

**SISTEMA DE MONITORAMENTO E PREVISÃO HIDROLÓGICA DO RIO
ARARANGUÁ - SC**

Éverton Blainski¹; Iria Sartor Araujo²; Marcelo Fabricio Mello³ & Rafael Censi Borges⁴

RESUMO --- Os sistemas de previsão hidrológica são ferramentas importantes para o gerenciamento de áreas sujeitas à inundação. Essa tecnologia integra características locais, monitoramento hidrológico e previsão do tempo e disponibiliza informações relacionadas à tendência dos níveis dos rios, possibilitando a adoção de medidas preventivas em eventos extremos. O objetivo desse trabalho foi avaliar o desempenho do modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*) e do modelo atmosférico WRF (*Weather Research and Forecasting*) e desenvolver um sistema de previsão hidrológica diária, baseado no acoplamento desses modelos, para a bacia hidrográfica do rio Araranguá, Santa Catarina. Os resultados demonstraram a habilidade do modelo SWAT em simular a vazão dos rios na bacia hidrográfica do rio Araranguá. O modelo de previsão atmosférica WRF apresentou boa habilidade na previsão de eventos de chuva, entretanto, necessita de ajustes para a redução das incertezas quanto ao volume precipitado. O acoplamento dos modelos WRF e SWAT possibilitou a previsão de vazão dos rios, em diferentes pontos, com um horizonte de 48 horas. Entretanto, necessita de maiores estudos a fim de melhorar os resultados, principalmente em situações de maiores volumes de chuva diária.

ABSTRACT --- Hydrological forecast systems are important tools for the management of areas subject to flooding. By integrating local characteristics, hydrological monitoring and forecasting these systems provide information related to the tendency of river levels, which in their turn enable the adoption of preventive measures in extreme events. The aim of this study was to develop a system of daily hydrological forecasting for the basin of Araranguá river, Santa Catarina. This goal was pursued by coupling the performance of the hydrological model SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*) and the atmospheric model WRF (*Weather Research and Forecasting*). The results obtained demonstrated the ability of SWAT model to simulate river flows in the Basin of Araranguá River. The atmospheric prediction model WRF showed good skill in predicting rainfall events, but requires adjustments to reduce the uncertainties regarding the amount precipitated. The coupling of WRF and SWAT models allowed the prediction of river flows at different locations, with a horizon of 48 hours. Nevertheless, more studies are necessary to improve future results, particularly in situations of greater volumes of daily rain.

Palavras-chave: monitoramento e previsão hidrológica, SWAT, WRF.

¹ Pesquisador, Dr. Engenheiro-agrônomo da Epagri, Ciram. Rodovia Admar Gonzaga, 1347, Itacorubi, 88034-901, Caixa postal 502, Florianópolis, SC. E-mail: evertonblainski@epagri.sc.gov.br

² Pesquisadora, Dr. Engenheira-agrônoma da Epagri, Ciram. E-mail: iriaaraujo@epagri.sc.gov.br

³ Tecnólogo em processamento de dados da Epagri, Ciram, E-mail: marcelomello@epagri.sc.gov.br

⁴ Técnico em meteorologia da Epagri, Ciram. E-mail: censi@epagri.sc.gov.br

INTRODUÇÃO

Ao longo da história, as populações procuraram se fixar às margens dos cursos d'água para facilitar o uso desse recurso para o consumo humano, agricultura, transporte de cargas, fonte de energia e lazer (Tucci e Bertoni, 2003). Entretanto, com o desenvolvimento acelerado das cidades, observado principalmente no século XX, as várzeas inundáveis foram ocupadas desordenadamente. Assim, em eventos de inundação, a ocupação inadequada das planícies pode ter como consequência grandes prejuízos materiais e perdas humanas consideráveis (Breda, 2008).

No Brasil, o processo de urbanização, caracterizado pela valorização de áreas centrais e pela ausência de planejamento, impulsionou a população de menor poder aquisitivo a se instalar em áreas ambientalmente vulneráveis, como margens de rios, mangues e várzeas (Brasil, 2007). A ocupação de áreas inundáveis acarreta inúmeros prejuízos à população. Os principais impactos, registrados no Brasil, consistem em perdas materiais e sociais, interrupção da atividade econômica das áreas inundadas, contaminação por doenças de veiculação hídrica e a contaminação da água pela inundação de depósito de material.

De maneira geral, a solução para o problema de inundações envolve um grande aporte de recursos, o que muitas vezes inviabiliza a sua implementação. Com isso, medidas mitigatórias tornam-se alternativas mais viáveis a serem adotadas. Dessa forma, tais medidas têm por objetivo minimizar as consequências das inundações, haja visto que a solução definitiva desse problema é, muitas vezes, fisicamente e economicamente inviável na maioria das situações (CPRM, 2004).

No gerenciamento de áreas de risco, as medidas mitigatórias se dividem em dois grupos: estruturais e não estruturais. As medidas estruturais são aquelas em que se aplicam soluções de engenharia. Podem ser medidas que atuam diretamente sobre o rio, tais como: diques, reservatórios, bacias de amortecimento, canais de desvio, entre outros, ou podem ser implementadas na bacia hidrográfica, procurando alterar a relação precipitação-vazão, ou retardar e/ou diminuir os picos de hidrogramas de cheia (Brasil, 2007). As ações não estruturais são aquelas em que se aplica um conjunto de medidas relacionadas às políticas públicas, planejamento urbano, legislação, planos de defesa civil e educação. São tecnologias brandas e, normalmente, têm custos menores e apresentam bons resultados. As ações não estruturais podem ser separadas nos seguintes grupos: edificações à prova de enchentes, seguro de enchente, previsão e alerta hidrológico e zoneamento de áreas inundáveis (Cunha, 2004). A combinação destas medidas possibilita a redução dos efeitos das inundações e melhoria do processo de ocupação das planícies inundáveis.

