma arquitetura de modelagem hidrológica, bem como uma arquitetura de acoplamento de modelos terrestres com modelos atmosféricos.

Maiores informações sobre o modelo são melhor explicados no guia do usuário do WRF-Hydro (*User's guide* WRF-Hydro v1.0) em: https://ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro/technical-description-user-guide.

Condições iniciais

Inicializou-se o modelo com dados de reanálise climática *Global Forecast System (GFS)*. Os dados geográficos estáticos de topografia, cobertura e uso do solo utilizados são fornecidos pelo *United States Geological Survey (USGS)* do modelo de elevação digital (DEM) da *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. E para delinear a rede de canais de água, canais de fluxo e a ordem do rio utilizou-se uma ferramenta em *Python* disponibilizada pela equipe do WRF-Hydro.

Período de estudo

Foi realizada simulação de evento extremo de cheia brusca da bacia ocorrido entre os dias 03 a 05 de janeiro de 2010, que provocou vendavais intensos, enxurradas, inundações e enchentes em 23 municípios localizados na área de abrangência da BHTA e o nível da régua do Porto de Estrela

chegou a 23,95 m no dia 04/01/2010. Então foi realizada a comparação e avaliação estatística dos dados simulados pelo modelo acoplado (WRF-Hydro) com os dados observados.

Na primeira etapa, o modelo WRF foi configurado com duas grades aninhadas, denominadas d01 e d02. D01 a grade horizontal externa de 24 x 24 pontos e resolução de 50 km. D02 a grade horizontal interna com 36 x 27 pontos e resolução espacial de 10 km. Na Figura 2 são mostradas a abrangência das grades d01 e d02 e denominamos essa primeira simulação de WRF 10 km.

Figura 2. Domínio de simulação WRF 10 km.

Realizado o pré-processamento dos dados e gerado o domínio menor das grades desejadas foi confeccionado o arquivo com os dados de roteamento da rede de canais hidrográficos com resolução de 1000 metros visto a seguir na Figura 3 para simulação WRF 10 km.

Figura 3. Células da grade de canais de fluxo com resolução de 1000 m da simulação WRF 10 km.

Para realização da segunda etapa, que chamamos de WRF 1 km, o modelo foi então configurado com três grades aninhadas, denominadas d01, d02 e d03. Novamente D01 refere-se a grade externa agora com 30 x 30 pontos e resolução de 25 km. D02 a grade horizontal intermediária com 86 x 66 pontos e resolução espacial de 5 km e d03 com resolução fina de 1 km com 226 x 196 pontos. Na Figura 4 são mostradas a abrangência das três grades.

Na Figura 5 ilustra-se o maior detalhamento das redes de drenagem da bacia com resolução de 250 metros gerado para segunda simulação WRF 1 km.

Figura 4. Domínio de simulação WRF 1 km.

Dados meteorológicos observados

Para análise e avaliação do evento extremo simulados foram utilizados dados meteorológicos horários de temperatura (instantânea), umidade relativa do ar, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade do vento de 06 estações meteorológicas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e dados de precipitação de cinco estações pluviométricas (Tabela 1) de administração da ANA (Agência Nacional de Águas).

Para a os resultados de saída do modelo numérico acoplado, foram utilizados dados vazão em metros cúbicos por segundo (m^3/s) médios diários de 11 (onze) estações fluviométricas pertencentes à Agência Nacional de Águas (ANA) apresentadas na tabela 2 e georreferenciadas junto com as estações pluviométricas e do INMET na Figura 6.

Figura 5. Células da grade de canais de fluxo com resolução de 250 m da simulação WRF 1 km.

Tabela 1. Relação e localização das estações meteorológicas (INMET) e pluviométricas (ANA).

Estação	Latitude	Longitude
Bento Gonçalves	-29,16	-51,53
Canela	-29,36	-50,82
Lagoa Vermelha	-28,22	-51,51
Rio Pardo	-29,87	-52,38
Soledade	-28,85	-52,54
Vacaria	-28,51	-50,88
Cotiporã	-29,07	-51,67
Guaporé	-28,84	-51,88
Ilópolis	-28,93	-52,13
Muçum	-29,17	-51,87
Soledade	-28,81	-52,51

Tabela 2. Estações fluviométricas da ANA.

Estação	Latitude	Longitude
Muçum	-29,16	-51,86
Linha Colombo	-28,91	-51,95
Santa Lúcia	-29,12	-51,90
Ponte Jacaré	-29,18	-51,92
Passo do Coimbra	-29,21	-52,16
Passo do Gabriel	-28,80	-50,49
Passo Tainhas	-28,86	-50,45
Passo Velho	-28,54	-51,39
Passo da B.do Guaia.	-28,73	-51,42
Ponte do Prata	-28,67	-51,60
Passo Carreiro	-28,84	-51,83

Figura 6. Estações do INMET e da ANA.

Análises Estatística dos resultados

Para avaliar os dados é utilizado o cálculo do Índice de concordância (d), para idealizar as amplitudes dos resultados estimados (modelo) e

medidos (observado). Este índice varia entre 0 (maior discordância) e 1 (menor discordância).

