

CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DO SWMM COM *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* APLICADA À REDE DE DRENAGEM URBANA DO RIACHO FUNDO I – BRASÍLIA, DF

Luísa Machado Ceolin Gonçalves¹ ; Maria Elisa Costa Leite¹ & Sergio Koide¹

RESUMO – A urbanização intensifica a impermeabilização do solo, alterando o ciclo hidrológico e desenvolvendo problemas de inundações urbanas. A modelagem hidrológico-hidráulica é uma importante ferramenta de apoio à gestão da drenagem urbana. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e aplicar uma rotina computacional em linguagem R para a calibração automática do SWMM utilizando o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO). Foi simulado o modelo da rede de drenagem da bacia do Riacho Fundo I, localizada em Brasília, DF, utilizando dados monitorados de precipitação e vazão referentes ao evento de 12 de março de 2019. Como função objetivo, utilizou-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). O modelo inicial sem calibração apresentou NSE igual a 0,46. Após a calibração automática, o NSE aumentou para 0,91, indicando melhora significativa no ajuste entre vazões simuladas e observadas. Além disso, o algoritmo apresentou convergência estável em baixo tempo computacional. Os resultados demonstram o potencial do algoritmo PSO para realizar a calibração automática de modelos hidrológicos-hidráulicos.

Palavras-Chave – Drenagem Urbana, SWMM, Calibração.

ABSTRACT– Urbanization intensifies soil impermeabilization, altering the hydrological cycle and increasing urban flooding problems. Hydrological-hydraulic modeling is an important tool to support urban drainage management. In this context, the present study aimed to develop and apply a computational routine in the R programming language for the automatic calibration of SWMM using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. The drainage network model of the Riacho Fundo I watershed, located in Brasília, DF, was simulated using monitored rainfall and flow data from the rainfall event of March 12, 2019. The Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient (NSE) was used as the objective function. The initial uncalibrated model presented an NSE value of 0.46. After the automatic calibration, the NSE increased to 0.91, indicating a significant improvement in the fit between simulated and observed flows. In addition, the algorithm showed stable convergence with low computational time. The results demonstrate the potential of the PSO algorithm for the automatic calibration of hydrological-hydraulic models.

Key-words – Urban Drainage, SWMM, Model Calibration.

1) Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB), Anexo SG-12, Térreo Campus Universitário Darcy Ribeiro Universidade de Brasília – UNB, (61) 3107-0940, luisa.ceolin@gmail.com, leite.costa.me@gmail.com, skoide@unb.br.

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização altera significativamente o ciclo hidrológico natural, aumentando a impermeabilização do solo, o escoamento superficial e a ocorrência de inundações urbanas (ADASA, 2023). Nesse contexto, a modelagem hidrológica-hidráulica torna-se uma ferramenta importante para o planejamento e gerenciamento da drenagem urbana.

A simulação hidrológica-hidráulica permite representar a resposta da bacia hidrográfica e da rede de drenagem frente a diferentes condições hidrológicas, auxiliando na avaliação de cenários e na tomada de decisão (Canholi, 2014; Tucci, 2005).

Dentre os modelos utilizados para simulação hidrológica-hidráulica destaca-se o *Storm Water Management Model* (SWMM), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) para a modelagem e simulação do escoamento superficial em áreas urbanas.

Por ser um pacote livre, com modelo hidráulico de simulação do escoamento em condutos fechados integrado com um modelo de escoamento superficial, o SWMM é um programa muito atrativo para o estudo do escoamento superficial, avaliando o comportamento do fluxo dentro da rede de drenagem e os pontos de alagamento e transbordamento na rede.

Apesar das vantagens do SWMM, a representação adequada dos processos hidrológicos e hidráulicos depende da definição de diversas informações acerca da bacia hidrográfica e da rede de drenagem como taxa de infiltração, uso e ocupação do solo, percentual de área impermeabilizada, entre outros. Muitas dessas variáveis são de difícil mensuração ou não podem ser medidas em campo.

Para garantir a aderência do modelo à realidade, a calibração é uma etapa fundamental na simulação hidrológica-hidráulica. Nessa etapa, as variáveis de entrada são ajustadas de forma que o modelo represente o mais próximo possível a realidade. Um modelo fidedigno ao que foi medido em campo é uma ferramenta essencial para o planejamento urbano, sendo um aliado na tomada de decisão.

A calibração pode ser executada de forma manual, por tentativa e erro. No entanto, é, em geral, muito trabalhosa e exige um vasto conhecimento do modelo aplicado e da região hidrológica em estudo. A calibração automática reduz a subjetividade nessa etapa. Ela consiste na determinação de um conjunto ótimo de parâmetros, de forma que o valor mínimo (ou máximo) da função objetivo seja absoluto (ótimo global) (Diniz, 1999).