Dentre as ações não estruturais, os sistemas de previsão e alerta hidrológico têm grande importância. Esses sistemas integram um conjunto de informações de clima, tempo, hidrologia e características intrínsecas as bacias hidrográficas e possibilitam a previsão de eventos com potencial

de gerar prejuízos, com antecedência viável, para o planejamento de ações mitigatórias. Existem diferentes modelos matemáticos que podem ser utilizados como ferramentas de previsão hidrológica. A adoção de um modelo específico depende de características locais da área de estudo. Entretanto, independente do modelo de simulação adotado, essa ferramenta pode auxiliar na tomada de decisão imediata (Christofolletti, 1999), possibilitando a intervenção e/ou remoção de pessoas situadas em áreas de risco.

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo matemático de parâmetros distribuídos e contínuos (Arnold *et al.*, 1998). Por meio dessa tecnologia diferentes processos físicos podem ser simulados de forma sequencial (Tim e Jolly, 1994), com o objetivo de quantificar os impactos das alterações de uso do solo no regime hidrológico (Srinivasan e Arnold, 1994). Por meio do SWAT diferentes cenários de uso e ocupação do solo podem ser simulados e os impactos dessas alterações podem ser quantificados e comparados. A escala de tempo das simulações hidrológicas realizadas através do modelo SWAT pode ser anuais, mensais, diárias ou subdiária (dependendo da escala de tempo dos dados de entrada).

As informações básicas para a aplicação do SWAT compreendem informações cartográficas (modelo digital de elevação; mapa de uso e ocupação e mapa de solos) e dados tabulares de clima e tempo (temperatura do ar; precipitação; umidade relativa do ar; velocidade do vento e radiação solar), esses podem ser obtidos de uma rede de monitoramento instalada ao longo da área de contribuição da bacia hidrográfica e/ou oriundos de modelos de previsão atmosférica. A utilização de informações de previsão como dados de entrada do SWAT é o que possibilita a previsão, com antecedência variável, do regime hidrológico e de eventos de enchente ou inundação.

O *Weather Research and Forecasting* (WRF) é um modelo de previsão numérica do tempo de mesoescala, desenvolvido tanto para fins de pesquisa quanto operacionais. Foi desenvolvido conjuntamente por uma série de instituições e agências governamentais como: National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Forecast Systems Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory, Oklahoma University e Federal Aviation Administration (FAA). O WRF foi desenvolvido para ser flexível, com código portátil eficiente em ambientes de computação paralela. Oferece uma diversidade de opções físicas, além de sistemas avançados de assimilação de dados. Pode ser usado em aplicações de diferentes escalas espaciais, desde alguns metros até muitos quilômetros.

A utilização acoplada do modelo hidrológico SWAT com o modelo atmosférico WRF pode constituir um sistema de previsão de hidrológica capaz de fornecer informações estratégicas para o gerenciamento de áreas vulneráveis como planícies de inundação e/ou áreas com baixa capacidade de drenagem. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi utilizar o modelo hidrológico SWAT

acoplado ao modelo atmosférico WRF para implementação de um sistema de previsão hidrológica na bacia do rio Araranguá, SC, de maneira a embasar, com informações hidrológicas, tomadas de decisão relacionadas à remoção de pessoas de áreas de risco e/ou adoção de medidas mitigatórias visando redução dos prejuízos materiais.

MATERIAL E MÉTODOS

A área selecionada para esse trabalho abrange a bacia hidrográfica do rio Araranguá, localizada no extremo sul do Estado de Santa Catarina - Brasil, entre as coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) 595.000, 673.000, 6.781.000 e 6.854.000 m N (Datum SAD-69, Fuso 22, meridiano central 51°W), com uma área aproximada de 3.000 km² (Figura 1).

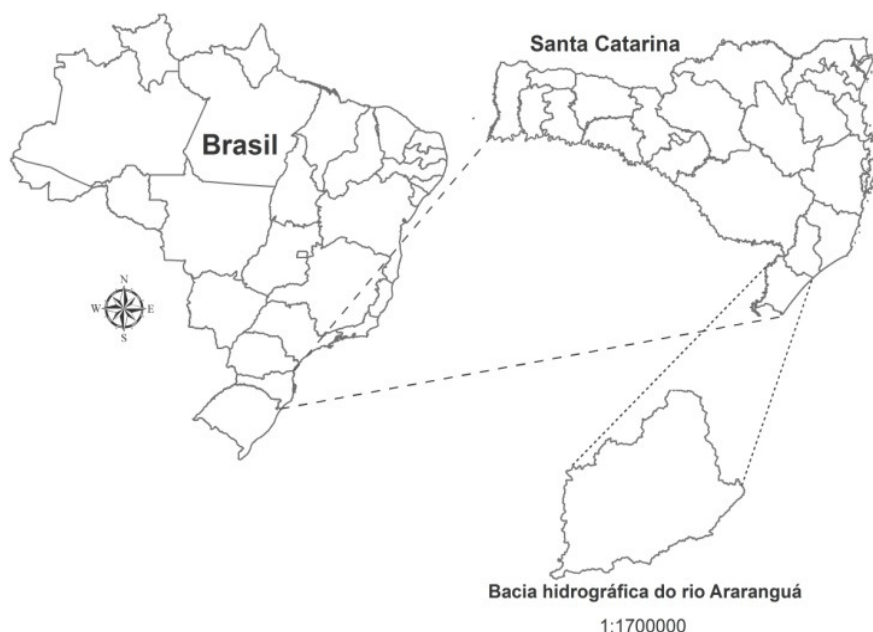


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Araranguá.

