

Aplicação do Modelo de Skaugen para Desagregação Espacial da Chuva na Bacia do Rio Iguaçu - Brasil

Franciele Reynaud ¹, Miriam Rita Moro Mine ², Eloy Kaviski ²
franciele_reynaud@yahoo.com.br; mrmine.dhs@ufpr.br; eloy.dhs@ufpr.br

Recebido: 03/01/12 - revisado: 09/11/12 - aceito: 26/03/14

RESUMO

O método de desagregação espacial de Skaugen foi aplicado para desagregar chuvas previstas pelo modelo atmosférico de previsão numérica WRF – Weather Research and Forecasting para uma área dentro da bacia hidrográfica do rio Iguaçu, localizada no estado do Paraná, Brasil. A bacia hidrográfica do rio Iguaçu foi escolhida porque se pretende usar as previsões de chuva do modelo WRF para previsão de vazões para operação hidráulica dos reservatórios das cinco usinas hidrelétricas existentes. O método de desagregação estatístico propõe que a dependência espacial é mantida por interpolação e que a precipitação é exponencialmente distribuída, podendo ter dois ou três parâmetros dependendo se a cobertura de chuva nas células for intermitente ou completa, respectivamente. Os resultados encontrados foram satisfatórios, sendo mantida a média da malha e o desvio padrão, além dos valores do erro padrão das médias terem sido pequenos, indicando uma simulação estável. A correlação espacial foi analisada, sendo que os eventos desagregados mantiveram a estrutura de correlação das previsões do modelo WRF.

Palavras-chave: precipitação; desagregação espacial; distribuição exponencial; modelo WRF.

INTRODUÇÃO

Uma das dificuldades nas aplicações de modelos hidrológicos para previsão de aflúências aos reservatórios de usinas hidrelétricas, auxiliando na operação hidráulica de curto prazo, é a incorporação da previsão meteorológica da chuva, com o objetivo de estender o horizonte de previsão e dar maior segurança à tomada de decisões durante as cheias. As dificuldades encontradas são tanto em termos da previsão quantitativa da chuva quanto da sua distribuição espacial. Este artigo enfatiza a busca de soluções para a segunda dificuldade, que surge porque os processos meteorológicos e hidrológicos, normalmente, são descritos em escalas diferentes. Esta discrepância nas escalas espaciais requer estudos para definição de métodos para desagregar a previsão meteorológica da chuva à escala da bacia hidrográfica.

O que motivou este estudo foram os problemas encontrados na bacia do rio Iguaçu quanto à operação hidráulica de reservatórios de usinas hidrelétricas em tempo real, onde é necessário criar um “volume de espera” para controlar cheias. Note-se que neste caso os objetivos são conflitantes: gerar energia e controlar cheias. No primeiro caso procura-se ter o nível do reservatório o mais alto possível e no segundo caso, rebaixá-lo de tal forma a criar um volume vazio (volume de espera) sem que isto penalize em demasia a geração hidrelétrica. Este volume de espera, na bacia hidrográfica do rio Iguaçu, devido ao seu regime hidrológico errático, deve ser criado em tempo real, e, neste caso, as previsões meteorológicas da chuva são de fundamental importância. Por outro lado, essas previsões são fornecidas numa baixa resolução pelos modelos meteorológicos e, portanto, é necessário desagregá-las à escala da bacia hidrográfica.

A tendência de subestimativa das previsões de precipitação, particularmente em aplicações na engenharia hidrológica como a destacada no parágrafo acima, pode ser parcialmente compensada por um método de desagregação espacial do campo de precipitação previsto, que, embora não altere os volumes médios de chuva numa região, modifica a distribuição, gerando valores máximos mais intensos

¹Universidade Federal do Paraná – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental

²Universidade Federal do Paraná – Departamento de Hidráulica e Saneamento

quando analisados numa escala mais detalhada que a própria grade do modelo atmosférico.

Para se alcançar o exposto no parágrafo acima é necessário primeiramente verificar se a aplicação do método de Skaugen a bacias hidrográficas e modelos regionais de previsão da precipitação, distintos daqueles para os quais foi definido, é viável, tendo em vista a complexidade dos campos de precipitação, tanto temporal quanto espacial, sendo este último objeto deste artigo.

As diferenças obtidas entre as vazões simuladas por um mesmo modelo chuva-vazão, mas alimentado com dois dados de entrada: i) campo de chuva original fornecido pelo WRF; ii) campo de chuva desagregado; dependem muito da escala da bacia hidrográfica. Espera-se que, em bacias hidrologicamente pequenas, esta diferença seja grande. Já em bacias hidrográficas hidrologicamente grandes a desagregação poderá não trazer muitos benefícios. Entende-se aqui que os termos usados para bacias "hidrologicamente grandes" e "hidrologicamente pequenas" não as caracterizam pelo tamanho da área de drenagem, mas sim pelo seu comportamento hidrológico. A bacia do rio Iguaçu em Foz do Areia, onde está o primeiro grande aproveitamento hidrelétrico da cascata do rio, apesar de ter uma área de 30.000 km², tem comportamento de bacia hidrográfica pequena, com uma subida acentuada do hidrograma e picos altos. Logo, espera-se que a desagregação espacial da chuva traga grandes benefícios neste contexto. Esta verificação não foi feita neste artigo, mas é objeto de estudos futuros.

Logo, em muitas aplicações, para que a chuva prevista pelos modelos atmosféricos seja apropriada para os modelos hidrológicos, é importante ter um esquema de desagregação que transforme os valores das malhas de previsão de chuva em escalas menores, sem que se atenuem excessivamente os picos de chuva. O modelo de previsão de chuva deve estar bem calibrado para que não gere falsos alarmes ou ainda, que deixe de prever eventos importantes que possam atingir a bacia.

Os numerosos métodos de desagregação, determinísticos, estatísticos ou fractais (BIAOU, 2004; MATYASOVZSKY e BOGARDI, 1996; HERERA *et al.*, 2006; MEHROTRA e SINGH, 1998; SKAUGEN, 2002) permitem uma transposição *ad hoc* mais ou menos plausível dos resultados dos modelos climáticos à escala mais fina dos modelos hidrológicos.

A tendência atual é a construção de modelos espaço-temporais, capazes de reproduzir valores extremos, como por exemplo, os modelos baseados nas noções de fractais e multifractais (BIAOU,

2004). Esses modelos descrevem as distribuições em termos de campos de intensidade variável e têm a vantagem de evitar truncamentos da escala como ocorre na maioria dos modelos já propostos.

O procedimento de desagregação das previsões de chuva provenientes de modelos atmosféricos, proposto por Skaugen (2002), foi aplicado pelo autor para desagregar campos de precipitação fornecidos pelo modelo *High Resolution Limited Area Model*, HIRLAM (DNMI, 1996) que opera numa malha de 11 km x 11 km. As chuvas foram desagregadas para serem utilizadas como dados de entrada para um modelo hidrológico distribuído, operando na resolução de 1,1 km x 1,1 km. No presente artigo foi utilizado, no lugar do modelo HIRLAM, o modelo WRF - *Weather Research and Forecasting* (SKAMAROCK *et al.*, 2005), que usa malhas de 15 km x 15 km. O estudo de caso foi realizado para a bacia hidrográfica do rio Iguaçu, localizada nos estados do Paraná e Santa Catarina, Brasil. A resolução espacial escolhida para desagregação foi de 0,75 km x 0,75 km.

