

Calibração de Modelos Hidrológicos para Bacias Urbanas Empregando Algoritmos de Otimização Multiobjetivo

Mariana Marques Teixeira, Klebber T M Formiga

UFG, CEP, Brasil

marianamarquesteixeira@gmail.com, klebber.formiga@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE: modelos hidrológicos, bacias urbanas, otimização multiobjetivo, algoritmos evolucionários

1 INTRODUÇÃO

A maior parte das regiões metropolitanas no mundo é caracterizada pelo contínuo aumento das áreas impermeáveis no meio urbano. O aumento desta impermeabilização acarreta o acréscimo do volume escoado, e conseqüentemente, das vazões máximas no sistema de drenagem, o que pode causar sérios prejuízos aos meios natural e modificado. Para evitar um aumento da degradação destes meios, têm-se buscado formas de reduzir o volume escoado e os picos de vazões de cheias. Para a implementação destas medidas é necessário, a priori, avaliar o efeito das possíveis modificações a serem feitas, e conseqüentemente as soluções mais eficientes para cada situação. Uma das formas mais empregadas para se fazer esta análise é por meio do uso de modelos matemáticos para as bacias urbanas (LIONG E YBRAHIM, 1994).

A modelação destaca-se como uma ferramenta imprescindível no que tange às questões hídricas em geral, e principalmente na avaliação de cheias de projeto, pois possibilita uma ampla abordagem sobre os principais mecanismos e interações que se desenvolvem em uma área urbana. Através dos modelos matemáticos, é possível compreender algumas propriedades dos sistemas, prever suas reações a estímulos e estimar as capacidades de escoamento da rede de drenagem existente ou a ser projetada. Essas ferramentas também permitem antever os impactos decorrentes de inúmeros cenários hipotéticos, o que possibilita fundamentar as decisões de gestão de bacias tomadas por seus responsáveis legais (SILVA, 2007).

A solução numérica do fluxo da água nos sistemas de drenagem urbana é uma ferramenta indispensável no planejamento, projeto, operação e manutenção destes sistemas. Nos últimos anos, devido ao grande aumento da capacidade de processamento dos computadores, além do melhor refinamento dos modelos hidrológicos surgiram várias

abordagens mais sofisticadas e complexas do problema, o que provocou um novo desafio aos modeladores, uma vez que estes novos modelos permitem configurações mais realísticas e, com isso, resultados mais confiáveis. Porém tais modelos exigem melhores qualidades e quantidades de informações quando se compara com métodos tradicionais (BARCO ET AL. 2008).

A criação de um modelo de drenagem urbana envolve as seguintes etapas: 1) identificação das características superficiais da bacia, principalmente em termos de áreas impermeabilizadas, inclinação do terreno e uso do solo; 2) determinação das coordenadas, dimensões e características de todas as tubulações e estruturas associadas. 3) definição dos parâmetros hidráulicos e hidrológico dos diversos componentes do modelo.

Nas duas primeiras etapas, normalmente se utilizam, hoje em dia, procedimentos baseados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (LIONG ET AL., 1995). Devido à complexidade do sistema estudado, e em virtude das inevitáveis simplificações de modelos matemáticos que os descrevem, alguns parâmetros devem ser determinados experimentalmente através de observações de campo, enquanto que outros podem ser estimados com base nas características da bacia. (RAUCH E HARREMOES, 1999).

A determinação destes parâmetros necessita de um modelo de calibração, ou seja, um método eficiente de se determinar um conjunto de parâmetros que minimizem, ou maximizem, alguns critérios que expressam o grau de concordância entre o modelo simulado e medidos dados medidos em campo (GUPTA E SOROOSHIAN, 1985).

Do ponto de vista prático, o principal objetivo do modelo de calibração é encontrar um único conjunto de parâmetros que representem o sistema. No entanto vários pesquisadores (KUCZERA E PARENT, 1998; SAVENIJE, 2001) têm salientado que este conjunto único é difícil de alcançar. Este ponto de vista contradiz diretamente a principal diretiva dos modelos de calibração, Beven (2001; 2006) preconiza o abandono destes modelos em favor de uma nova abordagem denominada de equifinality, é o princípio proposto por Bertalanffy (1968) segundo o qual um determinado estado de um sistema complexo pode ser encontrado por diferentes formas. Este método usa conceitos de máxima verossimilhança para avaliar a adequabilidade dos parâmetros do modelo, empregando um grande número de conjuntos de parâmetros para esta avaliação. Este método sofre, no entanto de grandes restrições práticas uma vez que requer quantidades de processamento muito elevadas, mesmo para os computadores atuais (KHU E

MADSEN, 2004).

Nos últimos anos, o processo de calibração a partir da abordagem de tentativa-e-erro, que consistia em se efetuar pequenas modificações nos parâmetros do modelo, um de cada vez, foi substituído pela calibração automática, mais adequada aos modelos hidrológicos de múltiplos parâmetros, que emprega técnicas de otimização para solucionar o problema (GUPTA, ET AL. 1998). Ao mesmo tempo em que houve esta mudança de filosofia na calibração surgiu a necessidade de se encontrar medidas que melhor expressassem o grau de aptidão dos parâmetros do modelo em representar o sistema. Na década de 1970 e 1980, uma série de trabalhos de investigação sobre os critérios adequados modelo de comparação foram publicados (JOHNSTON E PILGRIM, 1976; GUPTA E SOROOSHIAN, 1985). Esta necessidade é ainda mais ampliada quando modelo de calibração é automática porque a maior parte dos algoritmos de calibração automática exige uma definição unívoca modelo de desempenho.

Os primeiros métodos de otimização empregados na calibração automática de modelos eram baseados em técnicas tradicionais que empregam derivadas (GUPTA E SOROOSHIAN, 1985), estes métodos apresentam problemas de encontrar o ótimo global do sistema e são muito dependentes da estimativa inicial. Para se superar este problema, passou-se a empregar métodos mais robustos baseados como o algoritmo SCE - Shuffled Complex Evolution – (DUAN ET. AL, 1992; COLLISCHONN e TUCCI, 2003) e algoritmos genéticos (LIONG ET AL., 1995; TAYFUR E MORAMARCO, 2008). Tais modelos mostraram-se eficientes na solução do problema de calibração, visto se tratar de técnicas de otimização global.

Uma das dificuldades encontradas no processo de calibração, de um modo geral, está em se calibrar sistemas para diferentes cenários. Estes cenários são gerados pelos múltiplos eventos que podem ser observados, bem como pela distribuição de diferentes pontos de medição ao longo da bacia. Seibert e McDonnell (2002) mostram que nesta situação os modelos de otimização simples (de um objetivo) enfrentam dificuldades em encontrar um conjunto de parâmetros confiável para o problema. Uma das formas sugeridas para enfrentar esta dificuldade é o uso de modelos multiobjetivos, em que se podem empregar vários critérios de ajuste do modelo. Dentro do contexto multiobjetivo, várias funções objetivo podem ser consideradas simultaneamente no processo, de modo a se considerar os diferentes eventos avaliados, sem, no entanto se perder informações. Uma das dificuldades enfrentadas em lidar com estes métodos reside no fato de se ter várias soluções como resposta. Tal empecilho pode ser

superando empregando-se técnicas específicas para definição do conjunto a ser escolhido (FORMIGA, 2005).

