

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/286450952>

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELO HIDROLÓGICO USANDO PESQUISA HARMÔNICA OPTIMIZATION OF HYDROLOGICAL MODEL PARAMETERS USING HARMONY SEARCH

ARTICLE *in* GEOCIENCIAS · JANUARY 2016

READS

1,286

5 AUTHORS, INCLUDING:



[Isabel Kaufmann de Almeida](#)

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

15 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

SEE PROFILE



[Aleska Kaufmann Almeida](#)

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

5 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

SEE PROFILE



[Cláudia Gonçalves Vianna Bacchi](#)

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

10 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

SEE PROFILE



[Teodorico Alves Sobrinho](#)

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

85 PUBLICATIONS 327 CITATIONS

SEE PROFILE

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELO HIDROLÓGICO USANDO PESQUISA HARMÔNICA

Isabel Kaufmann de ALMEIDA¹, Jorge Luiz STEFFEN¹, Aleska Kaufmann ALMEIDA¹,
Cláudia Gonçalves Vianna BACCHI¹, Teodorico ALVES SOBRINHO¹

(1) Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia – Cidade Universitária – Avenida Costa e Silva S/n°, Bairro Universitário, Campo Grande - MS, CEP 79070-900. Endereços eletrônicos: isabel.almeida@ufms.br; jorgeluzsteffen@gmail.com; aleska.kaufmann@gmail.com; claudiaviannabacchi68@gmail.com; teodorico.alves@ufms.br.

Introdução
Materiais e Métodos
Área de Estudo
Métodos Empregados na Construção do Modelo
Pesquisa Harmônica
O Modelo Chuva-vazão
Resultados e Discussão
Ajuste do Modelo
Conclusão
Referências Bibliográficas

RESUMO - A otimização de parâmetros de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, associados às características físicas e geomorfológicas da bacia hidrográfica, possibilita que esses modelos sejam aplicáveis em locais sem dados ou com dados escassos. Neste trabalho desenvolveu-se metodologia que utiliza a Pesquisa Harmônica para otimização dos parâmetros de um modelo do tipo chuva-vazão, visando à obtenção de hidrogramas em sub-bacias sem medição de níveis ou vazões. Para otimização dos parâmetros e avaliação do modelo, foram utilizados dados pluviométricos, fluviométricos e informações sobre as características físicas da bacia hidrográfica do Rio Aquidauana, localizada no Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil. Os resultados obtidos são promissores e demonstram que a metodologia aplicada é eficiente e de rápida convergência.

Palavras-chave: hidrologia, calibração, chuva-vazão.

ABSTRACT - The optimization of rainfall-runoff model parameters as a function of physical and geomorphic features of the hydrological basins makes these models applicable to areas with few or even null data availability. This paper describes a method that uses the Harmony Search algorithm to optimize the parameters of a rainfall-runoff model and obtain watershed hydrographs for areas with unavailable database on water level or discharge database. The streamflow and rainfall data used were obtained from the Aquidauana River Watershed (MS, Brazil). Information on the physical characteristics of the basin was also used to optimize model parameters and evaluate the method. The results obtained were promising, indicating that the method used is efficient and has rapid convergence.

Keywords: hydrology, calibration, rainfall-runoff.

INTRODUÇÃO

Projetos de aproveitamento e controle dos recursos hídricos, frequentemente recaem em locais com ausência de dados observados. Dados de vazão são necessários na gestão bem sucedida dos recursos hídricos, no desenvolvimento de políticas para utilização de água e na solução de diversos problemas ambientais e de engenharia. Dorum *et al.* (2010) afirmam que quando não se obtém esses dados, torna-se necessário o desenvolvimento de modelos que possibilitem a sua previsão.

Para Kumar *et al.* (2005), a relação chuva-vazão é um dos mais complexos fenômenos hidrológicos de se compreender devido à imensa variabilidade espacial e temporal das características das bacias hidrográficas, dos padrões de precipitação e do número de variáveis envolvidas na modelagem do processo físico. Os modelos hidrológicos do

tipo chuva-vazão possibilitam a obtenção de séries de vazões partindo da série de registros de precipitação, bem como a previsão de vazões em locais desprovidos de informações. O entendimento do conjunto de processos físicos que ocorrem na bacia é indispensável para a interpretação dos resultados obtidos, suas limitações e sua aplicabilidade em outras regiões.