Sabe-se que, em geral, sistemas dinâmicos não-lineares, como é o caso dos sistemas de recursos hídricos, podem exibir comportamentos irregulares. A evolução desses sistemas é influenciada por vários fatores, parecendo razoável que sejam considerados como imprevisíveis (KAPLAN & GLASS, 1995). Sempre que se utilizam modelos ou métodos que possuem características não lineares, como no caso do método de desagregação espacial de Skaugen, é necessário que sejam realizadas investigações numéricas, para que seja possível desenvolver uma intuição sobre a representatividade do modelo ou método ao estudo de caso em questão. Logo, torna-se fundamental validar o modelo de Skaugen (2002) para a bacia hidrográfica em estudo, com o intuito de futuras aplicações de Engenharia Hidrológica, sobretudo no que diz respeito à definição de regras operacionais para operação hidráulica dos reservatórios, de cinco usinas hidrelétricas em cascata no rio Iguaçu e que juntas somam uma potência instalada de aproximadamente 7000 MW. Este objetivo foi atingido com a aplicação realizada neste trabalho.

Este artigo tem os seguintes objetivos gerais:

i) Desagregar previsões de chuva do modelo de previsão atmosférica de mesoescala WRF - *Weather Research and Forecasting* para a escala da bacia hidrográfica utilizando o método proposto por Skaugen (2002); ii) Avaliar a aplicabilidade do método de Skaugen em locais diferentes para os quais foi definido. Reforça-se o fato que o modelo WRF não foi executado pelos autores deste artigo; somente a

saída do modelo foi usada como dado de entrada para o modelo de desagregação.

Para atingir os objetivos gerais propostos acima as seguintes etapas foram necessárias: i) Coleta de previsões de chuva do modelo WRF; ii) Seleção de eventos de precipitação prevista pelo WRF para serem desagregados; iii) Escolha da área a ser considerada para o estudo de caso; iv) Desenvolvimento de programa computacional para o algoritmo de desagregação; v) Desagregação dos eventos selecionados para a escala da bacia hidrográfica; vi) Análise dos resultados.

COMPORTAMENTO COMPLEXO DOS CAMPOS DE PRECIPITAÇÕES

A variabilidade espacial da precipitação geralmente é descrita por meio de observações realizadas em locais previamente escolhidos, utilizando-se aparelhos que coletam uma pequena amostra numa superfície (200 a 2000 cm²) instalada a 1,5m do solo, muito conhecidos como pluviômetros. Na maioria dos casos as estações usadas para coletar dados de precipitação são instaladas com densidade espacial não-uniforme, existindo relativas grandes concentrações de estações instaladas em locais com facilidade de acesso, e raras nas outras regiões. Na realização de análises multivariadas de séries temporais de precipitações os parâmetros estimados podem esconder componentes espaciais não-lineares importantes devido à limitação dos dados coletados.

A não-linearidade do ciclo hidrológico conduz a um comportamento complexo do campo de precipitação. A expressão *comportamento complexo de um sistema* descreve processos que apresentam evoluções inesperadas e surpreendentes, que estão completamente ausentes no regime linear. Somente recentemente os sistemas com comportamentos complexos têm sido tratados sistematicamente (LUZZI, 2000). Em função da facilidade de acesso e pela existência de computadores eletrônicos velozes, nas análises de campos de precipitações podem ser considerados modelos capazes de representar detalhes destes efeitos. Entretanto, sabe-se que modelos matemáticos que conseguem representar a dinâmica de sistemas não-lineares podem apresentar como resultados efeitos espúrios indesejáveis. No caso da análise de campos de precipitações estes efeitos podem ser agravados em função das descrições apresentadas acima.

Logo, em função do descrito acima, fez-se, neste artigo, uma aplicação numérica do método de desagregação espacial de Skaugen para intuir sobre

seu potencial em reproduzir a dinâmica de um sistema não linear, como o comportamento das chuvas sobre a bacia hidrográfica do rio Iguaçu, com características diferentes da bacia hidrográfica para a qual o método foi definido, com o intuito de utilizá-lo em aplicações futuras de Engenharia de Recursos Hídricos nesta bacia hidrográfica.

MODELO DE DESAGREGAÇÃO

O método de desagregação espacial de chuva de Skaugen (2002) é uma combinação de interpolação e simulação e é usado para desagregação de chuvas diárias assumindo que a distribuição estatística espacial é exponencial para cada célula da malha e não necessariamente para o campo de precipitação inteiro.

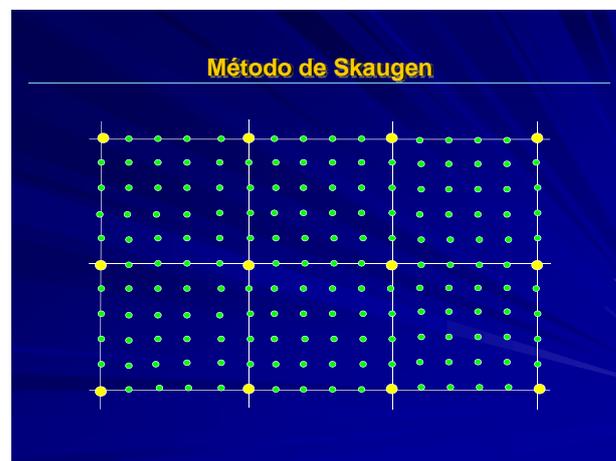


Figura 1 - Método de Skaugen mostrando a malha, as células da malha, os pontos nodais e os pixels

Há duas possibilidades de ocorrências de precipitação sobre uma célula da malha do modelo de previsão atmosférica. A célula pode estar plenamente coberta por precipitação, para a qual existe uma intensidade mínima positiva b . A segunda ocorrência considera um campo intermitente de chuva, onde somente uma fração da célula da malha é coberta por precipitação. A distribuição espacial da precipitação pode, para ambos os casos, ser descrita por uma distribuição exponencial com a introdução de um parâmetro adicional para cada caso.

Na figura 1 pode-se observar a malha formada por seis células (grade de baixa resolução do

modelo WRF) com os pontos nodais em amarelo, e os *pixels* (grade de alta resolução).

Os quatro pontos nodais da célula do modelo atmosférico são usados para determinar os parâmetros da distribuição exponencial para valores simulados de precipitação, e num procedimento simples de interpolação, para determinar a localização espacial dos valores de precipitação. Uma distribuição truncada com dois parâmetros é usada no caso de cobertura completa da célula e uma distribuição com um parâmetro é usada quando há intermitência.

Apresenta-se, a seguir, um resumo das equações para cobertura completa e parcial da célula. O leitor interessado nos detalhes do equacionamento poderá consultar o trabalho de Reynaud (2008).