2 OBJETIVOS

Constitui o objetivo principal deste trabalho acoplar um modelo hidrológico a um algoritmo eficiente de otimização multiobjetivo de modo a se melhor estimar os parâmetros deste modelo.

3 METODOLOGIA

O método a ser desenvolvido neste projeto, será aplicado a uma bacia urbana com dados disponíveis na literatura, para tanto será desenvolvido um modelo hidrológico para bacias urbanas, em que os seus parâmetros serão calibrados por meio de um algoritmo de otimização multiobjetivo.

A seguir será apresentado um resumo dos principais aspectos metodológicos do trabalho: modelos hidrológico a serem empregados; funções objetivos e métodos de otimização a serem utilizados no processo de calibração.

3.1 Modelo Hidrológico

A utilização de modelos de simulação constitui uma importante ferramenta de auxílio e implementação de projetos, pois com sua utilização, é possível realizar análises que antecedem as fases executivas alcançando-se maior eficiência.

Neste estudo será empregado o modelo *Storm Water Management Model* versão 5.0 – SWMM, desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA), e que foi aplicado em diversas bacias hidrográficas ao redor do mundo (SELVALINGAM ET AL. 1987; BHADURI ET AL. 2001). Este método foi empregado com sucesso na gestão de bacias urbanas (ZAGHLOUL, 1998) e controle de inundações (HSU ET AL. 2000).

O SWMM foi escolhido pois é um software livre, que tem o seu código aberto, o que permite acoplá-lo a rotinas de otimização de modo a se realizar a calibração do modelo. Ele apresenta uma grande flexibilidade na divisão da bacia e na disposição da rede de drenagem, o que permite uma representação mais aproximada da realidade. Ele é um modelo de conceitual de eventos que trabalha com modelagem do escoamento em

regime unidimensional. Estas características permitem que se possa trabalhar com uma menor quantidade de dados de entrada, sem se perder a precisão do mesmo. Além disto, o SWMM possui uma boa documentação sendo um dos programas mais utilizados na área de drenagem urbana (SIQUEIRA, 2003).

O modelo permite simular vários processos do ciclo hidrológico: precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial nas vertentes, na rede de drenagem e em canais, evapotranspiração, infiltração, interceptação e armazenamento em depressões (SIQUEIRA, 2003). Ainda é possível efetuar a simulação de diferentes estruturas de contenção de cheias como: bacias de retenção, trincheiras de infiltração, dentre outros (SILVA, 2007)

Como a maioria dos modelos, a dificuldade de se utilizar o SWMM está relacionada, principalmente à disponibilidade dos dados de entrada, que dependem de observações de campo e séries históricas de chuva e vazão. Algumas informações básicas para simulação hidrológica são necessárias como: precipitação, dimensão da área de drenagem, largura representativa da área, coeficiente de rugosidade de Manning, declividade, altura do armazenamento em depressões e parâmetros de infiltração, além de dados da rede de drenagem instalada (diâmetro, forma e material dos tubos) dentre outros.

Vários pesquisadores empregaram a calibração automática no ajuste dos parâmetros do SWMM. Baffaut e Delleur (1989) estimaram os parâmetros do modelo empregando um algoritmo baseado em sistemas inteligentes; Liang et al. (1995) empregaram algoritmos genéticos (AG) na calibração de 8 parâmetros do SWMM para uma bacia de Singapura. Barco et al. (2008) empregou um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para obtenção de características físicas da bacia e da precipitação a ser empregada no ajuste dos parâmetros do modelo.

3.2 FUNÇÕES OBJETIVO

Como abordado anteriormente, comumente os métodos de calibração automática empregam uma única função que é resolvida empregando um método de otimização de um objetivo. Um grupo de trabalho da American Society of Civil Engineering – ASCE – propôs alguns critérios de avaliação que servem como indicadores do grau de ajuste do modelo (ASCE, 1996).

De modo a se ter um ajuste as características mais importantes de um hidrograma – forma do hidrograma, volume escoado, vazão de pico e tempo de pico, serão empregadas, neste trabalho, quatro funções para avaliar o modelo:

a) Erro Médio Relativo

$$Max FO1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs})^2} \quad (1)$$

em que n é o número de observações, Q_{obs} é a vazão medida e Q_{calc} é a vazão calculada pelo modelo.

b) erro do volume escoado

$$Min FO2 = |\max Q_{obs} - \max Q_{calc}| \quad (2)$$

c) erro do pico de vazão

$$Min FO3 = |V_{obs} - V_{Q_{calc}}| \quad (3)$$

3.3 MODELO OTIMIZAÇÃO

O algoritmo de otimização que será empregado nas aplicações deste projeto é o NSGA-II. O método NSGA-II (Algoritmo Genético Elitista com Ordenação Não Dominada) foi proposto por Deb et al. (2000). Essa opção ocorreu por dois motivos:

- este método têm sido empregados em diferentes áreas, tornando-se as técnicas utilizadas quando se quer fazer comparação com novos métodos (CHEUNG ET AL., 2003; FORMIGA ET AL., 2003; KHU E MADSEN, 2005),
- eles pertencem a 2ª geração das metodologias multiobjetivos, uma vez que incluem um mecanismo de elitismo (DEB, 2001).

O emprego do NSGA-II foi feito através da biblioteca para Global Optimization, do Matlab versão 2010a, que também possui outros algoritmos evolucionários multiobjetivo implementados. Uma das características desta biblioteca, que tem o seu permite a implementação dos procedimentos internos do método (escolha das soluções, torneio, etc), os códigos de mutação e recombinação podem ser programados pelo usuário ou escolhido na gama de métodos apresentados.

O método NSGA-II trabalha com duas populações distintas, uma população descendente (\square) que é obtida mediante a aplicação dos operadores dos AGs. A segunda população de elite (\square) é formada pelos melhores indivíduos da geração anterior. Sendo que, essas duas populações possuem o mesmo número de indivíduos (P).

O método inicia com a geração de uma população inicial Λ_0 . Essa população é então dividida em diferentes níveis ou fronteiras de não-dominância (Γ_i). A aptidão de cada indivíduo será igual ao valor da frente na qual ele está localizado (Figura 1). Assim, 1 significa o melhor nível. Depois de se avaliar \square_0 aplicam-se os operadores: de seleção por torneio, cruzamento e mutação, gerando-se a população “filha” δ_0 .

Uma terceira população Ψ_0 é criada como sendo:

$$\Psi_0 = \Lambda_0 \cup \delta_0 \quad (4)$$

Em que $|\Psi_0| = 2P$. Para as demais gerações, o NSGA-II efetua as ordenações das soluções considerando Ψ_p , conforme a disposição das soluções nas diversas frentes Γ_i .