Também será utilizado o Coeficiente de Correlação (R), que indica a força e a direção do relacionamento linear entre os resultados

calculados pelo modelo e os observados pelas estações de monitoramento. E ainda a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) que é uma medida da diferença entre os valores previstos pelo modelo e os valores efetivamente observados a partir do ambiente que está sendo modelado.

Resultados

Análise sinótica do evento ocorrido de 03 a 05 de janeiro de 2010

De acordo com os registros de eventos extremos da Defesa Civil, entre os dias 03 a 05 de janeiro de 2010 vendavais intensos provocaram enxurradas, inundações e enchentes em 23

municípios localizados na área de abrangência da BHTA como visto na Figura 7.

Esta instabilidade foi reforçada pela atuação de cavados de ondas curtas (áreas de baixa pressão) que atuavam na média e alta troposfera sobre o RS intensificando o levantamento do ar e ocasionando assim a formação de Sistemas Convectivos de Mesoescala que provocaram vendavais intensos, enxurradas, inundações e enchentes em na área de abrangência da BHTA, conforme pode ser observado na imagem do satélite GOES-12 do dia 03/01/2010 as 21:30 Z (Figura 8).

Figura 7. Mapa de municípios pertencentes a Bacia Hidrográfica Taquari-Antas atingidos por chuvas intensas nos dias 03, 04 e 05 de janeiro de 2010. Dados: Defesa Civil do RS.

Figura 8. Imagem do satélite GOES-12 do dia 03/01/2010 as 21:30 Z. Fonte: DSA/CPTEC/INPE.

Simulação com o modelo WRF-Hydro

Simulação das condições meteorológicas

As Figuras 9 e 10 mostram as comparações entre os valores de pressão simulados pelo modelo WRF com resoluções de 10 e 1 km e observados nas estações meteorológicas de superfície do INMET. Os resultados revelam que o modelo simula satisfatoriamente os valores observados de pressão.

Figura 9. Pressão (hPa) observada (linha contínua) e simulada com WRF 10 km (linha pontilhada) nas estações de Bento Gonçalves (azul), Canela

(vermelho), Lagoa Vermelha (verde), Rio Pardo (amarelo), Soledade (roxo) e Vacaria (verde).

As Figuras 11 e 12 apresentam comparações entre os valores observados e simulados de temperatura do ar. Nota-se que o modelo WRF simula satisfatoriamente os valores observados para todo período e resoluções.

Nas Figuras 13 e 14 são apresentadas as comparações entre valores simulados e observados de umidade relativa do ar para as mesmas seis (06) estações meteorológicas de superfície. Mais uma vez, o modelo simula acertadamente os valores observados pelas seis estações em ambas resoluções.

Figura 10. Pressão (hPa) observada (linha contínua) e simulada com WRF 1km (linha pontilhada) nas estações de Bento Gonçalves (azul), Canela (vermelho), Lagoa Vermelha (verde), Rio Pardo (amarelo), Soledade (roxo) e Vacaria (verde).

Figura 11. Temperatura (°C) observada (linha contínua) e simulada com WRF 10 km (linha pontilhada) nas estações Bento Gonçalves (azul), Canela (vermelho), Lagoa Vermelha (verde), Rio Pardo (amarelo), Soledade (roxo) e Vacaria (verde).

Figura 12. Temperatura (°C) observada (linha contínua) e simulada com WRF 1 km (linha pontilhada) nas estações de Bento Gonçalves (azul), Canela (vermelho), Lagoa Vermelha (verde), Rio Pardo (amarelo), Soledade (roxo) e Vacaria (verde).

Nas Figuras 15 e 16 são apresentadas as comparações entre valores simulados e observados de velocidade do vento. Nos gráficos, percebe-se que o modelo simula satisfatoriamente a evolução diurna e os valores observados para todas estações. As variações nos máximos e mínimos simulados quando comparados aos valores observados, podem ocorrer devido aos locais e alturas de instalação dos instrumentos das estações e as barreiras topográficas e físicas existentes e que não são levadas em consideração nos cálculos do modelo.

Figura 13. Umidade (%) observada (linha contínua) e simulada com WRF 10 km (linha pontilhada) nas estações Bento Gonçalves (azul), Canela (vermelho), Lagoa Vermelha (verde), Rio Pardo (amarelo), Soledade (roxo) e Vacaria (verde).

Figura 14. Umidade (%) observada (linha contínua) e simulada com WRF 1 km (linha pontilhada) nas estações de Bento Gonçalves (azul), Canela (vermelho), Lagoa Vermelha (verde), Rio Pardo (amarelo), Soledade (roxo) e Vacaria (verde).

Figura 15. Velocidade do vento (m/s) observada (linha contínua) e simulada com WRF 10 km (linha pontilhada) nas estações de Bento Gonçalves (azul), Canela (vermelho), Lagoa Vermelha (verde), Rio Pardo (amarelo), Soledade (roxo) e Vacaria (verde).

Figura 16. Velocidade do vento (m/s) observada (linha contínua) e simulada com WRF 1 km (linha pontilhada) nas estações de Bento Gonçalves (azul), Canela (vermelho), Lagoa Vermelha (verde), Rio Pardo (amarelo), Soledade (roxo) e Vacaria (verde).

As Figuras 17 e 18 apresentam os valores em graus da variação na direção do vento simulados pelo modelo WRF das seis estações. As figuras mostram que a circulação do vento

simuladas pelo modelo WRF, corroboram com coerência aos valores observados nos locais.