De acordo com Vrugt *et al.* (2006), a capacidade de previsão de vazão dos modelos hidrológicos aumentou em decorrência da calibração dos parâmetros. Segundo Dakhlaoui *et al.* (2012), nas últimas décadas o desenvolvimento da informática contribuiu para a implementação da calibração automática de modelos hidrológicos, sendo, na maioria dos casos, as estratégias de calibração automática baseadas em algoritmos de otimização.

A Pesquisa Harmônica (HS) é um algoritmo de otimização e busca inspirado na harmonia entre os instrumentos de um conjunto musical, ao serem utilizados simultaneamente (Kim *et al.*, 2001). Originalmente proposto por Geem *et al.* (2001), esse algoritmo compara a busca da perfeita harmonia musical com a busca da solução ótima, determinada pela função objetivo. O algoritmo HS tem sido aplicado em vários problemas de otimização, incluindo projeto estrutural (Saka, 2007), análise da estabilidade geotécnica (Cheng *et al.*, 2008), projeto de rede de água (Geem, 2009a), gestão de águas subterrâneas (Ayvaz, 2009) e

estimativa de parâmetro de modelo hidrológico (Geem, 2011).

Neste trabalho desenvolveu-se metodologia que utiliza a Pesquisa Harmônica para a otimização dos parâmetros de um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão, visando à obtenção de hidrogramas em sub-bacias sem medição de níveis ou vazões. Para a otimização dos parâmetros e avaliação do modelo, foram utilizados dados físicos da bacia hidrográfica do Rio Aquidauana, localizada no Estado de Mato Grosso do Sul, registros de precipitação em sete postos influentes e vazão observada na seção exutória.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Rio Aquidauana é uma sub-bacia do Rio Miranda e está totalmente localizada em território brasileiro, no Estado de Mato Grosso do Sul. A parte afluyente à secção da Ponte do Grego, cujas coordenadas são: Latitude (-20°09'24") e Longitude (-55°05'24"), possui área total de

6.369 km² e extensão de 162,8 km no canal principal de drenagem. Foi escolhida como área de estudo, devido à existência de dados fluviométricos observados, de registros pluviométricos em sete postos influentes na área de drenagem (Tabela 1) e disponibilidade de informações de suas características físicas.

Tabela 1. Informações dos postos pluviométricos e fluviométrico na bacia do Rio Aquidauana.

Postos	Estação	Área de Influência na Bacia (km ²)	Porcentagem da Área Total (%)
Ponte do Grego	Fluvial	6.369,1	100,00
Bandeirantes	Pluvial	1.109,5	17,42
Cipolândia	Pluvial	22,9	0,36
DNOS – 8 - DRS	Pluvial	641,4	10,07
Jaraguari	Pluvial	780,9	12,26
Rio Negro	Pluvial	549,0	8,62
Rochedo	Pluvial	2.635,5	41,38
São Gabriel do Oeste	Pluvial	629,9	9,89

Métodos Empregados na Construção do Modelo

Usou-se o modelo de discretização da bacia em forma de “V”, pela transformação da superfície em planos de escoamento retangulares, considerando a largura e a declividade constantes para cada lado do canal, consoante a Steffen *et al.* (2014). Alimentou-se o modelo com dados físicos do canal (comprimento, declividade e rugosidade) e dos planos (largura, declividade, rugosidade e precipitação efetiva nos dois planos laterais ao canal). Para determinação dos coeficientes de rugosidade de Manning nos planos e no canal, fez-se o enquadramento dos tipos de solo e vegetação encontrados na bacia com base em

inspeções locais e nos mapas disponíveis (Mato Grosso do Sul, 1990) e adotaram-se os correspondentes valores tabelados, de acordo com Cruciani (1989). Preliminarmente, conforme os diferentes tipos e coberturas de solo que compõem as sub-bacias foram atribuídos valores tabelados em Tucci (2009) para o parâmetro curva número (CN). A seguir, calculou-se a média ponderada desses valores, levando-se em conta as áreas de ocorrência correspondentes. Os dados fornecidos ao modelo foram sequenciados na forma hierárquica do escoamento nas sub-bacias, de modo a definir as contribuições das sub-bacias de montante. Admitiram-se diferentes níveis de discretização espacial, possibilitando a melhor

avaliação do escoamento superficial, sendo o levantamento dos dados físicos realizado para cada nível. Ao discretizar a bacia em 100, 24, 11 e 4 sub-bacias, buscou-se a homogeneidade das sub-bacias discretizadas no que se refere à rugosidade, declividade e precipitação efetiva.