O passo seguinte será a construção da população geradora Λ_{n+1} . Como apenas P soluções podem compor Λ_{n+1} , P soluções de Ψ_p serão descartadas. O preenchimento de Ψ_p é feito inicialmente com as alternativas pertencentes à Γ_1 . segue-se o preenchimento com Γ_2 . Os conjuntos de soluções Γ_i são inseridos na sua totalidade até que:

$$\sum_{j=1}^i |\Gamma_j| \leq P. \quad (5)$$

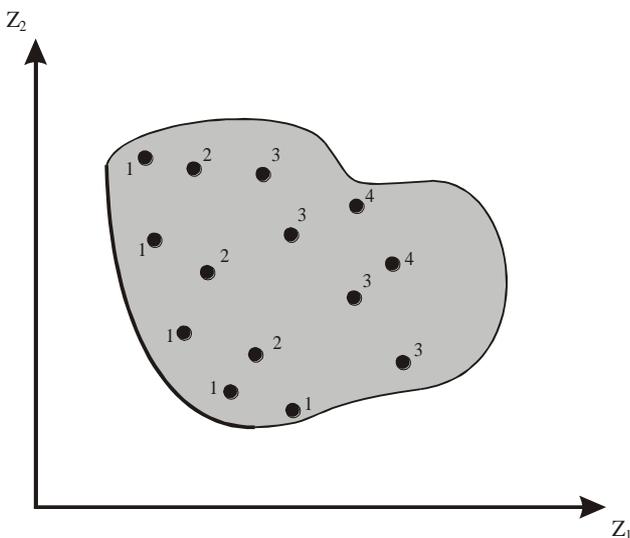


Figura 1 - Ordenação no método NSGA-II

Ao se inserir uma frente que não atenda (4), o algoritmo NSGA-II escolhe as soluções melhor distribuídas, empregando-se um critério denominado de *distância de aglomeração ou multidão*.

A distância de aglomeração (da) de uma solução reflete a densidade de alternativas localizadas à sua volta, e será igual ao perímetro do cubóide, no espaço das funções objetivos, que envolve uma solução i (Figura 2). Este cubóide tem em seus vértices as soluções mais próximas de sua vizinhança. Os elementos que se situarem nos extremos do nível, ou seja, aqueles que tiverem os maiores e menores valores para alguma função objetivo, terão sua distância de aglomeração igual a ∞ .

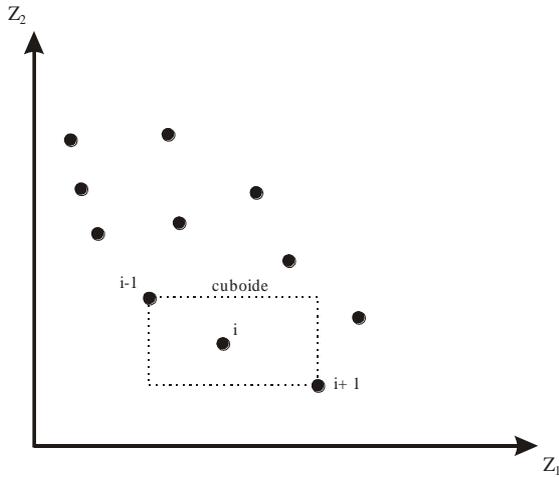


Figura 2 - Esquema da definição de distância de multidão.

Tendo a população \mathcal{A}_{n+1} sido definida, procede-se uma seleção para a geração de δ_0 . A seleção, segundo esta metodologia, é efetuada através da *seleção por torneio de multidão*. Esse torneio é realizado considerando que cada solução i possui dois atributos:

1. ranking de não-dominância r_i ;
2. distância de aglomeração da_i .

Baseado nessas duas características é realizado o torneio de seleção em que um candidato i vence um candidato j se uma das seguintes afirmações for verdadeira:

1. se a solução i numa frente (\mathcal{F}_i) for menor (no caso de minimização) do que a solução j .
2. se as duas possuem o mesmo ranking, mas a solução i tem um valor de da_i maior do que da solução j .

Excetuando-se o passo inicial, descrito acima, o método NSGA-II pode ser escrito seguindo-se a Figura 3.

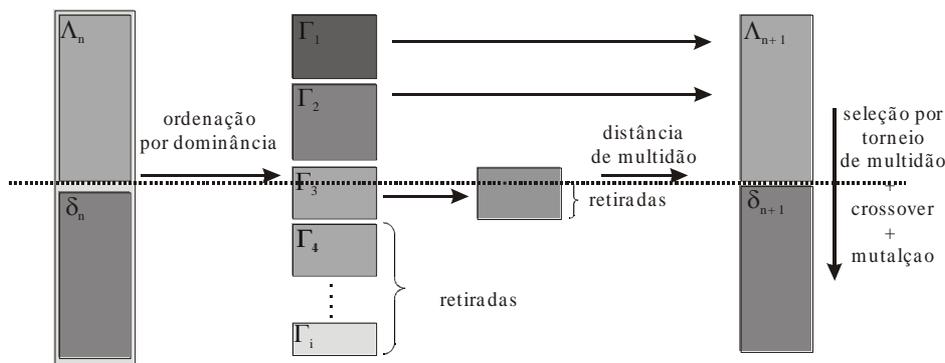


Figura 3 Esquema do método NSGA-II

4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi a bacia hidrográfica do Arroio Cancela, está localizado na área urbana de Santa Maria-RS (Brasil). Esta bacia possui uma área de 4,95 km² de contribuição, comprimento do rio principal de 1.343 metros e exutório nas coordenadas 29 °43'11 .63 "S e 48'10 .17 " W (Figura 1). Os dados de chuva e precipitação utilizados foram fornecidos por Garcia e Paiva (2005). Neste trabalho foi empregado o segundo evento de medição para avaliar o método. Os dados deste evento são apresentados nas Tabelas 1 e 2. A numeração de todos os títulos de seções e sub seções é justificada à esquerda. Todos os títulos são justificados e com recuo de 10mm. Na seção de quarta ordem (não usar a quinta ordem) deixar 3 espaços entre a numeração e o texto do título. A fonte é Arial, tamanho 12.

Para avaliar a capacidade do método de otimização com problemas multiobjetivo do drenagem urbana, empregou-se uma configuração simplificada da bacia para o problema. Assim, representou-se a região através de uma única sub-bacia na qual os dados obtidos pelo SWMM foram comparados com aqueles observados.

Tabela 1 – Chuva (P) observada (em mm) no Arroio Cancela em 10/06/2004 (Garcia and Paiva, 2005)

t	P	t	P	t	P	t	P	t	P	t	P	t	P
14:05	0.0	14:35	0.0	15:05	0.0	15:35	1.1	16:05	1.4	16:35	5.9	17:05	0.1
14:10	0.3	14:40	0.0	15:10	0.0	15:40	1.3	16:10	2.6	16:40	2.7	17:10	0.1
14:15	0.4	14:45	0.0	15:15	0.0	15:45	1.3	16:15	1.6	16:45	0.6	17:15	0.2
14:20	0.1	14:50	0.0	15:20	0.0	15:50	5.9	16:20	0.7	16:50	0.1	17:20	0.2
14:25	0.0	14:55	0.0	15:25	0.0	15:55	8.7	16:25	1.5	16:55	0.1	17:25	0.1
14:30	0.0	15:00	0.0	15:30	0.1	16:00	6.0	16:30	2.8	17:00	0.2		