Figura 17. Direção do vento (°graus) observada (linha contínua) e simulada com WRF 10 km (linha pontilhada) nas estações Bento Gonçalves (azul), Canela (vermelho), Lagoa Vermelha (verde), Rio Pardo (amarelo), Soledade (roxo) e Vacaria (verde).

Figura 18. Direção do vento (°graus) observada (linha contínua) e simulada com WRF 1 km (linha pontilhada) nas estações Bento Gonçalves (azul), Canela (vermelho), Lagoa Vermelha (verde), Rio Pardo (amarelo), Soledade (roxo) e Vacaria (verde).

Por fim, dentre as variáveis meteorológicas, a precipitação é a mais difícil de ser prevista através dos modelos numéricos e estatísticos existentes. Sua baixa previsibilidade, ocorre por seu comportamento episódico, ou seja, que varia no tempo e no espaço (Espinosa, 2011).

A descontinuidade espacial e temporal dos mecanismos que controlam a formação da precipitação em cada região tem diferentes fatores, dependendo do local e época do ano. Segundo Carvalho et al. (2002) a verificação de eventos extremos de precipitação em escala regional é uma tarefa complexa. A topografia e a circulação local podem aumentar a atividade de sistemas convectivos de mesoescala, que sob condições ambientais favoráveis podem gerar precipitação intensa e tempo severo em algumas horas. Isto faz com que prever precipitação seja muito complexo (Smith et al., 1996).

São diversos os fatores que contribuem para o cálculo coerente de precipitação acumulada. Mas dentre todas as dificuldades da simulação desta variável relatadas acima, apresentamos a seguir nas figuras 19 a 22 os resultados das simulações do modelo WRF nos valores simulados quando comparados aos observados nas estações meteorológicas do INMET e pluviométricas da ANA.

A análise do gráfico na Figura 19 permite verificar que os maiores valores acumulados de precipitação ocorreram na estação de Soledade no dia 04 de janeiro de 2010 chegando a marca de 221 milímetros. Na simulação com grade de 10 km mesmo acompanhando a evolução gradual da chuva o WRF subestimou esse valor e o máximo para Soledade com resultado de 125,90 mm e para as demais estações os valores foram superestimados neste dia em quase 10% acima do observado.

Figura 19. Precipitação (mm) observada (linha contínua) e simulada com WRF 10 km (linha pontilhada) nas estações Bento Gonçalves (azul), Canela (vermelho), Lagoa Vermelha (verde), Rio Pardo (amarelo), Soledade (roxo) e Vacaria (verde).

Ao se analisar o gráfico para as estações meteorológicas que estão mais ao sul da bacia, percebemos que o WRF alcançou bons resultados para o acumulado do dia 04 de janeiro para Canela, mas para as localidades de Bento Gonçalves e Rio Pardo chegou a ser metade dos valores que o INMET catalogou nessas cidades.

Na simulação de 1 km aconteceu o inverso que na simulação menos detalhada para Soledade. Com menor detalhamento espacial o modelo subestimou o acumulado máximo de chuva no local e quando maior a resolução o WRF então superestimou o valor e ainda para o dia seguinte.

O inverso também ocorreu para as estações sulistas da bacia só que com resultados superiores aos vistos na simulação de menor detalhamento. É visualmente percebido no gráfico figura 20 que o WRF chegou a valores muito próximos dos reais

para Bento Gonçalves, Rio Pardo e Canela. As precipitações de Canela nos dias 07, 10, 13, 17, 19, 22 e 28 de janeiro antes percebidas nas saídas de 10km apenas nos dias 13, 20 e 28 de janeiro são acompanhadas em todo período pelo modelo.

Figura 20. Precipitação (mm) observada (linha contínua) e simulada com WRF 1 km (linha pontilhada) nas estações Bento Gonçalves (azul), Canela (vermelho), Lagoa Vermelha (verde), Rio Pardo (amarelo), Soledade (roxo) e Vacaria (verde).

Os resultados para as estações pluviométricas da ANA comparados aos valores encontrados com WRF são mostrados nas figuras 21 e 22. E de maneira geral o modelo os subestimou na simulação de 10 km e os superestimou na de 1 km.

Ilópolis foi melhor representada na grade maior enquanto Guaporé, Muçum e Soledade na grade de 1 km.

Os índices de concordância (d), apresentaram resultados acima de 0,90 para todas as estações meteorológicas do INMET nas variáveis temperatura, umidade relativa do ar, pressão, velocidade e direção do vento nas duas simulações (WRF 10 km e WRF 1 km). Para precipitação os resultados acima de 0,90 para índice de concordância ocorreu na estação Soledade (WRF 10 km e WRF 1 km), Bento Gonçalves, Guaporé e Muçum na simulação mais detalhada. Não obstante com valores entre 0,7 e 0,8 seguem os resultados de índice de coerência (d) para precipitação simulada em 10 km das estações Bento Gonçalves, Canela, Lagoa Vermelha, Vacaria, Guaporé, Muçum, Soledade (ANA), Ilópolis e Cotiporã. Na grade de 1 km esses mesmos valores são vistos para Rio Pardo, Ilópolis e Cotiporã novamente.