Cobertura Completa

A intensidade mínima positiva de precipitação na célula plenamente coberta b atua como um parâmetro de locação da distribuição exponencial:

$$f(z) = \lambda e^{-\lambda(z-b)} \quad b < z < \infty \quad (1)$$

onde: z – intensidade de precipitação; λ parâmetro da distribuição exponencial.

com momentos:

$$E(z) = b + \frac{1}{\lambda} = b + \frac{-1}{\log(\bar{h})} \quad (2)$$

$$\text{var}(z) = \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\log^2(\bar{h})} \quad (3)$$

onde $\bar{h} = e^{-\lambda}$

Cobertura Parcial

O ponto de partida para este caso é o conhecimento, *a priori*, da média e variância incondicional (momentos incluindo zeros), os quais são derivados de pontos nodais da célula da malha. Assim, pode-se estimar a média condicional, a variância (para valores positivos de precipitação) e a fração seca da célula.

Denotando por z e z' séries de precipitação incluindo e não incluindo zeros respectivamente, obtêm-se os momentos:

$$E(z) = \frac{n-m}{n} 0 + \frac{m}{n} E(z') = pE(z') \quad (4)$$

onde $p = m/n$ é a fração da célula com precipitação positiva e similarmente:

$$E(z^2) = \frac{n-m}{n} 0 + \frac{m}{n} E(z'^2) = pE(z'^2) \quad (5)$$

e a variância:

$$\text{var}(z) = E(z^2) - E(z)^2 \quad (6)$$

Substituindo a equação (5) na equação (6):

$$\text{var}(z) = pE(z'^2) - E(z)^2 \quad (7)$$

e assumindo que a distribuição de z' é exponencial com parâmetro λ , $E(z'^2)$ pode ser expresso em termos de $E(z)$ usando o fato que para distribuição exponencial,

$E(z'^2) = 2E(z')^2$, e por meio das equações (4) e (7), obtém-se:

$$\text{var}(z) = \frac{2}{p} E(z)^2 - E(z)^2 \quad (8)$$

a qual fornece a fração p da precipitação positiva dentro da célula como:

$$p = \frac{2}{\frac{\text{var}(z)}{E(z)^2} + 1} \quad (9)$$

É apropriado discutir aqui a relação entre a variância incondicional e o quadrado da média incondicional na equação (9) e relacionar esta relação à estrutura espacial da chuva. Para uma distribuição exponencial não-truncada, o desvio padrão espacial é igual à média espacial e conseqüentemente a relação é igual à unidade. Da equação (9) isto corresponde a $p=1$, isto é, cobertura completa. Quando esta relação é maior que um, observa-se novamente da equação (9) que os valores de p estão no intervalo $[0,1]$, isto é, o campo é intermitente. Quando a relação é menor que um, a precipitação não pode ser exponencialmente distribuída a menos que haja

uma intensidade mínima b , implicando em um truncamento da distribuição exponencial com momentos dados pelas equações (2) e (3).

Esquema de Desagregação

O campo de precipitação dos modelos regionais consiste, normalmente, de N células ($w \times w$ em km) de uma malha, onde w depende do modelo, enquanto o campo desagregado consiste de $N \times I$ pixels (*Picture Element*) ($z \times z$ em km), onde I é o número de pixels e z depende das unidades de resposta hidrológica da bacia hidrográfica em questão. Os valores interpolados de pixels numa célula podem ser expressos por:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (10)$$

onde:

\mathbf{Y} - vetor ($I \times 1$)

\mathbf{A} - matriz ($I \times j$) de pesos derivados do método de interpolação escolhido;

\mathbf{X} - vetor ($j \times 1$) de valores de entrada;

j - número de valores de entrada e depende do modelo atmosférico.

O vetor \mathbf{Y} é obtido simplesmente dividindo a célula em pixels e identificando cada pixel com um valor interpolado. Os componentes da matriz \mathbf{A} são derivados do método de interpolação escolhido. Pode-se utilizar, por exemplo, a técnica do inverso do quadrado da distância, tal que um conjunto fixo de pesos pode ser designado para cada pixel.

Então \mathbf{Y} é um vetor da entrada interpolada organizada em ordem crescente, o campo desagregado \mathbf{Z} , pode ser expresso como:

$$\mathbf{Z}[i] = \mathbf{V}[\text{rank}\mathbf{Y}[i]] \text{ para todo } i=1, \dots, I \quad (11)$$

onde \mathbf{V} é um vetor ($I \times 1$) de valores simulados ordenados, obtido de uma distribuição exponencial (com parâmetros determinados de \mathbf{X}) e organizado em ordem crescente e os colchetes indicam os componentes do vetor e também a locação (ex. $i=1$ é o pixel esquerdo mais baixo da célula da malha). O resultado pode ser descrito como um campo com valores de precipitação não nula distribuídos exponencialmente, com média e variância idênticas a das entradas (os valores nodais do modelo atmosférico) e com a mesma dependência temporal do campo interpolado \mathbf{Y} .

Este procedimento geral é local, no sentido que a interpolação de valores do pixel e a simulação dos valores de precipitação (e frações de intermitência definida pela equação (9)) são operadas de acordo com os valores nodais de uma célula real da malha.

Descrição detalhada do procedimento de desagregação (SKAUGEN, 2002)

A descrição detalhada do procedimento de desagregação (itens 2 a 7) é transcrita do artigo de Skaugen (2002) conforme abaixo:

1. Considera-se uma malha de baixa resolução do modelo meteorológico designada por quatro pontos amarelos na figura 1, e uma malha de alta resolução para a qual será feita a desagregação das chuvas, designada pelas por quatro pontos verdes na mesma figura. As células de alta resolução são aqui chamadas de pixels.
2. “A cada dos I pixels na célula da malha é designado um valor interpolado dos valores nodais (valores dos quatro cantos). Utiliza-se o método do inverso do quadrado da distância. Este procedimento é repetido para as N células da malha. Aos pixels de valores interpolados é designada uma ordem (1 a $N \times I$) de tal forma a determinar a magnitude relativa da precipitação e sua localização dentro do campo de precipitação interpolado. O valor da ordem \mathbf{Y} da equação (11) é determinado, mas com $N \times I$ componentes”.
3. “A média e a variância espaciais da célula são estimadas dos valores nodais”.
4. “Avalia-se a relação entre a variância e a média incondicional da equação (9). Se esta relação é maior que a unidade, o campo de precipitação é intermitente com cobertura fracional p determinada da equação (9) e precipitação positiva com a célula distribuída exponencialmente, $f(z, \lambda)$. Se o raio for menor que a unidade, a célula é completamente coberta com a intensidade mínima b , e precipitação distribuída exponencialmente $f(z, \lambda, b)$ ”.
5. “No caso da intermitência da célula n , $p_n \times I$ são simulados de $f(z, \lambda)$ e $(1 - p_n)I$ são nulos. No caso de cobertura completa, I valores são simulados de $f(z, \lambda, b)$ ”.
6. “Os passos 1 a 4 são repetidos para cada célula da malha $1, \dots, N$ ”.

7. “Os $N \times I$ valores simulados são então ordenados e obtém-se o vetor \bar{V} de dimensão $I \times N$. O campo desagregado é então determinado pela equação (11)”.