Tabela 2 – Vazão observada (m³/s) no Arroio Cancela em 10/06/2004

t	Q	t	Q	t	Q	t	Q	t	Q	t	Q	t	Q		
14:05	0.00	15:25	0.00	16:45	13.97	18:05	3.55	19:25	0.96	20:45	0.66	22:05	0.52	23:25	0.40
14:10	0.00	15:30	0.00	16:50	14.61	18:10	3.12	19:30	0.89	20:50	0.65	22:10	0.52	23:30	0.39
14:15	0.00	15:35	0.00	16:55	14.90	18:15	2.69	19:35	0.88	20:55	0.64	22:15	0.51	23:35	0.37
14:20	0.00	15:40	0.00	17:00	14.88	18:20	2.40	19:40	0.86	21:00	0.62	22:20	0.50	23:40	0.36
14:25	0.00	15:45	0.00	17:05	14.79	18:25	2.18	19:45	0.84	21:05	0.61	22:25	0.49	23:45	0.35
14:30	0.00	15:50	0.00	17:10	14.53	18:30	1.96	19:50	0.82	21:10	0.60	22:30	0.49	23:50	0.33
14:35	0.00	15:55	0.00	17:15	14.10	18:35	1.81	19:55	0.80	21:15	0.58	22:35	0.48	23:55	0.32
14:40	0.00	16:00	0.22	17:20	13.41	18:40	1.68	20:00	0.78	21:20	0.58	22:40	0.47	00:00	0.31
14:45	0.00	16:05	0.91	17:25	12.54	18:45	1.56	20:05	0.77	21:25	0.58	22:45	0.47	00:05	0.30
14:50	0.00	16:10	4.06	17:30	11.52	18:50	1.43	20:10	0.76	21:30	0.57	22:50	0.46		
14:55	0.00	16:15	7.66	17:35	10.15	18:55	1.38	20:15	0.74	21:35	0.56	22:55	0.45		
15:00	0.00	16:20	9.37	17:40	8.80	19:00	1.31	20:20	0.73	21:40	0.56	23:00	0.45		
15:05	0.00	16:25	10.42	17:45	7.46	19:05	1.24	20:25	0.72	21:45	0.55	23:05	0.44		
15:10	0.00	16:30	11.40	17:50	6.26	19:10	1.17	20:30	0.70	21:50	0.54	23:10	0.43		
15:15	0.00	16:35	12.30	17:55	5.21	19:15	1.10	20:35	0.69	21:55	0.54	23:15	0.43		
15:20	0.00	16:40	13.14	18:00	4.41	19:20	1.03	20:40	0.68	22:00	0.53	23:20	0.41		

The Horton method was employed to calculate the infiltration. Thus, the model parameters to be calibrated were:

Parâmetro 1 – n de Manning para área impermeável

Parâmetro 2 – n de Manning para área impermeável

Parâmetro 3 – armazenamento em depressão para área impermeável (mm)

Parâmetro 4 – armazenamento em depressão para área permeável (mm)

Parâmetro 5 – Porcentagem de area impermeável (%)

Parâmetro 6 – Largura do escoamento (m)

Parâmetro 7 – Declividade média (%)

Parâmetro 8 – Máxima taxa de infiltração de Horton (mm/h)

Parâmetro 9 – Mínima taxa de infiltração de Horton (mm/h)

Parâmetro 10 – Taxa de decaimento da infiltração(1/h)

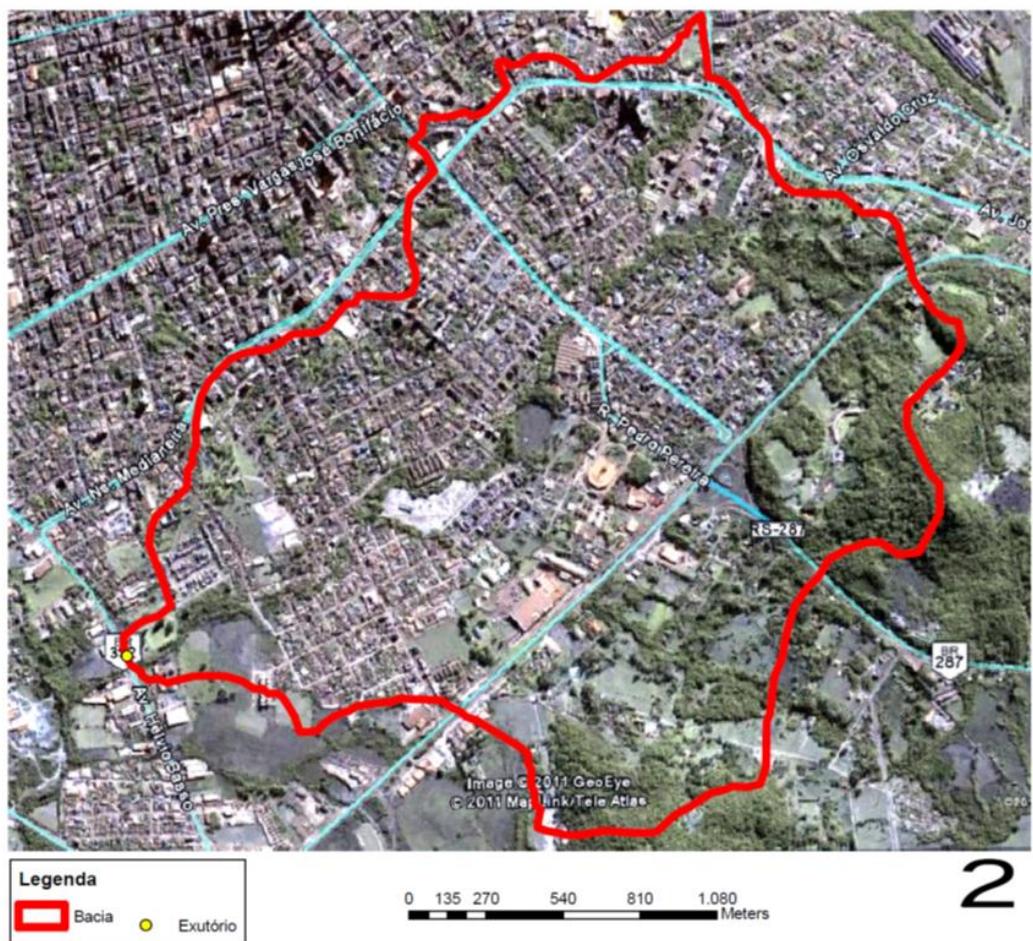


Figura 1 – Bacia do Arroio Cancela (Fonte: Google Earth Pro)

5 RESULTADOS

Inicialmente, uma primeira análise foi realizada para determinar os parâmetros para o método de otimização, onde se encontraram os seguintes valores: Tamanho da População: 200; Número de Geração: 200; Escala Função: Rank; Seleção Função: torneio. Tournament Tamanho: 3; Função Mutação: Uniformes; Taxa de Mutação: 0,02; Função Crossover: Intermediário; Crossover Fração: 0.8.

O modelo foi executado 10 vezes sendo escolhido o conjunto de Pareto, que apresentou o melhor resultado, ou seja, a maior quantidade de soluções não-dominadas, quando comparado com os outros conjuntos. Os resultados das funções objetivo são mostrados na Figura 2.

Para comparar os resultados de diferentes parâmetros, foram escolhidos seis soluções, entre as 200 encontrados pelo método, para avaliar o comportamento do modelo para os valores das funções objetivo (Figura 2). Foram selecionadas as melhores soluções com valores individuais para cada função e as que apresentaram o melhor

compromisso. Os valores dos parâmetros encontrados para estas soluções são apresentadas na Tabela 3. As taxas de fluxo obtidos para cada conjunto de parâmetros é mostrado na Figura 3.