Analysaram-se os dados históricos de vazões disponíveis na seção de estudo, possibilitando a escolha de eventos isolados de cheia com os correspondentes registros de chuva nos postos pluviométricos influentes. Utilizou-se o Método dos polígonos de Thiessen para a determinação da precipitação média sobre as sub-bacias e adotou-se a Metodologia do National Resources Conservation Service – NRCS para determinação da precipitação efetiva, equações (1 a 3):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1)$$

$$I_A = \beta \cdot S \quad (2)$$

$$P_{EF} = \frac{(P - I_A)^2}{P - I_A + S} \quad (3)$$

Onde P_{EF} é a precipitação efetiva (mm), P é a precipitação acumulada desde o início do evento (mm), I_A representa as perdas iniciais de precipitação (mm), S é a capacidade máxima de retenção de água do solo (mm), β é a porcentagem de abstrações iniciais e CN o parâmetro curva número.

Admitindo-se que possa haver intervalo de variação em torno dos valores tabelados para CN , para os coeficientes de rugosidade e para β , definiu-se limite inferior e limite superior para esse intervalo no processo de otimização.

Pesquisa Harmônica

Adotou-se o algoritmo Pesquisa Harmônica, (Geem, 2009b; Geem & Roper, 2010) para otimização dos parâmetros do modelo. Na implementação do método, elaborou-se programa computacional em planilha eletrônica contendo rotinas para gerar aleatoriamente NMH (número de elementos na Memória Harmônica) conjuntos para as “n” variáveis que representam os parâmetros do modelo. A harmonia de cada conjunto de parâmetros gerados é obtida pela função objetivo (F_{OBJ1}) que é o erro quadrático médio (EQM) entre os

valores observados (V_{OBS}) e os valores simulados (V_{SIM}) para o referido conjunto, equação (4):

$$F_{OBJ1} = EQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (v_{OBS}(n) - v_{SIM}(n))^2} \quad (4)$$

A seguir, todos os conjuntos de parâmetros foram ordenados pelo valor crescente da função objetivo, definindo a Memória Harmônica (MH) e dando início à fase de iterações. Nessa fase, gerou-se aleatoriamente novo conjunto de parâmetros com base na taxa de consideração de 90% (valor pré-estabelecido) dos valores contidos na Memória Harmônica ordenada, resultando em uma nova harmonia. Essa harmonia foi inserida em uma posição de ordem na MH, sendo descartada a última harmonia do *ranking*. Na sequência, novas harmonias foram produzidas, avaliadas e ranqueadas, repetindo-se o ciclo até satisfazer o critério de parada referente ao número de iterações (NIT) previamente estabelecido.

O Modelo Chuva-vazão

Aplicou-se o Modelo da Onda Cinemática (Tucci, 2005; Wang *et al.*, 2011; Steffen *et al.*, 2014) para propagar a precipitação efetiva na superfície e nos canais das sub-bacias. Para simular o processo de transformação de chuva em vazão, com otimização de parâmetros, elaborou-se rotina de cálculo que foi alimentada com os dados físicos e pluvio-fluviométricos dispostos em planilha eletrônica, previamente ajustada no que se refere à discretização da bacia e a possíveis contribuições de montante, obtendo-se, para o evento em questão, a vazão simulada (Q_{SIM}). No hidrograma observado (Q_{OBS}) referente a cada evento, fez-se a separação do escoamento de base (Q_{BASE}), obtendo a vazão corrigida (Q_{COR}) relativa ao escoamento superficial para os “n” valores da série. Através da função objetivo (F_{OBJ2}) buscou-se minimizar a raiz do erro quadrático médio em relação à vazão média dos dados corrigidos \bar{Q}_{COR} , equação (5):

$$F_{OBJ2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{COR}(i) - Q_{SIM}(i))^2}{\frac{n}{\bar{Q}_{COR}}}} \quad (5)$$

Para avaliar o desempenho do modelo proposto foram realizados diversos testes e

simulações com os eventos selecionados, para diferentes níveis de discretização da bacia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizou-se Memória Harmônica de NMH = 100 valores gerados aleatoriamente para 10 valores recomendáveis de CN, um valor do coeficiente de rugosidade n_s para as superfícies e um valor de n_c para os canais, além de um valor porcentual β da máxima capacidade de

armazenamento S do método NRCS e que define a abstração inicial, totalizando treze variáveis. Estipulou-se uma faixa de variação com limites inferior e superior, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Limites inferior e superior das variáveis para otimização.