MODELO WRF

As previsões de precipitação desagregadas são saídas do modelo WRF – *Weather Research and Forecasting* – desenvolvido nos Estados Unidos pela união de esforços entre o Centro Nacional de Pesquisas Atmosféricas (NCAR), Divisão de Meteorologia de Meso e Microescala (MMM), a Administração Nacional de Oceanos e Atmosfera (NOAA), o Centro Nacional de Previsão do Meio Ambiente (NCEP), o Laboratório de Pesquisa Naval (NRL), o Centro de Análise e Previsão de Tempestades (CAPS) da Universidade de Oklahoma, e a Administração Federal de Aviação (FAA), juntamente com a participação de outros cientistas (SKAMAROCK *et al.*, 2005).

O WRF fornece uma previsão meteorológica de mesoescala. Ele é um modelo flexível, com códigos fontes simples, o que facilita o seu entendimento e aplicação. Possui um sistema operacional de assimilação de dados com captação em três dimensões. Além disso, pode ser usado em escala de metros até milhares de quilômetros (SKAMAROCK, 2005).

A estrutura do software do WRF, chamado de WRF, é composta por um sistema que compreende quatro programas para alcançar o resultado final. Entre eles estão o ARW (Pesquisa Avançada do WRF) e o NMM (Modelo de Mesoescala Não Hidrostático), que atualmente operam separadamente, porém, eles possuem os mesmos componentes básicos que executam as mesmas funções dentro da estrutura do *software*.

O ARW utiliza as equações não hidrostáticas de Euler para caracterizar as propriedades conservativas do fluido. As equações são formuladas, usando as coordenadas verticais de pressão hidrostática (LAPRISE, 1992) e as equações de fluxo no espaço cartesiano, para incluir o efeito da umidade na atmosfera. Na prática o WRF leva em conta o efeito da força de Coriolis, umidade do ar e a projeção cartográfica da área onde será feita a previsão.

Para a discretização temporal, o modelo utiliza o método de Runge-Kutta de 3ª ordem para

resolver modos de baixa frequência, que são meteorologicamente significantes, e o método de integração em escalas pequenas de tempo para modos acústicos de alta frequência. Apesar de ser denominado Runge-Kutta de 3ª ordem, ele tem precisão de 3ª ordem apenas para as equações lineares, para as equações não lineares é de 2ª ordem.

Na discretização espacial, para estimar os momentos de 2ª até 6ª ordem de advecção também é utilizado o método de Runge-Kutta de 3ª ordem. A difusão é analisada de duas maneiras diferentes, uma ao longo da superfície e a outra no espaço físico (x,y,z).

Para a aplicação do modelo é necessário definir e localizar uma malha tridimensional, especificando as características da superfície, como vegetação, rios e tipos de solo. Além disso, é necessário definir as condições iniciais e de contorno, utilizando para tal, um modelo meteorológico de escala global, sendo utilizado o Sistema Global de Previsão (GFS).

Este modelo está sendo testado pelo Instituto Tecnológico Simepar e tem sido utilizado como um dos modelos na análise de previsão de chuvas no estado do Paraná, Brasil.

ESTUDO DE CASO

A bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Figura 2) vem sendo amplamente estudada ao longo dos anos devido a sua importância no setor elétrico brasileiro. Sua nascente está localizada na Serra do Mar e seu sentido é leste-oeste, tendo sua foz localizada na cidade de Foz do Iguaçu – PR - Brasil.

O método de Skaugen foi aplicado para a área marcada na Figura 2 na bacia do rio Iguaçu. A área escolhida tem sua importância devido a sua localização a montante do reservatório da usina hidrelétrica de Foz do Areia. As características observadas para a escolha da área foram a declividade do terreno e a quantidade de eventos de chuva coincidentes com as previsões nesta região.

As previsões de chuva realizadas pelo modelo WRF em malhas de 15 km x 15 km foram interpoladas por Oliveira (2006) para uma resolução espacial de 7,5 km x 7,5 km. A resolução espacial escolhida para desagregação é 0,75 km x 0,75 km. A resolução temporal das previsões é de uma hora



Figura 2 - Área estudada da bacia hidrográfica do rio Iguaçu

Tabela 1 - Análise qualitativa das previsões do Modelo WRF

Estação	Rede telemétrica	Modelo WRF - HP=24 h		Modelo WRF - HP =48 h	
		choveu	não choveu	choveu	não choveu
Fragosos	choveu	16,2%	1,2%	15,4%	2,0%
	não choveu	27,5%	55,1%	30,0%	52,6%
	superestimou		36,2%		38,9%
	subestimou		6,3 %		7,5%
	acerto		57,5 %		53,6%
São Bento	choveu	15,3%	1,6%	13,9%	2,7%
	não choveu	13,8%	69,3%	15,5%	67,9%
	superestimou		22,8%		22,6%
	subestimou		6,9%		8,2%
	acerto		70,3%		69,2%

HP= horizonte de previsão

com horizonte de 48 horas. Foram utilizadas previsões do período de 24 de setembro de 2005 até 11 de outubro de 2006 totalizando assim 382 dias.

Este artigo não teve por objetivo corrigir o viés da precipitação fornecida pelo modelo WRF, mas assim mesmo procedeu-se a uma análise qualitativa das previsões de chuva fornecidas pelo modelo para horizontes de previsão (HP) de 24 h e 48 h, conforme Tabela 1. Apresenta-se, nesta tabela, o pior resultado que foi obtido para a estação pluviométrica de Fragosos com uma porcentagem de acerto de 58% para HP=24 h e 54% para HP=48h. O melhor resultado foi obtido para a estação de São Bento, com acertos de aproximadamente 70% para ambos os horizontes de previsão.

Para a escolha das datas a serem estudadas observou-se a quantidade de chuva prevista e se houve ocorrência de chuva, registrada nas estações

de monitoramento; além disso, foi observada a caracterização dos eventos de chuva para que fossem simuladas tanto chuvas frontais como convectivas. Assim foram selecionados 22 eventos.

Para cada data foi desagregado um par de dados, um com as previsões realizadas para o horizonte de 24 horas e o outro com as previsões realizadas para a mesma data, porém com 48 horas de antecedência. Com isso, para cada dia têm-se quatro mapas, dois com o campo previsto pelo modelo WRF e dois com o campo desagregado.

De todos os eventos simulados, apenas os dias 04/01/2006 (Figura 3) e 18/01/2006, ambos com horizonte de previsão de 48 horas, continham células com cobertura intermitente, no restante dos eventos todas as células eram cobertas plenamente com uma intensidade de chuva mínima.