O principal rio da bacia hidrográfica é o Araranguá que possui uma vazão média de longo termo (Q_{MLT}) de $135,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Seus principais afluentes são: o rio dos Porcos com $Q_{MLT} = 23,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, o rio Itoupava com $Q_{MLT} = 35,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, o rio Mãe Luzia com $Q_{MLT} = 19,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e o rio Manuel Alves com $Q_{MLT} = 15,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Existem também pequenos rios contribuintes como o rio da Laje, rio do Cedro e o rio São Bento, importantes para disponibilidade hídrica da microrregião.

Na bacia hidrográfica estudada predominam as demandas de água para irrigação da cultura do arroz, suprimento das indústrias e abastecimento urbano. Tendo o período de janeiro a julho sem grandes conflitos no atendimento destas demandas. No período de agosto a dezembro surgem os déficits hídricos em função da elevada demanda destinada à irrigação da cultura do arroz. Ademais, a partir de dezembro são registrados os maiores volumes de precipitação (Pandolfo *et al.*, 2002),

fato esse que ocasiona, frequentemente, problemas de inundação em diferentes pontos da bacia hidrográfica.

Modelo SWAT

O SWAT é um modelo hidrológico fundamentado em uma estrutura de comandos definida para simular a propagação do escoamento, sedimentos e nutrientes através de bacias hidrográficas (Machado e Vettorazzi, 2003), tendo como principais componentes a hidrologia, o clima, a vegetação, o aporte de nutrientes e agrotóxicos e o manejo do solo (Arnold *et al.*, 1998). O componente hidrológico do modelo inclui subrotinas para determinação do escoamento superficial, percolação, fluxo lateral subsuperficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração (Machado e Vettorazzi, 2003).

O cálculo do escoamento superficial é realizado por uma formulação modificada do método Curva Número (CN) (USDA, 1972). O método CN correlaciona o escoamento superficial à classe de solo, tipo de uso e ocupação e práticas de manejo empregadas (Arnold *et al.*, 1995).

A componente climática do modelo compreende as variáveis diárias ou subdiárias: precipitação, temperatura do ar (máxima e mínima), radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento (Arnold *et al.*, 1998).

Modelo WRF

A previsão atmosférica foi realizada com base no modelo WRF. Essa metodologia envolve algumas etapas, sendo essas: obtenção dos dados do modelo global GFS (*Global Forecast System*); interpolação dos dados para a grade do WRF e simulação do modelo e processamento dos resultados.

O WRF é um modelo de previsão numérica de tempo de mesoescala, sua flexibilidade possibilita a configuração de diferentes opções físicas e diferentes escalas espaciais e temporais. Na primeira etapa do processo de previsão de tempo, através do WRF, faz-se necessário a utilização de dados com as condições iniciais de contorno. Para isso, foram utilizados dados gerados pelo GFS, da 00 UTC (*Universal Time Coordenado*) e com resolução espacial de meio grau. A execução do modelo WRF foi configurada para uma resolução espacial de 15 km, com simulações diárias, a partir da 00 UTC e com horizonte de 48 horas.

Após a execução do WRF, os resultados foram convertidos para o formato binário, por meio do aplicativo *Grid Analysis and Display System* (GRADS), e extraídas as informações de interesse em formato de tabela, para os pontos selecionados.

Acoplamento dos modelos

O acoplamento dos modelos WRF-SWAT foi implementado em um servidor com sistema operacional linux, composto por códigos em linguagem C, fortran e bash script. As etapas de pós-processamento incluíram ainda scripts do aplicativo GRADS e usados para interpolar e extrair os dados de previsão de precipitação, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento.

As etapas do processo de acoplamento dos modelos são mostradas na figura 2. O processo se divide em três etapas: previsão atmosférica, monitoramento hidrológico e previsão hidrológica.

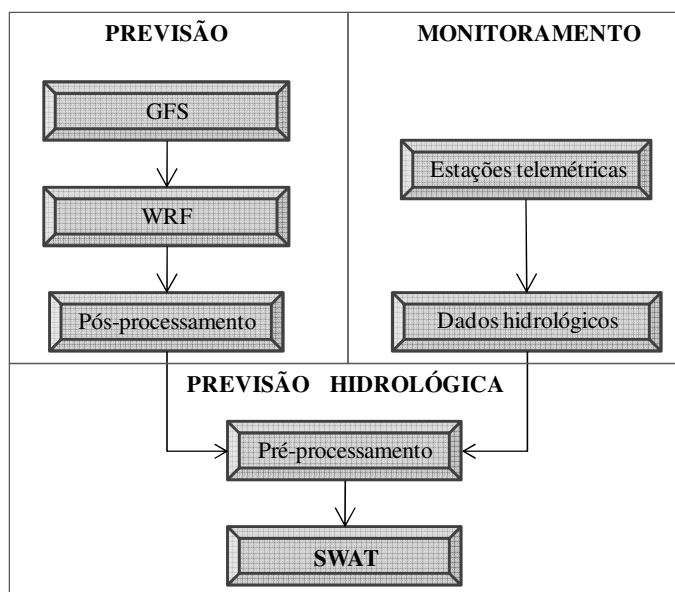


Figura 2 – Etapas de acoplamento dos modelos WRF-SWAT. GFS – Global Forecast System; WRF – Weather Research Forecasting; SWAT – Soil and Water Assessment Tool.