Figura 21. Precipitação (mm) observada (linha contínua) e simulada com WRF 10 km (linha pontilhada) nas estações pluviométricas de Cotiporã, Guaporé, Ilópolis Muçum e Soledade-RS.

Figura 22. Precipitação (mm) observada (linha contínua) e simulada com WRF 1 km (linha pontilhada) nas estações pluviométricas de Cotiporã, Guaporé, Ilópolis Muçum e Soledade-RS.

Correlações quase perfeitas (acima de 0,90) ocorreram em todas as estações para variável pressão atmosférica (P), na temperatura (T) em Bento Gonçalves e Canela e precipitação de 1 km em Guaporé, Ilópolis e Soledade (ANA).

As consideradas correlações fortes (entre 0,7 e 0,9) em todas variáveis meteorológicas de todas estações menos para velocidade do vento de 10 km em Bento, Canela, Lagoa Vermelha e Vacaria.

Os menores valores mais ainda sim indicando correlação fraca aconteceram apenas na variável precipitação de 1 km em Lagoa Vermelha e Soledade (INMET).

Apesar de a análise apresentar menores correlações para velocidade, direção do vento na estação de Bento Gonçalves, os resultados de precipitação são altamente satisfatórios, passando dos 0,80 também na estação de Canela. O valor de concordância dos dados de 0,70 para Vacaria

também é considerado alto para esta variável que conhecidamente é de difícil previsão numérica.

Simulação das condições hidrológicas

As Figuras 23 a 33 são referentes aos valores médios das 09 e 19 GMT (*Greenwich Mean Time*) para o período de 01 a 31 de janeiro de 2010. E mostram os resultados de vazão em metros cúbicos por segundo (m^3/s) simulados pelo modelo WRF-Hydro comparados aos dados observados pelas estações fluviométricas da Agência nacional de Águas (ANA) para as onze (11) localidades distribuídas ao longo da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas.

A área é caracterizada por consideráveis variações topográficas e de uso e cobertura do solo, com áreas rurais e centros urbano-industriais e, também, pela presença de muitos rios. Essas variações do tipo de superfície têm consequências diretas no campo escoamento, gerando acelerações e estagnações em algumas áreas. Na Figura 23 referente a estação fluviométrica de Muçum pertencente a ANA e operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), podemos observar que as simulações do modelo WRF-Hydro (linhas pontilhadas) acompanham o aumento de mais de 3000 m^3/s na vazão do Rio Taquari na madrugada do dia 03 de janeiro para o dia 04 de janeiro, seguindo do dia 05 e diminuindo nos dias 06 à 09 de janeiro. Posteriormente o modelo também acompanha a variação de vazão entre os dias 10 até o dia 16, onde pelos acumulados de precipitação podemos ver um novo aumento na vazão nos dias 16 a 18.

Tabela 3. Análise estatística das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo WRF em 10 e 1km.

Estação	Análise estatística	T 10 km	T 1 km	UR 10 km	UR 1 km	P 10 km	P 1 km	VV 10 km	VV 1 km	DV 10 km	DV 1 km	Prec. 10 km	Prec. 1 km
Bento Gonçalves	d	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,94	0,98	0,98	0,72	0,91
	R	0,82	0,92	0,82	0,79	0,98	0,99	0,38	0,50	0,68	0,68	0,74	0,82
	RMSE	1,04 °C	0,70 °C	3,87 %	6,03 %	11,74 hPa	5,97 hPa	1,44 m/s	1,67 m/s	39,89(°)	36,90 (°)	22,33 mm	19,55 mm
Canela	d	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,94	0,98	0,99	0,77	0,83
	R	0,90	0,93	0,77	0,79	0,98	0,99	0,65	0,80	0,75	0,88	0,56	0,57
	RMSE	1,42 °C	0,94 °C	5,07 %	7,11 %	25,54 hPa	7,32 hPa	1,17 m/s	1,74 m/s	43,14(°)	30,63 (°)	13,91 mm	14,08 mm
Lagoa Vermelha	d	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,98	0,98	0,98	0,70	0,59
	R	0,70	0,73	0,76	0,77	0,97	0,99	0,55	0,68	0,80	0,72	0,45	0,26
	RMSE	1,17 °C	1,08 °C	4,50 %	4,45 %	7,80 hPa	4,87 hPa	1,09 m/s	0,94 m/s	43,76(°)	46,08 (°)	19,45 mm	23,02 mm
Rio Pardo	d	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,98	0,98	0,99	0,53	0,66
	R	0,68	0,74	0,70	0,69	1,00	1,00	0,73	0,80	0,75	0,85	0,63	0,68
	RMSE	1,52 °C	1,42 °C	4,99 %	6,11 %	1,82 hPa	6,72 hPa	1,15 m/s	0,80 m/s	39,29(°)	24,08 (°)	13,94 mm	12,85 mm
Soledade (INMET)	d	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,98	0,98	0,99	0,91	0,51
	R	0,78	0,86	0,78	0,88	0,98	0,99	0,77	0,81	0,76	0,74	0,98	0,33
	RMSE	1,21 °C	0,95 °C	4,44 %	3,57 %	5,91 hPa	1,57 hPa	1,10 m/s	1,02 m/s	39,79(°)	35,35(°)	18,79 mm	62,62 mm
Vacaria	d	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,98	0,97	0,99	0,75	0,70
	R	0,74	0,80	0,78	0,76	0,97	0,99	0,55	0,74	0,70	0,88	0,54	0,52
	RMSE	2,34 °C	0,90 °C	5,61 %	3,70 %	31,11 hPa	2,97 hPa	1,83 m/s	1,08 m/s	50,54(°)	34,31(°)	25,28 mm	15,30 mm
Guaporé	d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,72	0,91
	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,53	0,92
	RMSE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23,05 mm	21,28 mm
Muçum	d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,72	0,92
	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,59	0,85