Tabela 3. Parâmetros e valores de funções objectivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e melhor com o compromisso

Sol.	FO1	FO2	FO3	Parameter									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.824	2.133	26.931	0.0707	0.022	8.366	2.234	6.179	779.4	5.359	9.307	6.758	0.832
2	0.521	0.000	6.880	0.0647	0.025	7.988	2.669	7.472	769.1	4.152	8.882	4.914	1.315
3	0.423	0.083	0.001	0.0612	0.024	8.299	3.667	8.564	788.7	3.706	8.086	4.908	1.924
4	0.695	0.568	21.548	0.0725	0.027	8.560	2.133	6.186	786.2	5.237	9.547	5.875	1.616
5	0.694	0.038	51.817	0.0697	0.026	7.846	2.399	6.066	767.6	5.310	9.605	6.656	0.705
6	0.597	0.259	0.379	0.0670	0.027	3.945	2.304	8.442	787.06	4.776	8.958	5.133	1.195
Maximum				0.0725	0.028	8.6	3.7	8.6	788.8	5.4	9.6	6.8	1.92
Minimum				0.0612	0.022	3.9	2.1	6.1	767.6	3.7	8.1	4.9	0.71
Amplitude Relativa				18.4%	24.8%	117.0%	71.9%	41.2%	2.8%	44.6%	18.8%	37.7%	172.8%

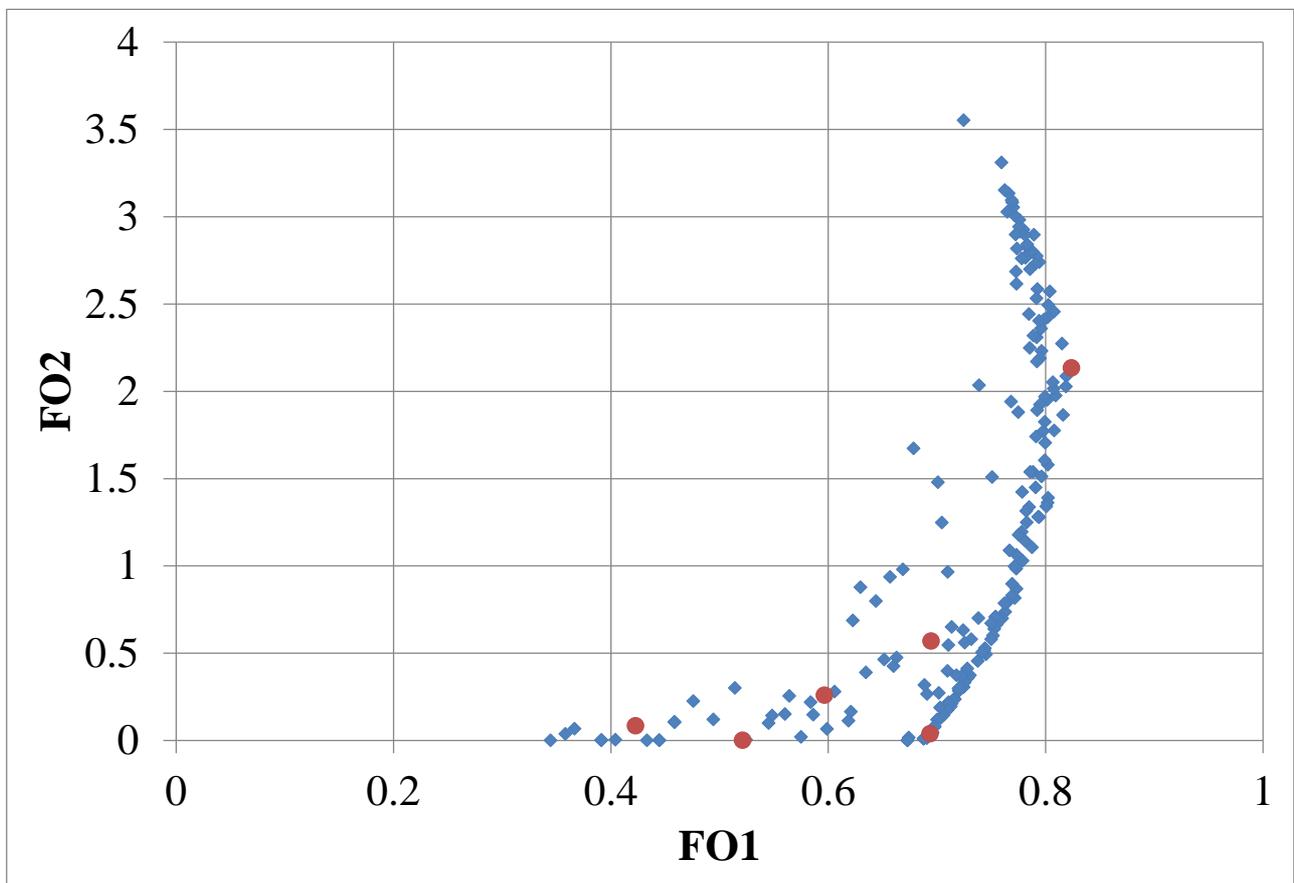


Figure 2. Comparação do funções objetivo com ênfase nas soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e as com melhores compromissos