Lim _{INF}	Lim _{SUP}
21	31
31	41
20	30
57	67
41	51
47	57
55	65
54	64
69	79
63	73
0,01	0,05
0,01	0,10
0,01	0,20

Escreveu-se uma rotina de geração de números aleatórios para a leitura dos limites estabelecidos para cada variável e a geração de um valor entre estes limites, dentro de uma Memória Harmônica com NMH=10 (Tabela 3) até 200 valores para cada uma das treze variáveis envolvidas no processo de simulação e do número de iterações NIT= 400.

A cada vez, uma linha da Memória Harmônica foi processada e os valores, nela constantes, foram transportados automaticamente para cinco planilhas, denominadas “CN_100”, “CN_26”, “CN_11”, “CN_4” e “CN_1”, todas interligadas e contendo as informações necessárias ao cálculo da precipitação efetiva.

Tabela 3. Valores gerados para as variáveis com Memória Harmônica de 10 valores.

Variáveis NMH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	26	35	22	63	45	49	60	61	72	66	0,01	0,01	0,01
2	29	34	28	57	44	56	58	54	70	69	0,02	0,02	0,02
3	24	33	25	62	50	50	63	63	77	64	0,01	0,01	0,01
4	25	39	28	57	43	48	62	54	73	70	0,01	0,01	0,01
5	29	37	22	61	45	51	60	56	69	65	0,04	0,04	0,04
6	21	31	23	61	45	50	62	54	78	69	0,02	0,02	0,02
7	24	38	22	60	47	55	57	58	71	72	0,03	0,03	0,03
8	30	40	24	58	45	48	57	61	71	67	0,02	0,02	0,02
9	27	37	20	62	50	55	62	63	71	68	0,04	0,04	0,04
10	28	40	23	59	49	55	60	62	69	64	0,04	0,04	0,04

Na Tabela 4 observa-se parte da planilha “CN_1” referente à simulação da discretização

espacial como uma bacia, formada pelos planos à direita e à esquerda e um canal central. Na 4ª

coluna entram os valores de CN. Com as porcentagens de área, relativas a diferentes tipos e usos de solo compõem-se o CN médio para a determinação da capacidade máxima de retenção S. Na 10ª coluna é inserido o valor da precipitação acumulada para o intervalo de tempo em consideração, que foi ponderada, entre os diversos postos influentes na sub-bacia. A última coluna refere-se ao valor da precipitação efetiva calculada e acumulada

dentro do período considerado. Os valores acumulados da precipitação efetiva foram posteriormente desacumulados, dia a dia, para formar os hietogramas de chuva efetiva relativamente aos planos de cada uma das sub-bacias. A variável β , que também foi gerada aleatoriamente, é utilizada para definir a precipitação efetiva acumulada até o momento considerado.

Tabela 4. Planilha “CN_1” para cálculo da precipitação efetiva (uma bacia).

Caracterização das áreas das bacias quanto ao tipo e uso do solo.							P - Precipitação total		$\beta=0,02$	
Bacias (nº)	Lado	Área (Km²)	Coef. CN	Área parcial	Área%	CN médio	S	$\beta*S$	P (mm)	P.ef. (mm)
1	LD	4985,1	36,8	1.259,4	25,3	31	570,7	11,4	64,3	4,5
			28,9	1.069,4	21,5					
			28,3	1.231,9	24,7					
			29,1	1.424,4	28,6					
	LE	1383,9	36,7	403,4	29,1					
			32,9	267,1	19,3					
			32,3	486,2	35,1					
			28,1	227,3	16,4	33	515,9	10,3	79,1	8,1

Posteriormente, fixou-se a geração da Memória Harmônica com 100 conjuntos de variáveis e um número de iterações entre 100 e 400. A cada resultado obtido, foram selecionados os 10 melhores conjuntos ordenados e adotou-se o menor valor de cada variável como seu limite inferior e o maior valor como seu limite superior para uma nova geração. Prosseguiu-se até que os valores das variáveis se tornassem constantes, definindo então o ajuste do método de otimização.