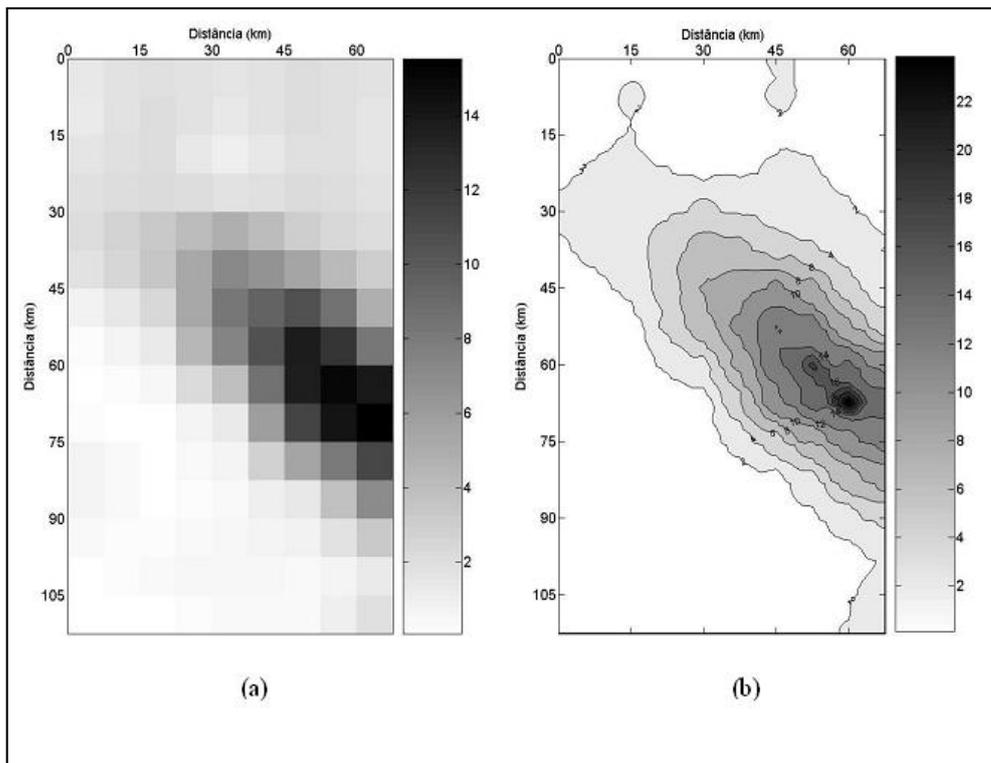


Figura 3 - (a) Chuva prevista pelo WRF e (b) Chuva desagregada pelo método de Skaugen em 04/01/2006 com horizonte de previsão de 48 horas.

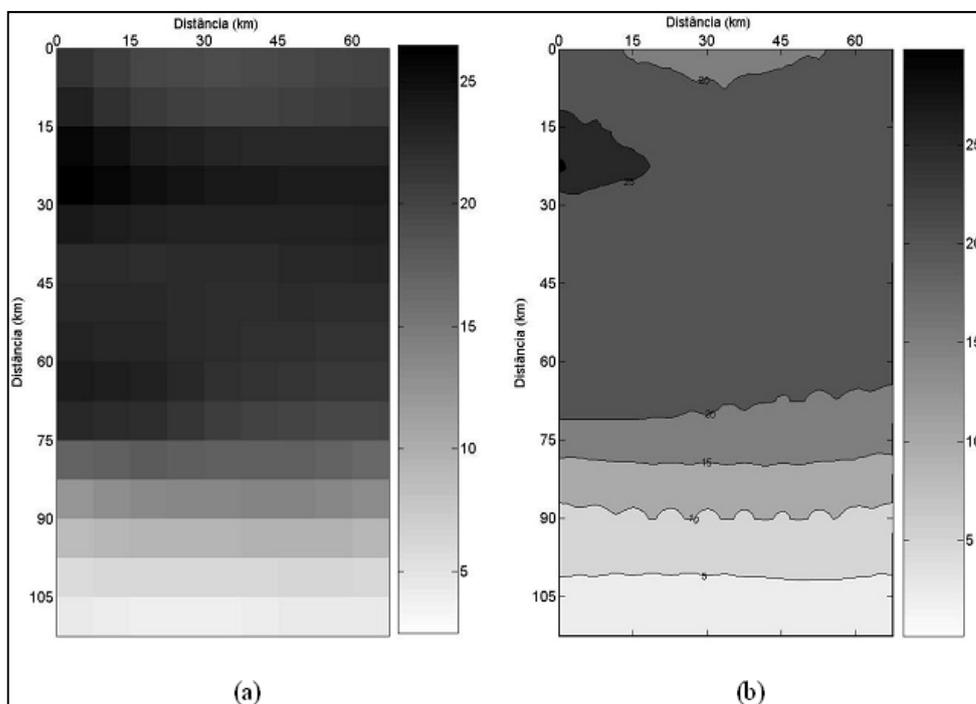


Figura 4 - (a) Chuva prevista pelo WRF e (b) Chuva desagregada pelo método de Skaugen em 01/10/2005 com horizonte de previsão de 24 horas – Chuva Frontal.

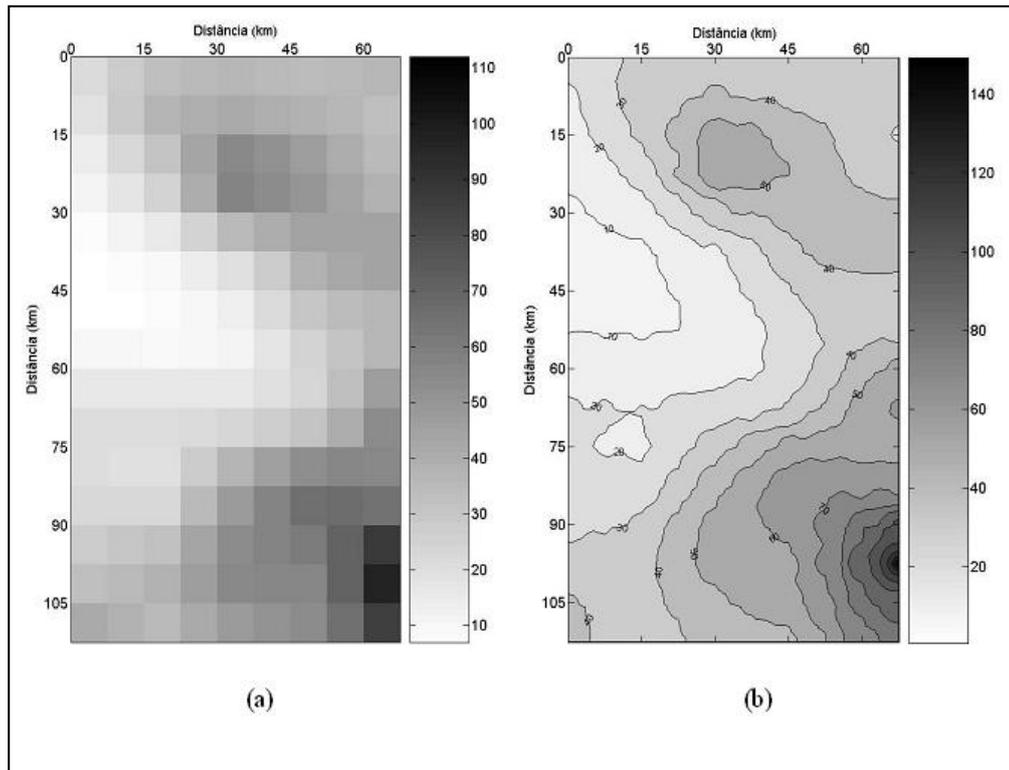


Figura 5 - (a) Chuva prevista pelo WRF e (b) Chuva desagregada pelo método de Skaugen em 22/01/2006 com horizonte de previsão de 24 horas – Chuva Convectiva.

As Figuras 4 e 5 representam os eventos de chuva ocorridos em 01/10/2005 e 22/01/2006 com horizonte de previsão de 24 h. As figuras ilustram os dois tipos de chuva, frontal e convectiva, respectivamente.