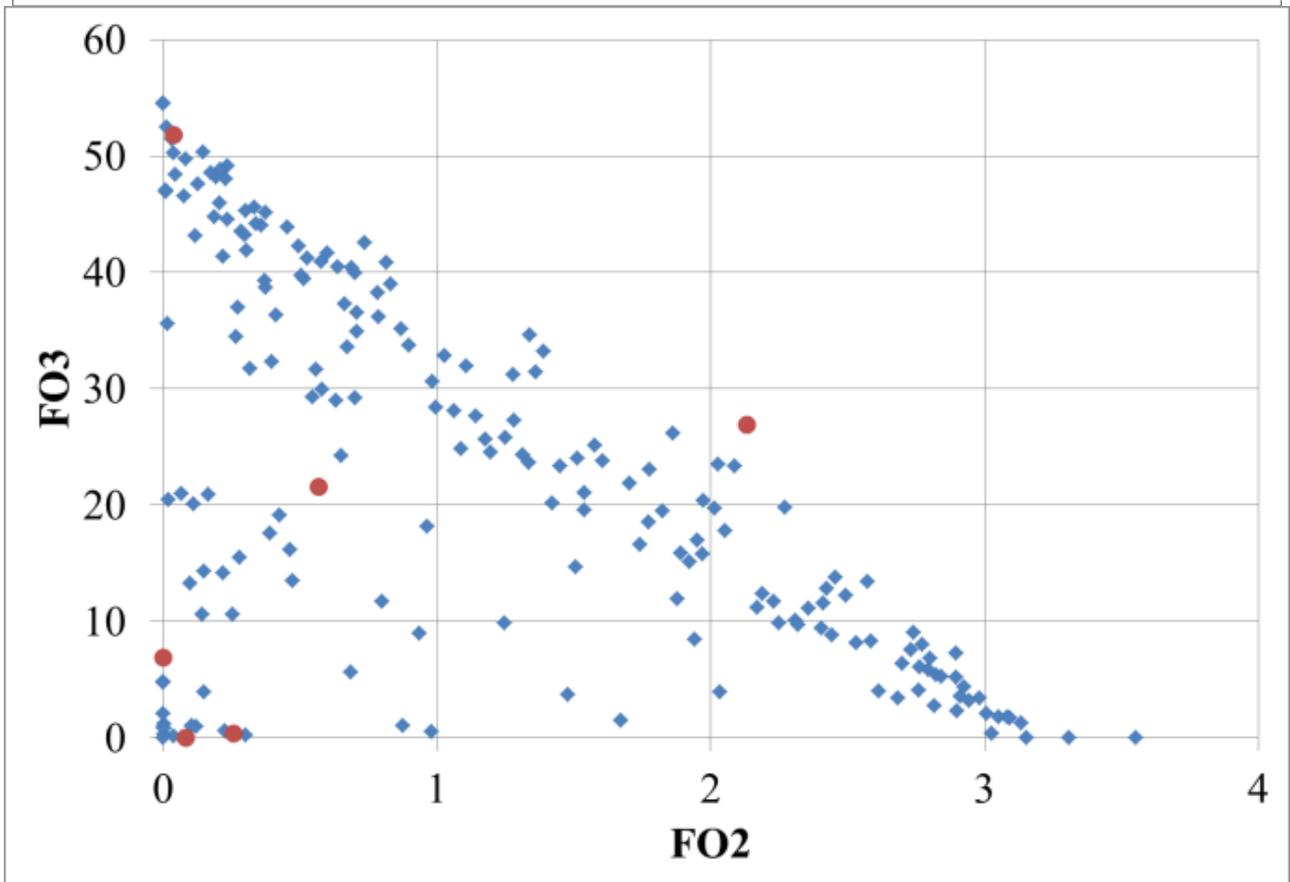
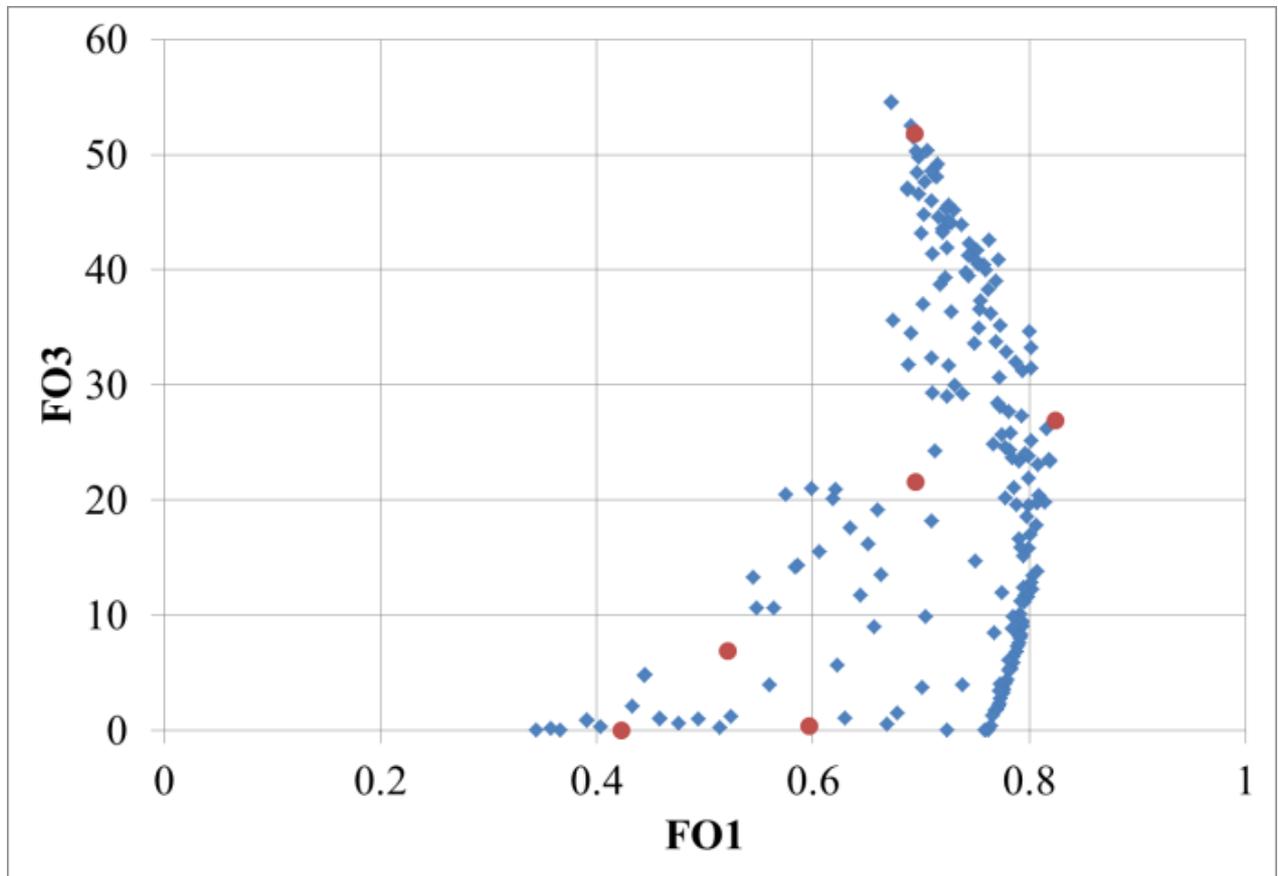


Figure 2. Comparação do funções objetivo com ênfase nas soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e as com melhores compromissos (Continuação)