Preparou-se a planilha denominada “simulação” para receber os dados dos planos e do canal de cada sub-bacia, bem como a chuva em cada intervalo de tempo, gerar o escoamento superficial nos planos e propagar o escoamento concentrado nos canais. O ordenamento correto das bacias foi indispensável para o cálculo, sendo inicialmente calculados os hidrogramas nas

bacias de primeira ordem e estes utilizados como condição de contorno para o cálculo das bacias de ordens maiores. Observou-se que os valores iniciais para solução do método numérico do Modelo da Onda Cinemática apresentam certa sensibilidade, provocando alterações na resposta que podem ser consideradas significativas.

Para determinar os intervalos de chuvas, foram escolhidos seis eventos com hidrogramas bem definidos e que constam da planilha “Evento”. Retiraram-se dos hidrogramas os volumes correspondentes ao escoamento de base, permanecendo apenas os volumes escoados superficialmente, a fim de comparar aos volumes obtidos para precipitação efetiva. Na planilha elaborada constam células para entrada de informações sobre o evento desejado e o número de sub-bacias para a simulação, tal como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Escolha do evento e número de sub-bacias para a simulação

Evento (1 a 6) =	4	Início :	10/12/1995	Fim :	03/01/1996
Num de Postos =	7	Número de Sub-Bacias? =	1		
		Dias de chuva =	13		
		Dias de vazão =	13		

O acionamento de comando, específico para a leitura dos dados referentes ao “Evento”, disponibiliza as datas de início e fim do evento escolhido, os dias de chuva e a duração do hidrograma. Os valores de precipitação foram dispostos na planilha para os sete postos e acumulados dia a dia para toda a duração do evento.

Ajuste do Modelo

Para ajuste do modelo, escolheu-se o Evento 2 apresentado na Tabela 6, com 25 dias de vazões e respectivas chuvas registradas no período para os sete postos influentes.

Tabela 6. Chuvas (mm) e vazões ($m^3.s^{-1}$) observadas nos postos para o Evento 2.

Data	Jaraguari	DNOS	Bandeirantes	Rio Negro	Rochedo	São Gabriel	Cipolândia	Ponte do Grego
16-abr-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	54,7
17-abr-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	56,8
18-abr-95	0,0	15,2	0,0	0,8	73,0	50,0	0,0	76,6
19-abr-95	0,0	24,6	18,0	19,2	0,0	20,5	82,8	214,0
20-abr-95	0,0	16,0	0,0	4,2	15,6	0,0	4,3	149,0
21-abr-95	0,0	5,6	0,0	7,0	0,0	0,0	0,0	146,0
22-abr-95	0,0	0,0	26,3	0,0	0,0	0,0	0,9	118,0
23-abr-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,1
24-abr-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	75,4
25-abr-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	69,5
26-abr-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	65,5
27-abr-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	63,8
28-abr-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	62,7
29-abr-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	61,6
30-abr-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	60,5
1-mai-95	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	60,0
2-mai-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	58,9
3-mai-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	57,3
4-mai-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	57,3
5-mai-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	55,2
6-mai-95	0,0	4,8	11,0	0,0	0,0	0,0	27,4	66,6
7-mai-95	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	69,5
8-mai-95	0,0	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	66,1
9-mai-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	61,6
10-mai-95	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	58,9

O resultado do ajuste está demonstrado na Figura 1 atendendo à função objetivo dada pela Equação (5), após 100 iterações. Apesar da semelhança verificada quanto aos volumes escoados, tanto para o hidrograma corrigido quanto para o hidrograma simulado, observam-se certas diferenças quanto aos valores das vazões de pico e quanto aos tempos de ocorrência destas vazões entre o evento corrigido e sua simulação.