	RMSE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,02 mm	15,44 mm
Soledade (ANA)	d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,67	0,90
	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,48	0,88
	RMSE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28,96 mm	25,14 mm
Ilópolis	d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,86	0,75
	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,73	0,89
	RMSE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,78 mm	55,02 mm
Cotiporã	d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,72	0,69
	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,50	0,72
	RMSE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,91 mm	27,29 mm

Das onze (11) estações fluviométricas consideradas para este estudo a localizada no município de Muçum/RS e que recebe o mesmo nome do local onde se encontra, é a estação com maior área de drenagem de todas, com 16000 km². Por se tratar de uma grande extensão, deve-se considerar formidáveis os resultados pontuais calculados pelo modelo WRF-Hydro.

Figura 23. Vazão (m³/s) do Rio Taquari, observada (linha contínua cinza), simulada pelo WRF-Hydro com resolução de 1000 m (linha pontilhada azul) e de 250 m (linha pontilhada vermelha) na estação Muçum.

A seguir nas Figuras 24 e 25 apresentamos os resultados de vazão para as estações fluviométricas Linha Colombo e Passo Carreiro localizadas na cidade de Guaporé que fica a uma distância de aproximadamente 200 km de Porto Alegre capital do Estado do Rio Grande do Sul.

No gráfico da estação Linha Colombo observa-se que o modelo novamente que ambas simulações acompanham o aumento e a diminuição do fluxo nos dias subsequentes na vazão do Rio Guaporé quando se inicia o período em que ocorreu o evento extremo no noroeste do Estado. A área de drenagem desta estação é oito (08) vezes menor do que a estação analisada anteriormente.

Nos resultados de vazão da estação fluviométrica Passo Carreiro (Figura 25) pertencentes ao Rio Carreiro com área de drenagem de 1820 km² menor que a estação Linha Colombo que é de 2030 km² o ciclo evolutivo de vazão simuladas novamente acompanham a evolução de cheia e escoamento do rio mas a grade de 1 km obteve melhores resultados quando comparada aos da grade de 250 metros.

Já na estação Santa Lúcia (Figura 26) localizada no município de Doutor Ricardo à 170 km da capital, numa altitude de 46,2 metros e com uma área de drenagem de 2470 km², infelizmente só existem dados observados até o dia 05 de janeiro de 2010, mesmo assim por estar dentro da rede de drenagem composta para simulação deste estudo,

decidiu-se apresentar que o modelo WRF-Hydro com resolução de 1000 metros mais uma vez acompanhou a evolução e diminuição da quantidade de vazão observada na localidade. Com aumento de mais de 800 m³/s entre os dias 03 e 05 de janeiro de 2010. A simulação de 250 metros linha vermelha não obteve os mesmos resultados.

Figura 24. Vazão (m³/s) do Rio Guaporé, observada (linha contínua cinza), simulada pelo WRF-Hydro com resolução de 1000 m (linha pontilhada azul) e de 250 m (linha pontilhada vermelha) na estação Linha Colombo.

Figura 25. Vazão (m³/s) do Rio Carreiro, observada (linha contínua cinza), simulada pelo WRF-Hydro com resolução de 1000 m (linha pontilhada azul) e de 250 m (linha pontilhada vermelha) na estação Passo Carreiro.

Figura 26. Vazão (m³/s) do Rio Guaporé, observada (linha contínua cinza), simulada pelo

WRF-Hydro com resolução de 1000 m (linha pontilhada azul) e de 250 m (linha pontilhada vermelha) na estação Santa Lúcia.

A quarta estação fluviométrica analisada é a estação chamada de Ponte Jacaré (Figura 27) que está na margem do Arroio Jacaré na cidade de Encantado. Este município é conhecido historicamente pelo número sucessivo de enchentes e inundações praticamente em todos os invernos Gaúchos.

Assim como as anteriores, a modelagem com 1000 metros acompanha de maneira satisfatória a evolução e posterior constância nos valores de vazão observada no local.

Figura 27. Vazão (m^3/s) do Arroio Jacaré, observada (linha contínua cinza), simulada pelo WRF-Hydro com resolução de 1000 m (linha pontilhada azul) e de 250 m (linha pontilhada vermelha) na estação Ponte Jacaré.

Na estação Passo Coimbra (Figura 28) que fica no Rio Forqueta no município de Pouso Novo a 162 km de Porto Alegre/RS, mesmo visualmente parecendo que os resultados da saída de menor resolução (linha azul) foram mais próximos aos observados (linha cinza continua), a simulação mais detalhada (250 metros) foi a que obteve os melhores resultados.