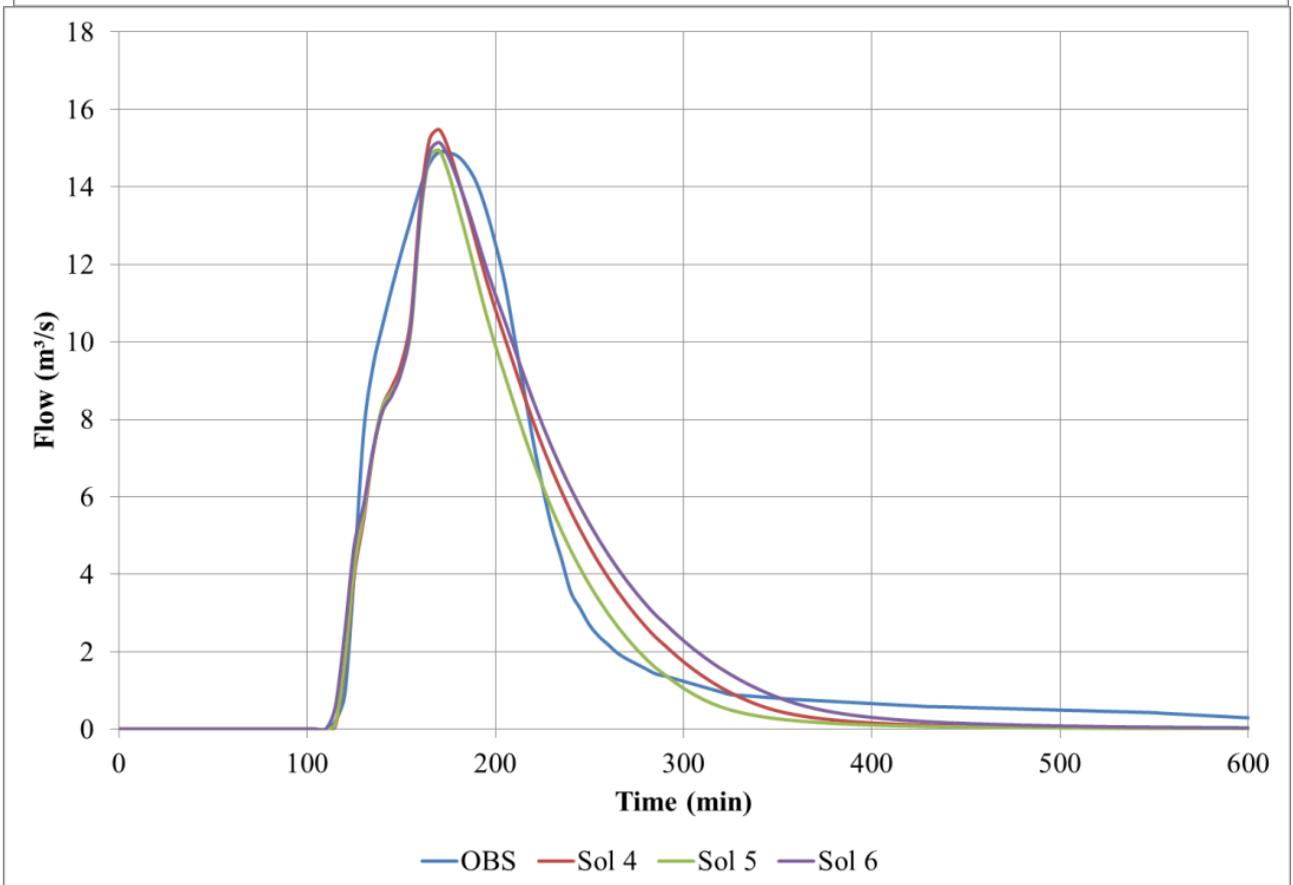
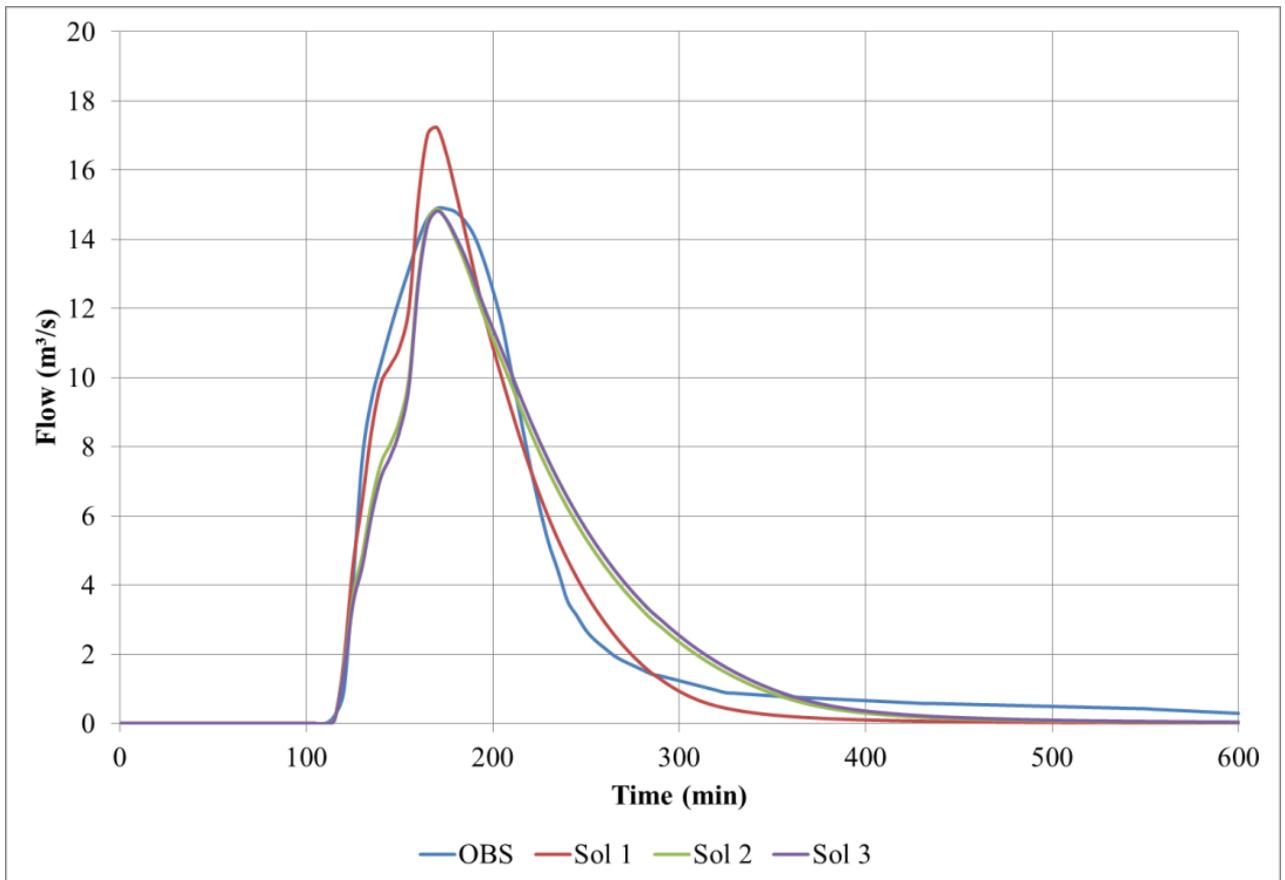


Figure 3. Runoff to the model parameters of solutions with higher values for each objective function and with best commitment

Table 4. Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais

	Parâmetros									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Média	0.0702	0.0252	8.32	2.40	6.39	780.5	5.21	9.25	6.07	1.24
Desvio	0.0056	0.0017	1.038	0.361	0.723	9.755	0.291	0.273	0.545	0.444
Med/Desv	0.0800	0.0687	0.125	0.151	0.113	0.012	0.056	0.030	0.090	0.357
Max	0.0862	0.0301	13.8	4.0	9.9	800.3	5.4	9.9	6.8	3.17
Min	0.0365	0.0222	3.9	2.0	5.6	738.7	3.7	8.1	4.3	0.66

A análise da Figura 2 mostra que FO3 e FO2 tendem a ter soluções convergentes para o ótimo (zero), enquanto o melhor FO1 resulta em uma piora significativa dos outros dois.

Pode-se observar nas Tabelas 3 e 4 que os parâmetros que apresentaram as maiores variações foram 3 (profundidade de armazenamento depressão na área impermeável), 4 (profundidade para armazenamento de depressão na área permeável) e 10 (constante de decaimento da curva de infiltração de Horton) . No entanto, esses parâmetros não apresentaram grande sensibilidade no modelo. O parâmetro 5 (porcentagem da área impermeável) não apresenta um valor compatível com a característica da área (Figura 1). Porém pode estar sendo compensada por uma redução da taxa de infiltração (Parâmetros 8 e 9), o que pode no final produzem o mesmo resultado.