Observa-se que o campo de chuva é mais homogêneo para casos de chuva frontal (Figura 4) do que para casos de chuva convectiva, representado aqui pela Figura 5. Pode-se dizer que mais da metade do campo de chuva frontal é coberto pela mesma intensidade de chuva e as áreas com isoietas diferentes estão um pouco distantes, o que demonstra um evento mais uniforme.

RESULTADOS

Com a aplicação numérica realizada pôde-se constatar que o esquema de desagregação utilizado tem potencial para traduzir as propriedades estatísticas dos campos de precipitação: média espacial, variância espacial, intermitência e estrutura de correlação espacial para a bacia hidrográfica do rio Iguaçu, podendo, portanto ser utilizado em futuras aplicações de engenharia Hidrológica nesta região.

Para todos os eventos selecionados foi realizada uma análise estatística dos campos do modelo atmosférico WRF e dos campos de chuva desagregados pelo método de Skaugen. Foram considerados, para os campos desagregados valores médios de 10 simulações.

A análise dos parâmetros estatísticos considerou:

- o potencial do modelo de desagregação para reproduzir as médias da malha para todos os eventos selecionados;
- o comportamento do desvio padrão do campo de precipitação desagregado para todos os eventos;
- os erros padrão das médias das simulações;
- os erros padrão das médias para os valores máximos do campo de precipitação desagregado.

A média e o desvio padrão para toda a malha, para todos os eventos, são preservados pelo modelo de desagregação de Skaugen, com valores

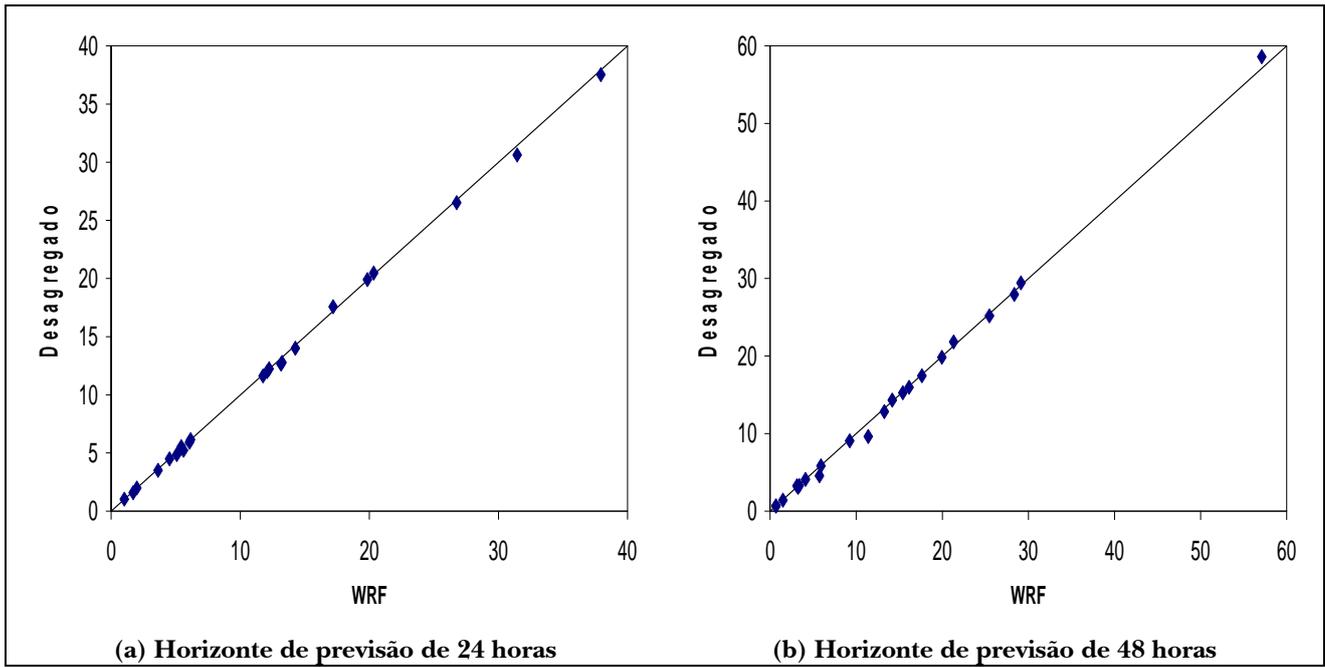


Figura 6 - Comparação entre a média (mm) do modelo WRF e do método de Skaugen

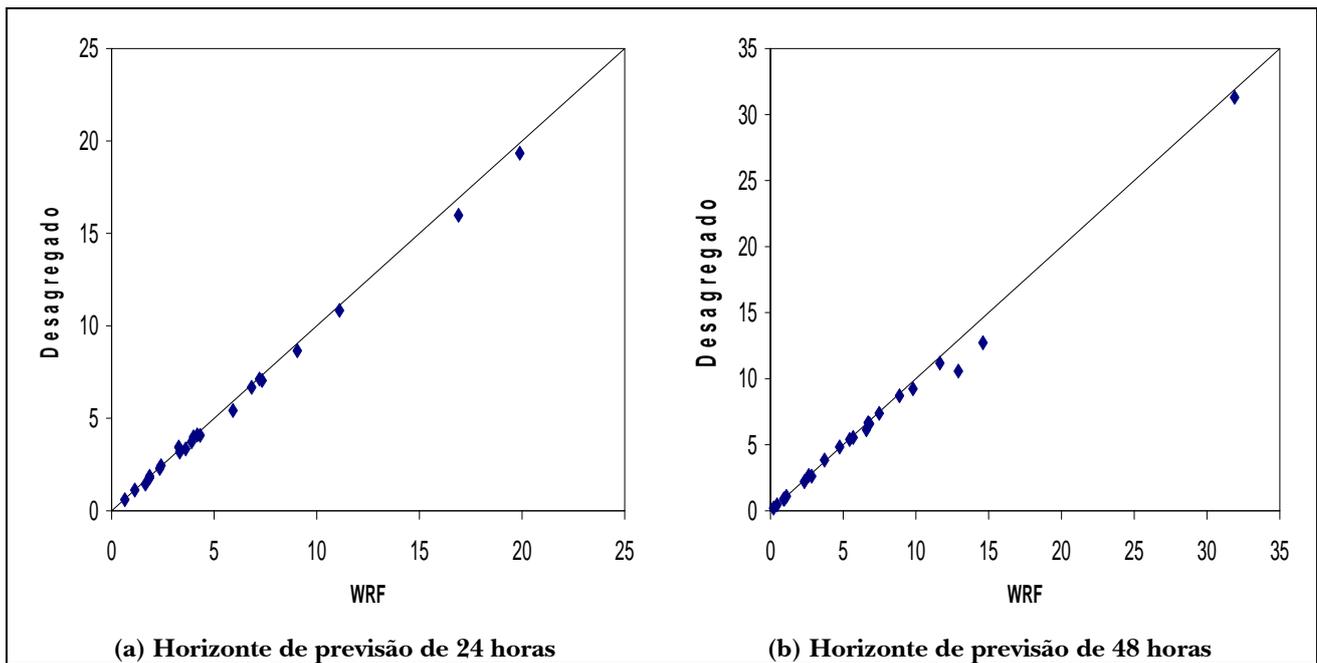


Figura 7 - Comparação entre o desvio padrão (mm) do modelo WRF e do método de Skaugen