Um dos algoritmos que podem ser utilizados para realizar a calibração de um modelo é o *Particle Swarm Optimization* (PSO). É um algoritmo de fácil aplicação, visto que ele possui um número pequeno de parâmetros que controlam a trajetória das partículas dentro do espaço de busca

(Tharwat et al., 2017). Estudos anteriores demonstraram resultados satisfatórios da integração entre PSO e SWMM (Taghizadeh; Khani; Rajaei, 2021; Xue et al., 2020).

Para a aplicação do algoritmo de otimização no processo de calibração de uma rede de drenagem urbana, é necessário realizar uma integração entre o programa (SWMM) e o algoritmo (PSO), de forma que os parâmetros sejam atualizados automaticamente, a partir da execução iterativa do modelo e avaliação da função objetivo do problema. Nesse sentido, o uso da linguagem R apresenta um potencial para o desenvolvimento de ferramentas flexíveis voltadas à calibração automática do SWMM.

A área de estudo deste artigo é a bacia do Riacho Fundo I (RF I), localizada em Brasília, Distrito Federal. A bacia do RF I lança o escoamento superficial no córrego Riacho Fundo, que é um dos principais contribuintes para o Lago Paranoá. Atualmente, a bacia não atende ao requisito de lançamento de 24,4 l/s/ha. Para a análise de soluções e tomada de decisões, é essencial que se tenha um modelo devidamente calibrado e que possa gerar vazões mais próximas o possível da realidade.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e aplicar uma rotina computacional em linguagem R para a calibração automática do programa SWMM utilizando o algoritmo de otimização *Particle Swarm Optimization* (PSO) aplicado à bacia do Riacho Fundo I.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

A bacia do RF I está localizada no lado oeste do DF e lança às águas do escoamento superficial sem tratamento no rio Riacho Fundo (Figura 1). Segundo o PDAD (2024), a Região Administrativa (RA) do Riacho Fundo compreende uma população de 41.040 pessoas. A Figura 1 mostra a ocupação urbana na Unidade Hidrográfica (UH) do Riacho Fundo, na qual pode-se observar uma área densamente urbanizada adjacente aos corpos hídricos e a grande impermeabilização do solo da região.

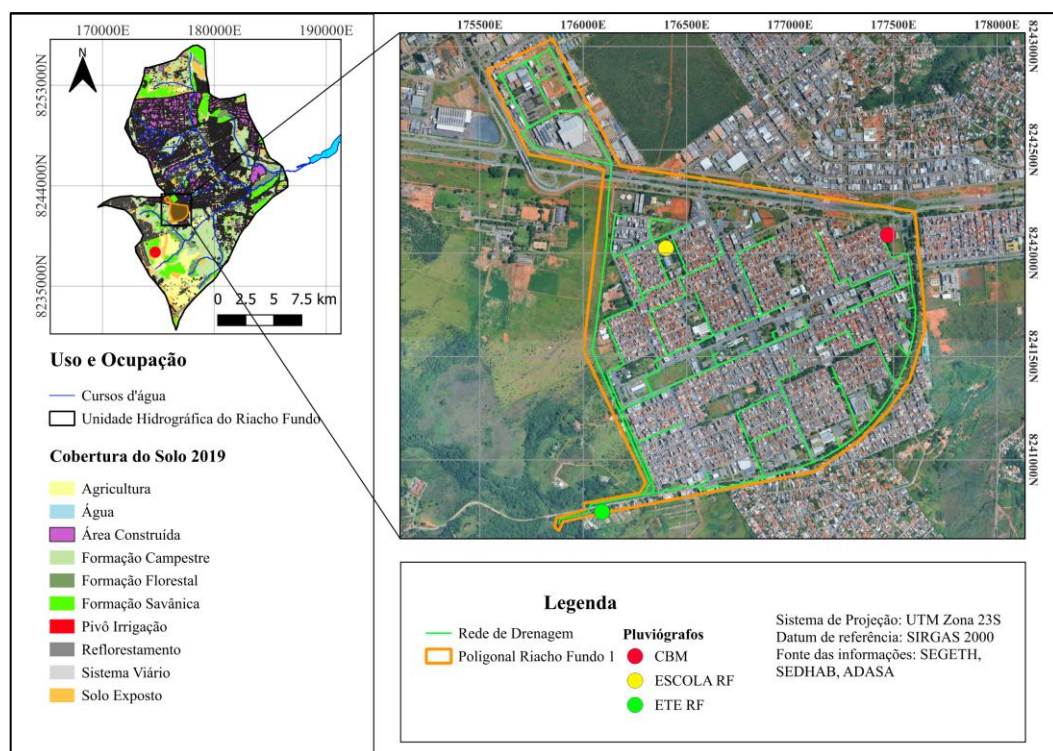


Figura 1 – Uso e Ocupação do Solo da UH do Riacho Fundo e localização da bacia do Riacho Fundo 1.