A primeira etapa do processo de acoplamento dos modelos consistiu na previsão atmosférica pelo modelo WRF, para pontos específicos na bacia hidrográfica do rio Araranguá. Paralelamente, os dados de monitoramento hidrológico (precipitação, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento) foram consistidos e organizados para a utilização na terceira etapa do processo. Nessa fase, procedeu-se a simulação hidrológica por meio do modelo SWAT em que, na etapa de pré-processamento, foram utilizados, conjuntamente, os dados de previsão do WRF e o histórico do monitoramento hidrológico, tendo como dados de saída a previsão de vazão em diferentes pontos da rede hídrica.

Calibração e validação do SWAT

A calibração e validação do SWAT foram realizadas utilizando dados de vazão diária medidos em três pontos de monitoramento instalados, respectivamente, nos rios Mãe Luzia, Manoel Alves e Itoupava, principais afluentes do rio Araranguá.

A análise de eficiência do SWAT foi realizada por meio do coeficiente de Nash e Sutcliffe (COE), descrito na equação 1 e pelo desvio dos dados simulados em relação aos dados medidos ($DV\%$), descrito na equação 2 .

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{med} - E_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (E_{med} - \bar{E})^2} \quad (1)$$

Em que: COE é o coeficiente de Nash e Sutcliffe; E_{med} é o evento medido; E_{sim} é o evento simulado pelo modelo; \bar{E} é a média do evento estimado no período; n é o número de eventos.

$$DV\% = \left(\frac{E_{med} - E_{sim}}{E_{med}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Em que: $DV\%$ é o desvio dos dados simulados em relação aos dados medidos; E_{med} é o evento medido; E_{sim} é o evento simulado pelo modelo.

Análise do percentual de acerto do WRF

A eficiência do WRF para a previsão de precipitação diária, com antecedência de 24 horas foi determinada através de dois indicadores: a) percentual de acerto de ocorrência de chuva; b) eficiência na previsão de volume de chuva ocorrido em 24 horas.

O percentual de acerto de ocorrência de chuva foi determinado comparando-se os dias com ocorrência de chuva $\geq 1,0$ mm (monitoramento) com a previsão de ocorrência de chuva através do WRF, sendo considerado acerto as condições de coincidência entre previsão e monitoramento.

Para a determinação da eficiência do WRF na previsão de chuva acumulada em 24 horas, inicialmente, as chuvas diárias foram divididas em quatro classes, de acordo com o volume precipitado: I) chuvas entre 1,0 e 10,0 mm; II) chuvas entre 10,1 e 30,0 mm; III) chuvas entre 30,1 e 50,0 mm e IV) chuvas com volumes acima de 50,0 mm.dia⁻¹. Após essa classificação, determinou-se como acerto a coincidência entre volume precipitado e previsto pelo WRF dentro de uma mesma classe. Ademais, determinou-se, ainda, se o WRF sub ou superestimou o volume de chuva ocorrido, de acordo com as classes de precipitação definidas inicialmente.

Disponibilização das informações hidrológicas

O sistema de visualização de dados foi desenvolvido utilizando tecnologias *open source* já consolidadas da área de tecnologia da informação. As rotinas computacionais que acessam e proveem os dados oriundos do banco de informações Oracle, que armazena os resultados de previsão hidrológica, foram construídas utilizando a plataforma JAVA. A *web page* de visualização

foi construída utilizando o *framework* de visualização *Adobe Flex*, em conjunto com a API (*Application Programming Interface*) de mapas para *Adobe Flex* disponibilizado pela ESRI. A *web page* de visualização foi desenvolvida com o objetivo de prover informações de monitoramento e previsão hidrológica de forma amigável ao usuário, para que o mesmo possa ter acesso, de forma *online* e instantânea, às informações geradas através do acoplamento dos modelos WRF-SWAT.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na fase de calibração e validação do SWAT, os resultados da simulação de vazão média foram comparados com os dados medidos, no período de janeiro a dezembro de 2004, tendo como referência os pontos de monitoramento instalados nos rios Itoupava, Manoel Alves e Mãe Luzia (Figura 3). Para os três locais analisados, os coeficientes de determinação (R^2) foram superiores a 0,94, sugerindo uma satisfatória correlação entre dados medidos e simulados pelo modelo hidrológico.

Os indicadores de desempenho do SWAT (Tabela 1) indicaram um ajuste satisfatório do modelo aos dados experimentais. O COE foi de 0,94 para o ponto de monitoramento instalado no rio Itoupava e de 0,86 e 0,78 para os pontos situados nos rios Manoel Alves e Mãe Luzia, respectivamente. Segundo Krysanova *et al.* (1998), para um bom ajuste do modelo são aceitos valores de COE superiores de 0,7. Portanto, o modelo apresentou-se como um estimador melhor do que a média dos dados medidos.