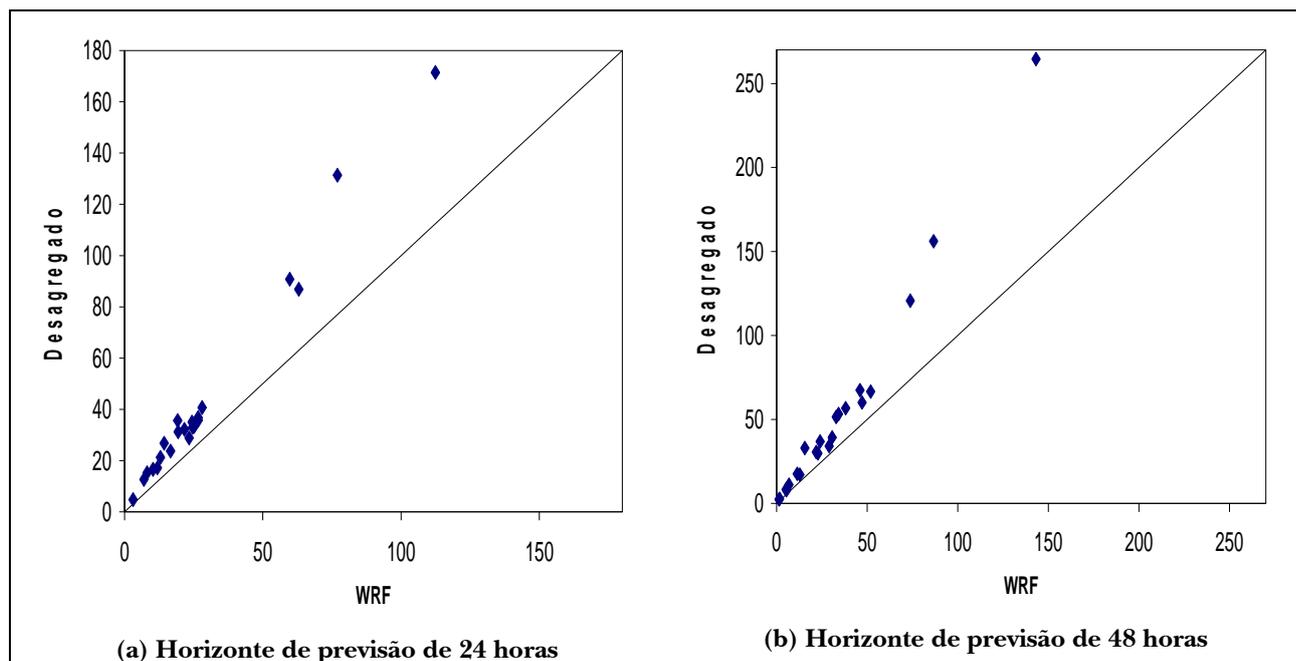


Figura 8 - Comparação entre os valores máximos (mm) do modelo WRF e do método de Skaugen

Tabela 2 – Estatística de eventos para o horizonte 24 h

Data	Fonte	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1/10/2005	WRF	17,20	7,33	26,6	2,40
	Desagregado	17,57 (0,0060)	7,04 (0,0029)	36,8 (1,2554)	2,30 (0,0023)
17/10/2005	WRF	26,77	11,10	63,0	13,30
	Desagregado	26,53 (0,0066)	10,83 (0,0118)	86,9 (2,0884)	13,5 (0,0018)
29/10/2005	WRF	1,71	1,65	8,10	0,10
	Desagregado	1,59 (0,0008)	1,44 (0,0038)	15,2 (0,4489)	0,10 (0,0002)
7/11/2005	WRF	14,27	3,90	26,60	8,50
	Desagregado	14,01 (0,0018)	3,73 (0,0033)	35,80 (0,8656)	8,40 (0,0031)
18/11/2008	WRF	1,99	2,35	13,00	0,00
	Desagregado	1,99 (0,0014)	2,29 (0,0033)	21,2 (1,1259)	0,00 (0,0000)
6/12/2005	WRF	13,15	16,9	77,00	1,60
	Desagregado	12,64 (0,0139)	15,98 (0,0295)	131,3 (6,7549)	1,60 (0,0009)
17/12/2005	WRF	6,07	1,85	14,30	3,40
	Desagregado	5,92 (0,0018)	1,78 (0,0054)	26,80 (2,3655)	3,30 (0,0016)
4/1/2006	WRF	6,16	3,61	19,20	0,30
	Desagregado	6,15 (0,0030)	3,34 (0,0072)	35,60 (1,5562)	0,20 (0,0007)
18/1/2006	WRF	5,60	5,91	24,40	0,10
	Desagregado	5,24 (0,0015)	5,42 (0,0030)	35,00 (0,9144)	0,10 (0,0001)

Valores entre parênteses representam o erro padrão da média

Tabela 3 – Estatística de eventos para o horizonte de 48 horas

Data	Fonte	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1/10/2005	WRF	0,69	0,21	1,4	0,3
	Desagregado	0,67 (0,0002)	0,2 (0,0003)	2,4 (0,0461)	0,3 (0,0001)
17/10/2005	WRF	29,13	9,8	46,1	6,4
	Desagregado	29,45 (0,0071)	9,23 (0,0056)	67,5 (1,7463)	6,2 (0,0040)
29/10/2005	WRF	13,26	6,6	34,2	6,8
	Desagregado	12,83 (0,0033)	6,13 (0,0054)	53,3 (1,9143)	6,7 (0,0013)
7/11/2005	WRF	5,9	2,34	11,4	1,7
	Desagregado	5,86 (0,0013)	2,21 (0,0019)	17,6 (0,4702)	1,6 (0,0004)
18/11/2008	WRF	1,48	0,97	5,2	0,1
	Desagregado	1,43 (0,0005)	0,9 (0,0013)	8,4 (0,3335)	0,1 (0,0003)
6/12/2005	WRF	11,4	14,61	73,9	0,9
	Desagregado	9,63 (0,0124)	12,72 (0,0201)	120,7 (6,4604)	0,5 (0,0030)
17/12/2005	WRF	19,95	6,72	38,2	10,2
	Desagregado	19,85 (0,0056)	6,66 (0,0049)	56,7 (0,6343)	10,2 (0,0013)
4/1/2006	WRF	3,11	3,72	15,6	0,0
	Desagregado	3,27 (0,0036)	3,84 (0,0075)	33,0 (2,5509)	0
18/1/2006	WRF	5,72	12,92	86,7	0
	Desagregado	4,56 (0,0102)	10,58 (0,0416)	156,1 (5,5394)	0

Valores entre parênteses representam o erro padrão da média

de erros padrões com magnitudes variando na 2ª ou 3ª casa decimal, o que indica um procedimento de simulação estável. As figuras 6 e 7 mostram uma comparação entre médias, desvios-padrão respectivamente para os campos desagregado pelo método de Skaugen e o campo gerado pelo modelo WRF para horizontes de previsão de 24 h e 48 h.