Ressalta-se que, dos sete postos utilizados para o cálculo da precipitação média sobre a bacia, quatro encontram-se fora dos limites da mesma e dois estão localizados muito próximos da seção exutória. Dessa forma, eventos consideráveis de precipitação podem ser detectados em postos de medição sem, no

entanto, alterar a vazão na seção de interesse. Por outro lado, devido à distância entre os postos pluviométricos, há grande possibilidade de ocorrência de alturas significativas de chuva entre os mesmos, sem que tais valores sejam registrados, significando importantes alterações no hidrograma. Tais acontecimentos possibilitam a geração de ietogramas não verdadeiros de chuva efetiva, acarretando hidrogramas simulados distorcidos.

Nesse contexto, entende-se que resultados mais precisos seriam obtidos em estudos realizados em bacias melhor monitoradas e mais bem ajustadas no que se refere à disposição dos equipamentos de medição de chuva e vazão.

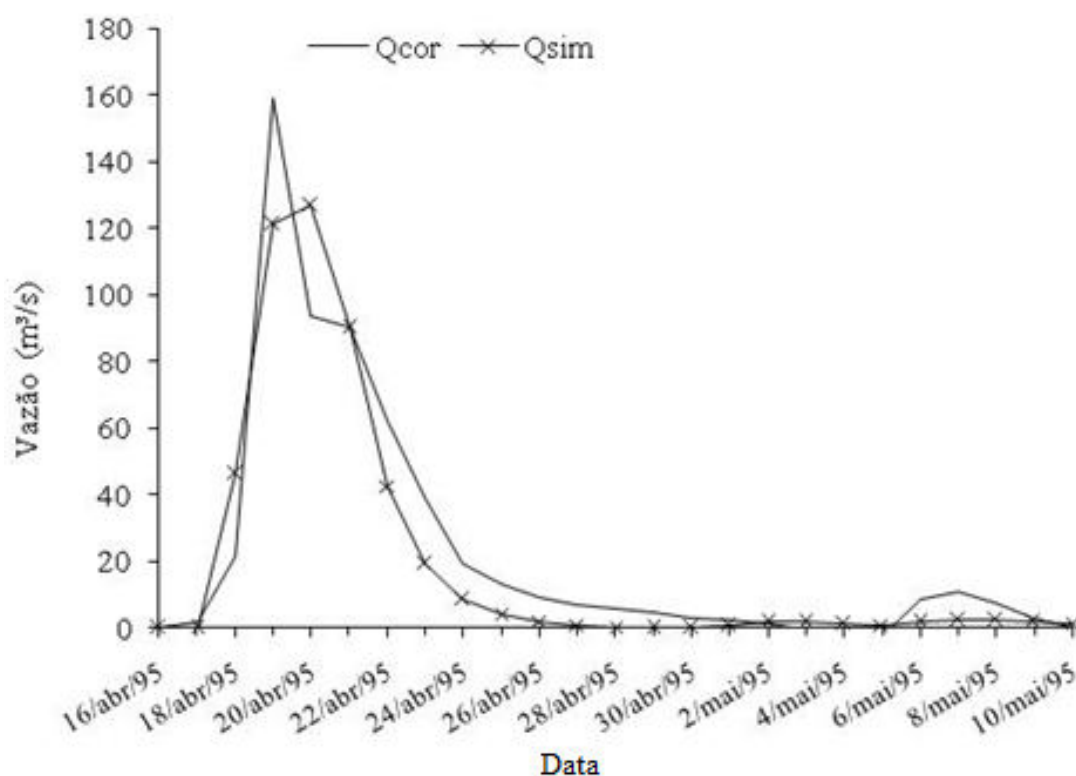


Figura 1. Hidrogramas observado e calculado para ajuste do Evento 2.

CONCLUSÕES

No modelo da onda cinemática, ao discretizar as equações diferenciais que regem o escoamento, deve-se ter cautela na escolha dos intervalos espaciais e de tempo para não prejudicar a convergência do modelo. Os valores iniciais das vazões apresentam certa sensibilidade no processo de cálculo, modificando o resultado do modelo. O algoritmo Pesquisa Harmônica, empregado na otimização dos parâmetros do modelo hidrológico, é bastante eficiente e de rápida convergência, justificando sua aplicação. No entanto, o número de conjuntos de variáveis dentro da Memória Harmônica não pode ser muito pequeno para que haja uma maior