Figura 28. Vazão (m^3/s) do Rio Forqueta, observada (linha contínua cinza), simulada pelo WRF-Hydro com resolução de 1000 m (linha pontilhada azul) e de 250 m (linha pontilhada vermelha) na estação Passo Coimbra.

Localizadas no município de Jaquirana, estão as estações Passo Tainhas que monitora o Rio Tainhas com 1120 km^2 e a estação Passo do Gabriel o Rio das Antas. Os resultados são mostrados nas Figuras 29 e 30 e indicam superestimativa de vazão nas duas grades do Rio Tainhas no período 04 e 05 janeiro, enquanto no Rio Antas ficaram bem mais condizentes a observação.

Figura 29. Vazão (m^3/s) do Rio Tainhas, observada (linha contínua cinza), simulada pelo WRF-Hydro com resolução de 1000 m (linha pontilhada azul) e de 250 m (linha pontilhada vermelha) na estação Passo Tainhas.

Figura 30. Vazão (m^3/s) do Rio Antas, observada (linha contínua cinza), simulada pelo WRF-Hydro com resolução de 1000 m (linha pontilhada azul) e de 250 m (linha pontilhada vermelha) na estação Passo do Gabriel.

A segunda maior área de drenagem de todas as estações consideradas neste estudo pertence a estação Passo da Barra do Guaiaveira no Rio Turvo em Protásio Alves/RS com 2820 km^2 . No gráfico da Figura 31 vemos que a simulação mais detalhada (250 metros) obteve melhores resultados. O mesmo ocorre para Ponte do Prata no Rio Prata em Nova Prata/RS (Figura 32).

A última estação é Passo Velho localizada no Rio Turvo no município de André da Rocha/RS com área de drenagem de 547 km^2 e nos resultados vistos na Figura 73 indicam a superestimativa da

vazão na simulação menos detalhada de 1000 metros enquanto a simulação de 250 metros acompanha os valores medidos na localidade entre 14 e 120 m³/s.

Os resultados de uma análise estatística da variável hidrológica [vazão (m³/s)] avaliadas nas Figuras 63 a 73 são apresentados na tabela 4.

Figura 31. Vazão (m³/s) do Rio Antas, observada (linha contínua cinza), simulada pelo WRF-Hydro com resolução de 1000 m (linha pontilhada azul) e de 250 m (linha pontilhada vermelha) na estação Passo da Barra do Guaiaveira.

Figura 32. Vazão (m³/s) do Rio da Prata, observada (linha contínua cinza), simulada pelo WRF-Hydro com resolução de 1000 m (linha pontilhada azul) e de 250 m (linha pontilhada vermelha) na estação Ponte do Prata.

Figura 33. Vazão (m³/s) do Rio Turvo, observada (linha contínua cinza), simulada pelo WRF-Hydro com resolução de 1000 m (linha pontilhada azul) e de 250 m (linha pontilhada vermelha) na estação Passo Velho.

Na simulação de 1000 metros a estação de Muçum foi a que obteve os melhores resultados com 0,97 de concordância e correlação. Seguida da estação Linha Colombo com índice de concordância de 0,73 e correlação forte de 0,92. E das estações Passo Carreiro com 0,82 (d) e 0,79 (R), Santa Lúcia com índice de 0,80 e correlação de 0,74.

Passo do Gabriel e Passo Tainhas mesmo mostrando altos índices de concordância (0,77 e 0,68 respectivamente) tiveram correlação fraca dos resultados com valores de 0,25 e 0,36. Passo da Barra do Guaiaveira, ao contrário, mesmo apresentando forte correlação dos resultados com R=0,84 demonstrou fraco índice de concordância na simulação de 1000 metros. O mesmo ocorreu para estação Ponte do Prata.

Os valores encontrados para estação Ponte Jacaré foram 0,59 o índice de concordância e 0,39 a correlação o que interpretasse como concordância substancial e correlação moderada. As estações Passo Coimbra e Passo Velho foram as que apresentaram os menores resultados, mas ainda assim todos considerados satisfatórios para simulação com menor grau de resolução e detalhamento.

Na análise estatística da simulação de 250 metros, vemos que Muçum novamente foi a que demonstrou maior valor do Índice de concordância entre os valores simulados e observados indicando concordância quase completa entre a observação e a simulação. Seguida de Passo do Gabriel, Ponte do Prata, Passo Tainhas e Linha Colombo todos acima de 0,60 para índice de concordância.

As fortes correlações ocorreram nas estações Ponte Jacaré (0,83), Ponte do Prata (0,80), Passo da Barra do Guaiaveira (0,76), Passo Carreiro (0,74) e Santa Lúcia (0,73). Correlações consideradas moderadas (0,44 até 0,7) são vistas em Muçum, Linha Colombo, Passo Coimbra, Passo do Gabriel e Passo Tainhas. Apenas Passo Velho apresentou fraca correlação.

Para o RMSE a estação Ponte do Prata foi a que indicou menor disparidade entre os valores indicados pela ANA. Os maiores contrastes são vistos na estação de Muçum para simulação de 250 metros. Em resumo todos os resultados estatísticos encontrados para variável vazão foram positivos.