Tabela 1 – Indicadores de desempenho do SWAT para a bacia hidrográfica do rio Araranguá

Ponto de monitoramento	Coordenadas		R^2 ⁽¹⁾	COE ⁽²⁾	DV% ⁽³⁾
	Latitude	Longitude			
Rio Itoupava	28°57'32"	49°36'07"	0,94	0,86	10,0
Rio Manoel Alves	28°51'15"	49°35'25"	0,96	0,94	1,5
Rio Mãe Luzia	28°45'04"	49°28'25"	0,97	0,78	13,9

⁽¹⁾coeficiente de determinação; ⁽²⁾coeficiente de Nash e Sutcliffe; ⁽³⁾desvio dos dados simulados em relação aos dados medidos.

O DV% entre a vazão medida (Q_{med}) e a vazão simulada (Q_{sim}) foi, respectivamente, de 10; 1,5 e 13,9% para os rios Itoupava, Manoel Alves e Mãe Luzia (Tabela 1), indicando que, na média, a Q_{sim} foi menor que a Q_{med} , entretanto, dentro dos percentuais citados na literatura. A desuniformidade na distribuição de precipitação pode ter contribuído para as incertezas associadas à utilização do modelo hidrológico, uma vez que, dentro da rotina de cálculos do SWAT, essa é considerada homogênea dentro do raio de abrangência de um determinado ponto de monitoramento

(Goodrich *et al.*, 1995). Entretanto, apresenta uma desuniformidade significativa, principalmente em eventos extremos (Machado e Vettorazzi, 2003; Faures *et al.*, 1995).

Após a calibração do SWAT, procedeu-se a validação do modelo, tendo como referência o ano de 2006. A análise visual dos resultados demonstrou uma adequada capacidade do modelo em representar o regime hidrológico da bacia do rio Araranguá, tanto em períodos de baixa disponibilidade hídrica quanto em períodos com elevado volume de precipitação (Figura 2).

Para o rio Itoupava, no ano de 2006, a menor Q_{med} foi de $5,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, registrada no mês de setembro, o valor de Q_{sim} registrado nessa condição foi de $4,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. No mês de novembro foi registrado o maior valor de Q_{med} da série ($92,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), enquanto que o SWAT simulou, nessa condição, uma vazão média diária de $80,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Para os rios Manoel Alves e Mãe Luiza, as menores Q_{med} , para 2006, foram: $0,8$ e $1,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente, e os resultados das simulações do SWAT foram: $2,5$ e $2,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nesses rios, as Q_{med} máximas diárias foram, respectivamente, $48,0$ e $32,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto que as Q_{sim} para o mesmo período foram de $48,0$ e $39,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Dessa forma, com base nos resultados apresentados, foi possível validar a calibração realizada no SWAT e corroborar a hipótese de eficiência desse modelo para a representação do regime hidrológico.