possibilidade de combinação entre os valores das variáveis. Se a Memória Harmônica for muito extensa, pode aumentar o tempo de convergência da solução. Uma vez ajustados os valores dos parâmetros para uma única bacia, utilizando o hidrograma observado na seção exutória, é possível obter hidrogramas para todas as sub-bacias em que a área total foi discretizada. O modelo proposto é de grande utilidade nas regiões desprovidas de postos de observação de níveis ou de medição de vazões, onde se pretende fazer gerenciamento dos recursos hídricos, outorga de vazões e obras hidráulicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AYVAZ, M. T. Application of harmony search algorithm to the solution of groundwater management models. *Advances in Water Resources*, v. 32, n. 6, p. 916 – 924, 2009.
2. CHENG, Y. M., LI, L., LANSIVAARA, T., CHI, S. C., and SUN, Y. J. An improved harmony search minimization algorithm using different slip surface generation methods for slope stability analysis. *Engineering Optimization*, v.40, n. 2, p. 95–115, 2008.
3. CRUCIANI, D. E. A drenagem na agricultura. 4 ed. São Paulo. Ed. Nobel, 337 p., 1989.
4. DAKHLAOUI, H., BARGAOUI, Z., BÁRDOSSY, A. Toward a more efficient Calibration Schema for HBV rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, v. 444–445, p. 161–179, 2012.
5. DORUM, A., YARAR, A., SEVIMLI, M. F., MUSTAFA ONUCYILDIZ, M. Modelling the rainfall-runoff data of Susurluk basin. *Expert Systems with Applications*, v. 37, p. 6587–6593, 2010.
6. GEEM, Z.W., KIM, J.H. and LOGANATHAN, G.V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, v. 76, n. 2, p. 60–68, 2001.
7. GEEM, Z. W. Particle-swarm harmony search for water network design. *Engineering Optimizattion*, v. 41, n.4, p. 297–311, 2009 a.

8. GEEM, Z. W. Music-Inspired Harmony Search Algorithm: Theory and Applications. Berlin. Springer-Verlag. 300 p, 2009 b.
9. GEEM, Z.W. and ROPER, W.E. Various continuous harmony search algorithms for web-based hydrologic parameter optimisation, International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, v. 1, n. 3, p.213–226, 2010.
10. GEEM, Z. W. Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model Using Parameter-Setting-Free Harmony Search. Journal of Hydrologic Engineering, v. 16, n. 8, p. 684 – 688, 2011.
11. KIM, J. H.; GEEM, Z. W.; KIM, E. S. Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model using Harmony Search. Journal of the American Water Resources Association, v. 37, n. 5, p. 1131 – 1138, 2001.
12. KUMAR, A.R.S., SUDHEER, K.P., JAIN, S.K., AGARWAL, P.K., Rainfall-runoff modeling using artificial neural networks: comparison of network types. Hydrological Processes, v. 19, n. 6, p. 1277–1291, 2005.
13. MATO GROSSO DO SUL. Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral. Atlas multirreferencial do Estado do Mato Grosso do Sul. Campo Grande: Governo Estadual; Fundação IBGE, 1990.
14. SAKA, M.P. Optimum geometry design of geodesic domes using harmony search algorithm. Advances in Structural Engineering, v. 10, n. 6, p.595–606, 2007.
15. STEFFEN, J. L.; ALMEIDA, I. K. ; COSTA NETO, J. F. ; ALVES SOBRINHO, T. . Simulação do escoamento superficial em bacia hidrográfica. Geociências (São Paulo. Online), v. 33, p. 147-156, 2014.
16. TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. 2 ed. Porto Alegre. Ed. UFRGS, 669p., 2005.
17. TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4.ed. Porto Alegre. Ed. UFRGS, 944p., 2009.
18. VRUGT, J. A., H. V. GUPTA, S. C. DEKKER, S. SOROOSHIAN, T. WAGENER, and W. BOUTEN. Application of stochastic parameter optimization to the Sacramento soil moisture accounting model. Journal of Hydrology, v. 325, n. 1-4, p. 288-307, 2006.
19. WANG, L.L., D.H. CHEN, D. H., LI, Z. J., ZHAO, L.N. Coupling Green-Ampt infiltration method and two-dimensional kinematic wave theory for flood forecast in semi-arid catchment. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, v. 8, n. 4, p. 1812-2108, 2011.

*Manuscrito recebido em: 18 de Maio de 2014
Revisado e Aceito em: 28 de Agosto de 2015*