Análise dos fluxos

A fim de realizar uma avaliação se os cálculos do modelo hidrológico foram capazes de gerar um fluxo de vazão ao longo do trajeto dos principais rios (o Rio das Antas e o Rio Taquari),

em uma segunda etapa foram selecionados pontos aleatórios ao longo dos cursos dos dois rios e gerados hidrogramas da variação da vazão em relação ao tempo para as simulações de 1000 e 250 metros.

A Figura 34 mostra os pontos escolhidos para verificação dos valores encontrados na modelagem com resolução de 1000 metros no Rio Antas (em amarelo) e no Rio Taquari (em vermelho). E em sequência as Figuras 35 e 36 mostram os hidrogramas obtidos.

Figura 34. Pontos escolhidos na grade com resolução de 1000 m no Rio Taquari (em vermelho) e no Rio Antas (em amarelo).

Tabela 4. Análise estatística da variável hidrológica simulada pelo modelo WRF-Hydro.

Estação	Análise estatística	Vazão 1000 m	Vazão 250 m
Passo do Coimbra	d	0,46	0,58
	R	0,23	0,78
	RMSE	293,93 m ³ /s	227,44 m ³ /s
Muçum	d	0,97	0,79
	R	0,97	0,62
	RMSE	389,68 m ³ /s	923,76 m ³ /s
Ponte Jacaré	d	0,59	0,14
	R	0,39	0,83
	RMSE	150,89 m ³ /s	103,68 m ³ /s
Santa Lúcia	d	0,80	0,04
	R	0,74	0,73
	RMSE	208,73 m ³ /s	308,51 m ³ /s
Linha Colombo	d	0,73	0,77
	R	0,92	0,67
	RMSE	531,17 m ³ /s	329,01 m ³ /s
Passo Tainhas	d	0,68	0,64
	R	0,36	0,39
	RMSE	31,77 m ³ /s	28,91 m ³ /s
Passo Carreiro	d	0,82	0,47
	R	0,79	0,74
	RMSE	101,09 m ³ /s	131,94 m ³ /s
Passo do Gabriel	d	0,77	0,83
	R	0,25	0,55
	RMSE	59,28 m ³ /s	58,77 m ³ /s
Passo da Barra do Guaiaveira	d	0,30	0,30
	R	0,84	0,76
	RMSE	790,57 m ³ /s	90,48 m ³ /s
Ponte do Prata	d	0,25	0,66

Passo Velho	R	0,67	0,80
	RMSE	135,63 m ³ /s	11,27 m ³ /s
	d	0,30	0,39
	R	0,22	0,29
	RMSE	200,06 m ³ /s	35,33 m ³ /s

Vemos na Figura 35 que quando a vazão do ponto 1 chega ao seu máximo, posteriormente ocorre o mesmo no ponto 2 e assim sucessivamente para os demais pontos, indicando que o pacote hydro respeita e representa coerentemente a evolução no tempo do fluxo de vazão do Rio Taquari. O mesmo é visto na Figura 36 para o Rio Antas.

Figura 35. Hidrograma de vazões dos pontos escolhidos na grade com resolução de 1000 m no Rio Taquari.

Igualmente ao realizado para simulação de 1000 metros, foram selecionados pontos aleatórios na grade de 250 metros e suas localizações são vistas a seguir (Figura 37).

Essa avaliação apenas ilustrativa foi feita também pois deve-se levar em conta que os rios

(que nada mais são do que um amplo corpo d'água em movimento, confinado em um canal principal) constituem os agentes mais importantes no transporte de diversos sedimentos das áreas elevadas para as mais baixas e dos continentes para o mar. Grandes cargas dissolvidas são transportadas na mesma velocidade da água, e podem ser transportadas indefinidamente ou se agregarem aos sedimentos de fundo (Emilio, 2016). E da mesma forma que na grade maior, os pontos selecionados na grade de 250 m acompanham o processo gradativo de um ponto ao outro e são apresentados os hidrogramas nas Figuras 38 e 39 a seguir.

Figura 36. Hidrograma de vazões dos pontos escolhidos na grade com resolução de 1000 m no Rio Antas.

Figura 37. Pontos escolhidos na grade com resolução de 250 m no Rio Taquari (em vermelho) e no Rio Antas (em amarelo).

Figura 38. Hidrograma de vazões dos pontos escolhidos na grade com resolução de 250 m no Rio Taquari.

Figura 39. Hidrograma de vazões dos pontos escolhidos na grade com resolução de 250 m no Rio Antas.

Conclusões

O entendimento da relação entre sistemas atmosféricos e os eventos hidrometeorológicos causadores de eventos extremos é fundamental para auxiliar o poder público na elaboração de medidas preventivas, planejamento de ações futuras e gestão dos territórios. Neste escopo, o estudo das condições meteorológicas bem como a previsão de curto prazo da formação desses fenômenos, são indispensáveis, e podem fornecer informações valiosas aos meteorologistas e agentes operacionais, gerando impactos importantes e positivos na detecção antecipada destes fenômenos tendo em vista o enorme potencial de danos que podem causar as atividades humanas.

A partir das análises elaboradas neste trabalho, pode-se concluir primeiramente que o principal fator para ocorrência de valores impactantes de chuva em poucas horas, na região da BHTA no evento considerado extremo em janeiro de 2010, está relacionado à entrada de uma massa de ar frio sendo esta, combinada com a intensa circulação da corrente de jato de baixos níveis sobre a fronteira oeste do Brasil, causando o transporte de calor e umidade do norte do País em direção ao noroeste do RS propiciando a formação de um complexo convectivo de mesoescala.