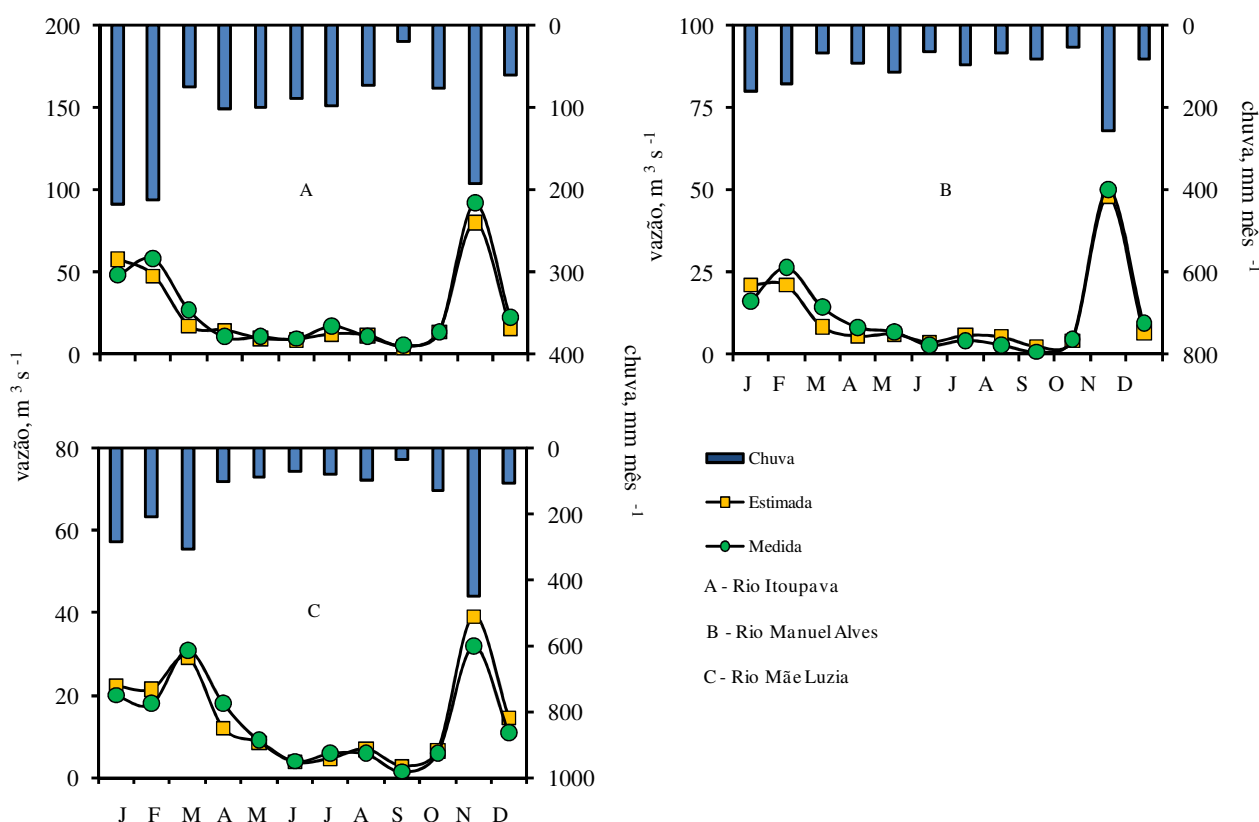


Figura 2 – Vazões medidas e simuladas pelo SWAT, no período de validação do modelo.

Após a validação, o modelo SWAT foi utilizado para a simulação de vazão nos diferentes pontos da bacia hidrográfica, conforme Figura 3. Optou-se por utilizar a previsão com escala

temporal diária e um horizonte de previsão de 48 horas em função da baixa eficiência do WRF para a previsão de chuva horária, conforme citado por Oliveira, 2006.

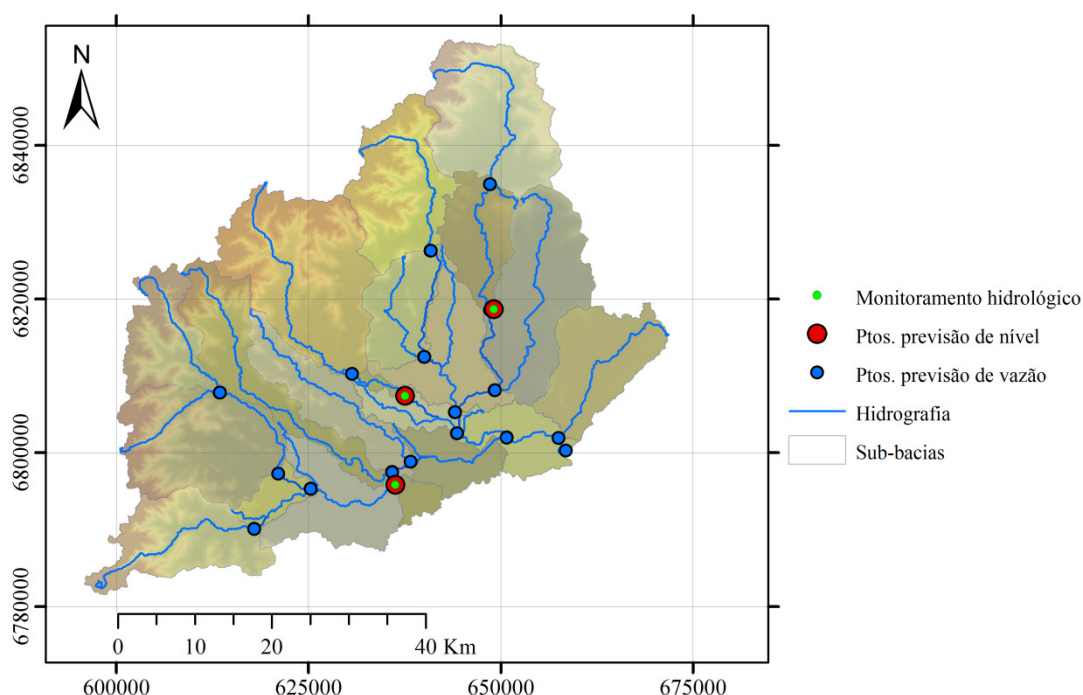


Figura 3 – Pontos de previsão e monitoramento hidrológico na bacia do rio Araranguá-SC.

Os resultados da previsão de chuva diária pelo modelo WRF, para a coordenada UTM 665.314 e 6.842.866 m N (Datum SAD-69, Fuso 22, meridiano central 51°W), foram comparados com a chuva registrada na estação climatológica de Urussanga, SC, situada nesta mesma localização geográfica, no período de 01/04/2009 a 31/05/2010. Os resultados demonstram a capacidade do WRF em prever, com antecedência de 24 horas, a ocorrência de chuvas. Para o período e localidade analisados, o percentual de acerto foi de 90%. Entretanto, os volumes de chuva previstos pelo WRF foram inferiores aos registrados, para os diferentes intervalos analisados. O percentual de acerto foi de 43% para volumes inferiores a 10 mm.dia⁻¹ e de 33% para chuvas menores que 30 mm.dia⁻¹ e/ou maiores que 50 mm.dia⁻¹. O menor percentual de acerto foi registrado para chuvas com volume diário entre 30 e 50 mm.dia⁻¹, cerca de 8% (Tabela 2).