Para os valores de máximos (Figura 8), os erros calculados foram maiores, pois a variabilidade local é verificada pelos altos valores simulados, isso não implica em uma deficiência do modelo, mas sim na sua capacidade em gerar magnitudes e locais potenciais de ocorrência de valores máximos, o que é de importância fundamental para a Engenharia Hidrológica, especialmente para propósitos de previsão de cheias.

As tabelas 2 e 3 mostram respectivamente as análises estatísticas para alguns eventos com horizonte de previsão de 24 h e 48 h respectivamente. Os valores entre parênteses são os erros padrão das médias calculados pela relação $e = \sigma/\sqrt{n}$, onde σ é o desvio padrão das simulações do parâmetro calculado e n é o número de simulações realizadas. Os valores mínimos comparados entre o modelo e o método de Skaugen, mantêm uma estabilidade, confirmando os erros padrões das médias apresentados nas tabelas 2 e 3.

É interessante analisar a estrutura de correlação dos campos de chuva dos modelos atmosféricos e de desagregação. Este tipo de estudo permite verificar se a estrutura de correlação do campo desagregado reproduz a do campo do modelo atmosférico.

É possível analisar a estrutura de correlação dos diversos eventos estudados que pode variar muito em função do tipo de precipitação, frontal ou convectiva e do método de interpolação utilizado.

Para obtenção da correlação espacial é necessária a obtenção do semi-variograma, neste caso obtido pelo programa *Surfer 8.0, Golden Software, Inc.* O semi-variograma permite descrever quantitativamente a variação no espaço de um evento regionalizado.

A diferença entre a correlação espacial de uma precipitação frontal para uma convectiva é a taxa de decaimento. Para a chuva frontal (Figura 9), ela é menor, ou seja, a curva de correlação tem um ângulo de inclinação menor do que para chuvas convectivas. Outra observação importante é o fato de que a correlação decresce quanto maior for a distância entre os pontos. A correlação espacial foi analisada tanto para chuvas frontais ou convectivas, verificando-se que o método reproduz o campo do modelo atmosférico WRF para ambas as situações.

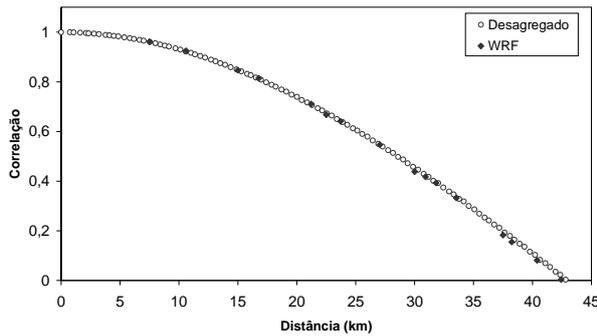


Figura 9– Correlação Espacial WRF e do campo desagregado - 01 de outubro de 2005

CONCLUSÕES

Verificou-se que o método de Skaugen pode ser utilizado na bacia hidrográfica do rio Iguaçu, tendo apresentado bons resultados. Através das desagregações de precipitação foram verificadas as estatísticas básicas para avaliar seu comportamento.

Foram analisadas a média e o desvio padrão do campo desagregado, onde se obteve um resultado favorável, pois o campo reproduziu os valores encontrados para o modelo atmosférico mesmo para uma bacia hidrográfica com características diversas da bacia para a qual o método foi definido. O erro padrão das médias também foi pequeno o que indica um procedimento de simulação estável.

Para os valores máximos, o método encontrou valores maiores do que os do WRF, porém isso era esperado, pois avalia a capacidade de prever a variabilidade local.

A correlação espacial também foi avaliada. Com ela é possível saber qual o tipo de chuva que o modelo prevê e verificar se o campo desagregado reproduz a correlação do campo do modelo atmosférico.

O método de desagregação proposto por Skaugen pode ser utilizado para futuras aplicações de Engenharia Hidrológica na bacia hidrográficas do rio Iguaçu com o modelo WRF.

Recomenda-se que as chuvas desagregadas neste estudo sejam comparadas com dados obtidos com radar meteorológico, que fornecem uma melhor estimativa da distribuição espacial da chuva. A área estudada está dentro do raio do radar meteorológico do SIMEPAR, onde as observações quantitativas de chuva ainda podem ser consideradas razoáveis.

AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece ao CNPq através do edital CT-Hidro pela ajuda financeira, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela oportunidade, ao SIMEPAR pelos dados do modelo WRF e a caracterização das chuvas e a Ângelo Breda pela ajuda na execução do mapa.

REFERÊNCIAS

- BIAOU A. De la méso-échelle à la micro-échelle: désagrégation spatio-temporelle multifractale des précipitations. *Thèse de doctorat*, ENSMP, France, 185 p. 2004.
- DNMI (The Norwegian Meteorological Institute) *HIRLAM documentation manual*, HIRLAM project. The Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway, 1996.
- HERRERA E., OUARDA T. et BOBEE B. Méthodes de désagrégation appliquées aux Modèles du Climat global Atmosphère-Océan (MCgAO), *Rev. Sci. Eau*, **19** (1), 297-312, 2006.
- KAPLAN, D.; GLASS, L. *Understanding Nonlinear Dynamics*, Springer, New York, 1995.
- LAPRISE, R. The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as independent variable, *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 197-207, 1992.
- LUZZI, R. *Tópicos em Termodinâmica Estatística de Processos Dissipativos*. Campinas, Ed. UNICAMP, 2000.
- MATYASOVZSKY, I. & BOGARDI, I., Downscaling two versions of a general circulation model (GCM) to estimate local hydroclimatic factors under climate change, *Hydrol. Sci. J.*, **41**(1), 117-130, 1996.
- MEHROTRA R. & SINGH, R.D. Spatial disaggregation of rainfall data, *Hydrol. Sci. J.*, **43**(1), 91-102, 1998.
- OLIVEIRA, A.C. Implementação do modelo atmosférico WRF acoplado com o modelo hidrológico TOPMODEL para a bacia de União da Vitória., *MSc Thesis* Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brazil, 2006.
- REYNAUD, F. Desagregação espacial da chuva prevista pelo modelo atmosférico WRF. Curitiba, UFPR 59 p. Dissertação (Mestrado), 2008.

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. *NCAR technical note*, 2005.

SKAUGEN, T. A Spatial disaggregation procedure for precipitation. *Hydrol. Sci. J.*, 47(6),943-957, 2002.

Applying The Skaugen Model For Spatial Disaggregation Of Rainfall In The Iguaçu River Basin

ABSTRACT

Skaugen's method of spatial disaggregation was applied to disaggregate rainfall forecasts using the atmospheric numerical forecasting model WRF –Weather Research and Forecasting, for an area in the Iguaçu river basin, in the state of Paraná, Brazil. This basin is very important because it is used in the Brazilian electrical grid system. The statistical disaggregation method proposes that spatial dependence is maintained by interpolation, and that precipitation is exponentially distributed. It can have two or three parameters according to whether the rain cover in the cells is intermittent or complete, respectively. The results found were satisfactory, and the grid mean and standard deviation were maintained. In addition, the values of the standard error of means were small, indicating stable simulation. The spatial correlation was analyzed, and the disaggregated events maintained the correlation structure of the WRF model forecasts.

Key-words: *precipitation; spatial disaggregation; exponential distribution; WRF model.*