Conclui-se também que os valores simulados pelo modelo WRF-Hydro em duas diferentes resoluções espaciais foram satisfatórios quando comparados as observações em cada ponto escolhido sobre a região. Salienta-se que os resultados simulados são apenas potenciais em aplicações reais. Mesmo assim, as simulações do WRF-Hydro foram capazes de capturar características da distribuição e variação espacial temporal refletindo razoavelmente as características de distribuição de precipitação e escoamento ao longo da bacia hidrográfica Taquari-Antas no nordeste do Rio Grande do Sul.

Os resultados apresentados mostram que as simulações obtiveram valores com alto índice de concordância para variáveis meteorológicas de pressão, temperatura e umidade relativa em todas estações. Já em relação a velocidade e direção do vento, os resultados foram considerados satisfatórios para todas localidades. Em relação a precipitação, levando em conta todos os processos de atenuação desta variável, sabe-se que os resultados são muito superiores ao que se pode calcular através de modelos numéricos desacoplados e nas previsões por conjunto ainda hoje utilizados.

Nos resultados de vazão do pacote hidrológico vimos que para os maiores corpos d'água, ou seja, para os principais rios que constituem a bacia hidrográfica, os Rios Taquari, Antas, Guaporé, e Rio Carreiro a simulação de menor detalhamento com resolução topográfica dos canais de rede de 1000 metros obteve os melhores resultados. Já para os menores canais como Rio Forqueta, Arroio Jacaré, Rio Tainhas, Rio da Prata e Rio Turvo foram obtidos melhores resultados com maior grau de resolução da grade hídrica de 250 metros.

Acreditasse que isto ocorre pois em tamanhos maiores de grades (por exemplo > 500 m), nos rios menores haverá resolução pobre da onda de cheia e as características de pequena escala que a afetam. Além disso, na resolução mais grosseira, as inclinações do terreno entre as células de grade são mais baixas devido a um alisamento eficaz de topografia quando a resolução do tamanho da grade é diminuída. Assim, considera-se geralmente que as resoluções mais finas produzam resultados superiores. Possivelmente porque o micro relevo pode também influenciar o comportamento de uma onda de inundação.

Sendo assim, este estudo apresentando uma melhor abordagem para estimar possíveis riscos de inundação, atinge seus objetivos na implementação da simulação acoplada com WRF-

Hydro para bacia do Taquari-Antas e os resultados encontrados trata-se do estado da arte para precipitação e vazão simuladas por modelo numérico para região. Além de serem inéditos na utilização deste modelo no Brasil. Verificou-se que é possível implementar e utilizar essa tecnologia, para previsão da ocorrência de precipitação e consequente aumento nas vazões dos rios pertencentes a bacia.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento à pesquisa.

Referências

- ANA. Agência Nacional de Águas, 2015. Disponível: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>. Acesso: 05 fev. 2015.
- Carvalho, L. M. V., Jones, C., Liebmann, B., 2002. Extreme precipitation events in southeastern south america and large-scale convective patterns in the south atlantic convergence zone. *Journal of Climate*, 2377–2394.
- Emilio, L., 2016. Apostila fluviometria CTH. Disponível: <https://www.ufrgs.br/cth-iph/wp-content/uploads/2016/03/Apostila-de-fluviometria-prof-Luis-Emilio.pdf>. Acesso: 16 out. 2018.
- Espinosa, A. M., 2011. Previsão Quantitativa por Conjunto da Precipitação do Verão 2007/2008 na Bacia de Rio Grande. Tese (Doutorado). São Paulo-SP, IAG/USP.
- Ferri, G. A.; Togni, A. C., 2012. A história da bacia hidrográfica Taquari-Antas. UNIVATES.
- Gochis, D.J., Barlage, M., Dugger, A., Fitzgerald, K., Karsten, L., Mcallister, M., McCreight, J., Mills, J., Rafieei Naasab, A., Read, L., Sampson, K., Yates, D., Yu, W., 2018. Coupled WRF|WRF-Hydro V5 Test Case User Guide (Version 5.0). Nota Técnica NCAR. 107 ps. Disponível: <<https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/WRF-HydroV5TechnicalDesc>>. Acesso: 22 out. 2018.
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., Van Der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C. A., 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, 881 p.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2015. Disponível: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Siqueira, V. A., 2015. Previsão de cheias por conjunto em curto a médio prazo: bacia do Taquari-Antas/RS. Dissertação (Mestrado) Porto Alegre – RS, IPH-UFRGS.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.Y., Wang, W., Powers, J.G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- Smith, J., Baeck, M., Steiner, M., Miller, A., 1996. Catastrophic rainfall from na upslope thunderstorm in the central appalachians: The rapidan storm of june 27, 1995. *Water Resources Research*, 32, 3099–3113.
- Steffen, W., Andreae, M.O., Bolin, B., Cox, P.M., Crutzen, P.J., Cubasch, U., Held, H., Nakicenovic, N., 2004. Abrupt changes: The Achilles' heels of the Earth system. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 46, 8-20.