Tabela 2 – Resultados de desempenho do modelo WRF para previsão de chuva diária, com 24 horas de antecedência, entre 01/04/2009 a 31/05/2010, para a estação climatológica de Urussanga, SC

Condição	N° de dias com chuva no período		Acerto %
	medida	prevista WRF	
CHUVA	162	179	90
1,0 < CHUVA ≤ 10,0	94	40	43
10,0 < CHUVA ≤ 30,0	48	11	33
30,0 < CHUVA ≤ 50,0	14	1	8
CHUVA > 50,0	9	3	33

A distribuição temporal de chuva no período de 01/08/2009 a 31/09/2009 é mostrada na figura 4. Os resultados mostraram a eficiência do WRF na previsão de ocorrência de chuvas durante o período. Entretanto, ressaltam a subestimativa dos volumes precipitados, principalmente em condições de grandes quantidades diárias. Esse fato pode estar associado à subestimativa dos picos de vazão diária simulada pelo SWAT. Haja visto que o modelo hidrológico apresentou um bom desempenho quando se utilizou como dados de entrada as informações registradas nas estações de monitoramento hidrológico. Esses resultados evidenciam a necessidade da utilização de diferentes instrumentos de previsão de chuva para a obtenção de resultados mais confiáveis.

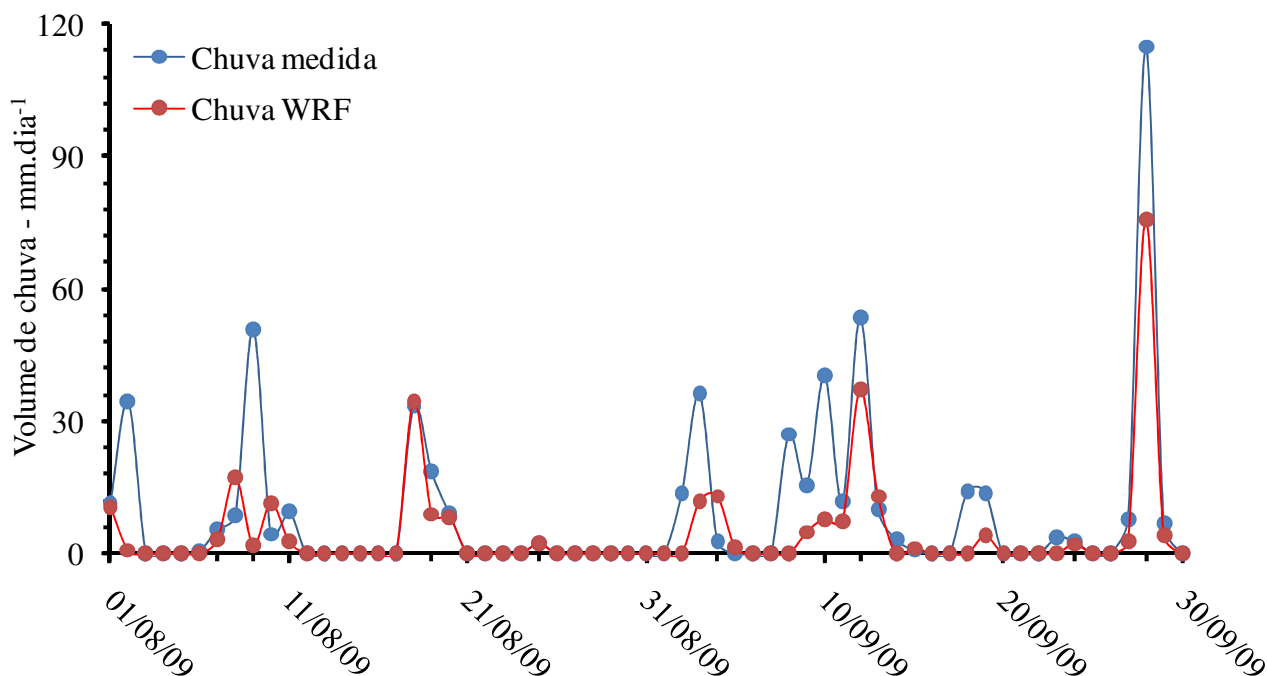


Figura 4 – Distribuição temporal de chuva medida e prevista pelo WRF, no período de 01/08/09 a 30/09/09, para a estação climatológica de Urussanga, SC.

Os resultados da simulação de vazão através do SWAT com base nos dados de chuva previstos pelo WRF são mostrados na figura 5. De maneira geral o acoplamento dos modelos proporcionou uma adequada previsão de vazão, com antecedência de 24 horas, entretanto, conforme discutido anteriormente, a subestimativa de precipitação ocasionou picos de vazão menores em relação aos dados medidos, principalmente em eventos de grande intensidade. Esses resultados sugerem que a tecnologia de acoplamento desses modelos é válida, entretanto, necessita de maiores estudos para uma melhor descrição dos fenômenos naturais, principalmente a aqueles relacionados à previsão de ocorrência e de quantidade de chuva diária.