Na comparação das vazões calculadas e observadas (Figura 3) observou-se que a solução com maior valor para FO1 resultou em um comportamento de fluxo diferente apresentado pelas outras soluções. Uma vez que teve rápida ascensão e recessão. Todas as outras soluções avaliadas apresentaram comportamento semelhante. Para a região da recessão, todas as soluções mostraram uma tendência para reduzir o fluxo a partir do tempo 350 min mais rápido do que os valores observados.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um teste utilizando uma microbacia urbana para avaliar o método de otimização multiobjetivo (NSGA-II) para calibração de modelos hidrológicos. Foi empregado para esta finalidade, uma configuração muito simples para a representação da bacia, com um plano único das fluxos, e um evento relativamente simples e único.

Embora a função objetivo FO1 seja altamente recomendada e utilizada em modelos calibração, seu emprego pode não ser necessariamente o mais adequado quando se trabalha com a concepção das estruturas hidráulicas. Uma vez que para a vazão de pico e volume de escoamento superficial total pode ter erros elevados quando adotar esse papel.

A comparação com outras funções objetivo que dependem do escopo do projeto é importante para calibrar o modelo, porque, mesmo em situações relativamente simples, pode haver uma variação considerável no resultado.

REFERÊNCIAS

ASCE TASK COMMITTEE. **Hydrology handbook**. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 28. New York: ASCE, 1996.

BAFFAUT C. e DELLEUR J.W. Expert system for calibrating SWMM. **Journal of Water Resources Planning Management**, 1988, Vol. 115(3), p. 278–298

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N. e BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias de drenagem urbana**. ABRH, Porto Alegre, 2005.

BARCO, J. WONG, K. M. e STENSTROM, M. K. Automatic Calibration of the U.S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2008, Vol. 134(4), p. 466-474.

BEVEN, K.J. e BINLEY, A.M.. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, **Hydrological Processes**, 1996, Vol.6, p.279–298.

BERTALANFFY, L. General system theory - A Critical Review. *General Systems*, 1962, Vol. 7, p. 1-20

BEVEN, K J e FREER, J Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems. **Journal of Hydrology**, 2001, Vol: 249, 11-29

BEVEN, K J, A manifesto for the equifinality thesis. **Journal of Hydrology**, 2006, Vol. 320, p. 18-36

BHADURI, B., MINNER, M., TATALOVICH, S., e HARBOR, J. Longterm hydrologic impact of urbanization: A tale of two models. **Journal of Water Resources Planning Management**, 2001, Vol. 127(1), p. 13–19.

CHEUNG. P B. REIS, L. F. R., FORMIGA, K. T. M., CHAUDHRY, F. H. e TICONA, W. Multiobjective Evolutionary Algorithms Applied to the Rehabilitation of a Water Distribution System: a Comparative Study. **Lecture Notes in Computer Science**, 2003, Vol. 2632, p. 662-676.

COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. . Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2003, Vol. 8 (3), p. 27-39.

CRUZ, M.A.S.; TUCCI, C. E.M.; SILVEIRA, A.L. Controle do escoamento com retenção em lotes urbanos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 1998, Vol. 3(4), p. 19-31.

- DEB, K. **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**. John Willey & Sons, Chichester, Inglaterra, 2001.
- DEB, K. et al. A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II. In M. SCHOENAUER, K. et al. **Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference**, 2000, p. 849-858.
- DUAN Q.Y., SOROOSHIAN S e GUPTA V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, 1992; Vol. 28(4), p.1015–1031.
- FORMIGA, K. T. M. **Otimização Multiobjetivos de Projetos de Redes de Distribuição de Água**. Tese de Doutorado Universidade de São Paulo, 2005.
- FORMIGA, K. T. M., CHAUDHRY, F. H, CHEUNG. P B. e REIS, L. F. R. Optimal Design of Water Distribution System by Multiobjective Evolutionary Methods. **Lecture Notes in Computer Science**, 2003, Vol. 2632, p. 677-691.
- GUPTA V.K. e SOROOSHIAN S. The automatic calibration of conceptual catchment models using derivative-based optimization algorithms. **Water Resources Research**, 1985, Vol. 21(4), p. 473–485.
- GUPTA H. V, SOROOSHIAN S e YAPO P.O. Toward improved calibration of hydrological models: multiple and noncommensurable measures of information. **Water Resources Research**, 1998, Vol. 34(4), p. 751–763
- HSU, M. H., CHEN, S. H., e CHANG, T. J.. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. **Journal of Hydrology**, 2000, 234(1), p. 21–37.
- JOHNSTON P.R. e PILGRIM, D.H. Parameter optimization for watershed models. **Water Resources Research**, 1976, Vol. 12(3), p. 477–486.
- KHU S.T e MADSEN H. Multi-objective calibration with Pareto preference ordering; an application to rainfall-runoff model calibration. **Water Resources Research** 2005; Vol. 41(3) 314-326.
- KUCZERA G e PARENT E. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. **Journal of Hydrology**, 1998, Vol. 211, p.69–85.
- LIONG, S. Y., CHAN, W. T. e LUM, L. H. Knowledge-based system for SWMM runoff component calibration. **Journal of Water Resources Planning Management**, 1991, Vol. 117(5), p. 507–524.
- LIONG, S. Y., e IBRAHIM, Y. Estimation of peak flow and runoff volume with response surface method. **Journal of Water Resources Planning Management**, 1994, Vol. 120(2), p. 161–175.
- MILOGRANA, J. **Estudo de medidas de controle de cheias em ambientes urbanos**. Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, , 2001.
- RAUCH W e HARREMOES, P. On the potential of genetic algorithms in urban drainage modeling. **Urban Water**, 1999, Vol. 1 p.79–89.
- SAVENIJE H.H.G. Equifinality, a blessing in disguise. **Hydrological Process**, 2001; Vol.15, p.2835–2838.
- SEIBERT J. e MCDONNELL J.J. On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: use of soft information for multi-criteria model calibration. **Water Resources Research** 2002;38(11): 1241. *Water Resources Research*, 2002, Vol. 38(11), p. 1241–1252

SILVA, K. A. **Análise da eficiência de métodos de controle de enchentes na atenuação de picos de cheias utilizando o modelo computacional SWMM**. Universidade Federal de Goiás, Dissertação de Mestrado, 2007.

SIQUEIRA, E.Q. **Complexity and Uncertainty in Hydrological Modeling for Urban Areas of Varying Database Quality**. University of Guelph, Tese de Doutorado, 2003.

TAYFUR, G. e MORAMARCO, T, Predicting hourly-based flow discharge hydrographs from level data using genetic algorithms. **Journal of Hydrology**, 2008, Vol. 352, p. 77– 93

THAMPAPILLAI, D.J. e MUSGRAVE, W.F. Flood damage mitigation: A review of structural and nonstructural measures and alternative decision frameworks. **Water Resources Research**, 1985, Vol. 21(4), p.411-424.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Ministério das Cidades – Global Water Partnership - World Bank – Unesco 2005.

ZAGHLOUL, N. A. Flow simulation in circular pipes with variable roughness using SWMM-EXTRAN Model.” **Journal Hydraulic Engineering**, 1998, Vol. 124(1), p. 73–76.

ZAGHLOUL, N. A., e ABU KIEFA, M. A. Neural network solution of inverse parameters used in the sensitivity-calibration analyses of the SWMM model simulations. **Advances in Engineering Software**, 2001, Vol. 32(7) , p. 587–595.