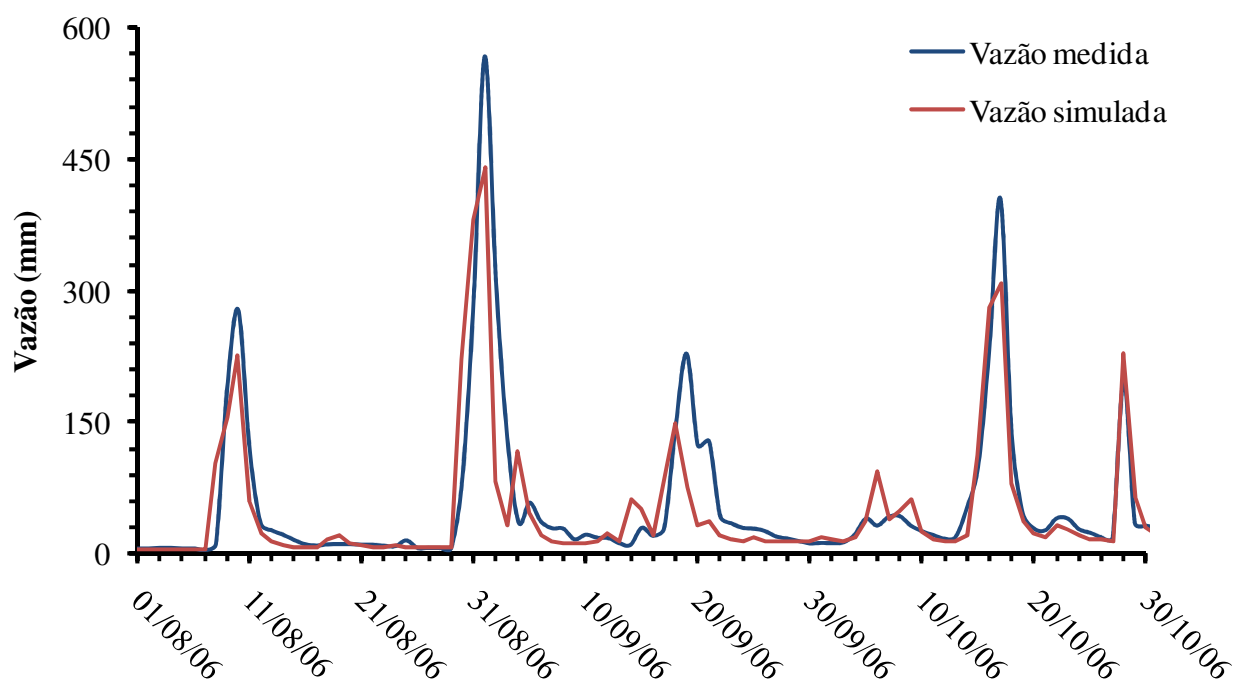


Figura 5 – Distribuição temporal de vazão diária medida e simulada no rio Itoupava com base na previsão de chuva (WRF), durante o período de validação do modelo SWAT.

CONCLUSÃO

Os resultados desse estudo demonstraram a habilidade do modelo hidrológico SWAT em simular a vazão na bacia hidrográfica do rio Araranguá;

O modelo de previsão atmosférica WRF apresentou boa habilidade na previsão de eventos de chuva, entretanto, necessita de ajustes para redução das incertezas quanto ao volume precipitado;

O acoplamento dos modelos WRF e SWAT possibilitou a previsão de vazão dos rios, em diferentes pontos, com um horizonte de 48 horas. Entretanto, necessita de maiores estudos a fim de melhorar os resultados, principalmente em situações de maiores volumes de chuva diária.

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. (1998). “*Large area hydrologic modeling and assessment part I. model development*”. American Water Research Association 34, pp.73-89.

ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R.; MAIDMENT, D.R. (1995). “*Continuous-time water and sediment routing model for large basins*”. Hydrologic Engineers 119, pp.171-183.

BRASIL (2007). *Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens de Rios*. Org. por Carvalho, C.S., Macedo, E.S e Ogura, A.T. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, Brasília-DF, 176 p.

- BREDA, A. (2008). “*Avaliação de melhorias para um sistema de previsão hidrológica horária*”. 142p. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1999). *Modelagem de Sistemas Ambientais*. Edgard Blücher, São Paulo-SP, 240p.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (2004). “*Definição da planície de inundação da cidade de Governador Valadares*”. 128p. Relatório Final. Belo Horizonte-MG.
- CUNHA, L. K. (2004). “*Sistemas avançados de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real*”. 236p. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR.
- FAURES, J.; GOODRICH, D.C.; WOOLHISER, D.A.; SOROOSHIAN, S. (1995). “*Impact of small-scale spatial on runoff modeling*”. Hydrology 173, pp.309-326.
- GOODRICH, D.C.; FAURES, J.; WOOLHISER, D.A.; LANE, L.J.; SOROOSHIAN, S. (1995). “*Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability*”. Hydrology 173, pp.283-308.
- KRYSAANOVA, V.; MÜLLER-WOHLFEIL, D.; BECKER, A. (1998). “*Development and test of a spatially distributed hydrological / water quality model for mesoscale watersheds*”. Ecological Modelling, 106, pp.261-289.
- MACHADO, R.E.; VETTORAZZI, C.A. (2003). “*Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins (SP)*”. Revista Brasileira de Ciência do Solo 27, pp.735-741.
- OLIVEIRA, A. C. (2006). “*Implementação do modelo atmosférico WRF acoplado com o modelo hidrológico TOPMODEL para a bacia de União da Vitória*”. 70p. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR.
- SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.G. (1994). “*Integration of a basin-scale water quality model with GIS*”. Water Resources Research 30, pp.453-462.
- TIM, U.S.; JOLLY, R. (1994). “*Evaluating Agricultural Nonpoint-Source Pollution Using Integrated Geographic Information Systems and Hydrology/Water Quality Model*”. Journal in Environmental Quality 23, pp.25-35.
- TUCCI, C.E.M.; BERTONI, J.C. (2003). *Inundações Urbanas na América do Sul*. ABRH, Porto Alegre-RS, 150p.
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE-USDA (1972). Soil Conservation Service. *Hydrology*. National Engineering Handbook. Washington-USA, USDA (Section 4).