A região possui uma declividade variando de 0 a 12%, com média de 3%, e, como possui uma boa cobertura do sistema de drenagem tradicional, não possui grandes problemas de alagamento (Costa, 2022 *apud* Tsuji, 2018, p. 40). A área de estudo conta com 341 sub-bacias, 348 poços de visita e 363 condutos.

Com relação ao monitoramento da região, Tsuji (2018) instalou 2 pluviôgrafos na bacia (Figura 1, pontos verde e vermelho) e Costa (2022) instalou, posteriormente, mais um ponto ao longo da bacia (Figura 1, ponto amarelo). A medição de vazão foi realizada indiretamente, por meio de curva-chave. Foram medidos o nível d'água e a velocidade da água dentro da galeria no exutório da rede (Costa, 2022).

2.2 Modelagem Hidrológica-Hidráulica das Redes de Drenagem Urbana da Bacia do RF I

O modelo utilizado para realizar a modelagem da rede foi o *Storm Water Management Model* (SWMM), na versão 5.1. O programa SWMM foi desenvolvido pela Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos Estados Unidos (USEPA – *United States Protection Agency*).

O SWMM pode ser usado para simular eventos únicos ou contínuos para avaliar quantitativa e qualitativamente o escoamento em áreas urbanas. O modelo é representado por compartimentos ambientais que interagem entre si: Atmosfera; Superfície do solo; Águas Subterrâneas; e Transporte (Rossman, 2015).

Com relação à rede de drenagem utilizada na simulação, Costa (2022, p. 50) esclarece,

A rede de drenagem da área urbana do DF é disponibilizada já georreferenciada pela Adasa baseada no cadastro da Novacap. A rede possui informações quanto à localização das bocas de lobo, caixa de passagem, poços de visita, porém há ausência de dados como cota de entrada ou cota de saída. Há também dados sobre dimensões e geometria de ramais, condutos e galerias. Contudo, há divergências quanto a outros dados, como comprimento e declividade, que foram adaptados.

A bacia do RF I foi inicialmente estudada por Tsuji (2018). Posteriormente, Costa (2022) realizou aprimoramentos no modelo, incluindo uma nova série de precipitação compreendendo o período de 2018 a 2019. No presente trabalho, foi utilizado o modelo atualizado por Costa (2022), bem como as séries de precipitação e de vazões monitoradas pela autora para a realização da calibração automática. A calibração foi conduzida a partir de um evento único, correspondente ao evento do dia 12 de março de 2019 (Figura 2).

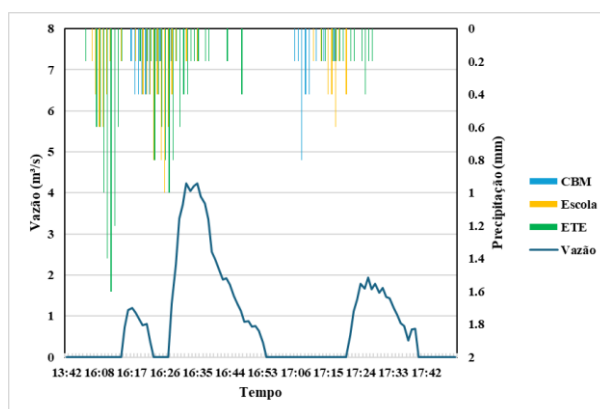


Figura 2 - Hietograma/hidrograma do evento utilizado para a calibração da bacia do RF I.

2.3 Desenvolvimento da Rotina e Calibração do Modelo

A ferramenta de calibração automática foi desenvolvida em linguagem R, na versão 4.4.3. A integração entre a rotina e o SWMM foi feita por meio da biblioteca “swmmr”, desenvolvida por Leutnant *et al.* (2019). A biblioteca permite rodar o SWMM internamente no R, além de possibilitar o acesso aos dados de entrada, saída e do relatório e permite ao usuário escrever no arquivo SWMM.

O algoritmo de calibração utilizado foi o *Particle Swarm Optimization* (PSO), o qual é baseado no comportamento de enxame, como cardume de peixes e pássaros (*swarm-based*). O seu principal objetivo é buscar no espaço posições/locais que se aproximam do mínimo ou máximo global. A dimensão de busca é determinada pela quantidade de parâmetros a ser otimizada e é realizada por meio do ajuste na trajetória dos indivíduos, chamados de partículas. As partículas possuem três parâmetros: posição, velocidade e a melhor posição anterior (Tharwat *et al.*, 2017; Yang; Karamanoglu, 2013). O algoritmo PSO foi aplicado na rotina a partir das funções presentes na biblioteca “hydroPSO”, desenvolvida por Zambrano-Bigiarini e Rojas (2013).

A rotina foi desenvolvida para avaliar os valores de parâmetros de cada elemento individualmente, dentro dos intervalos definidos. Dessa forma, cada parâmetro é variado individualmente. A Figura 3 apresenta o fluxograma da rotina de calibração.

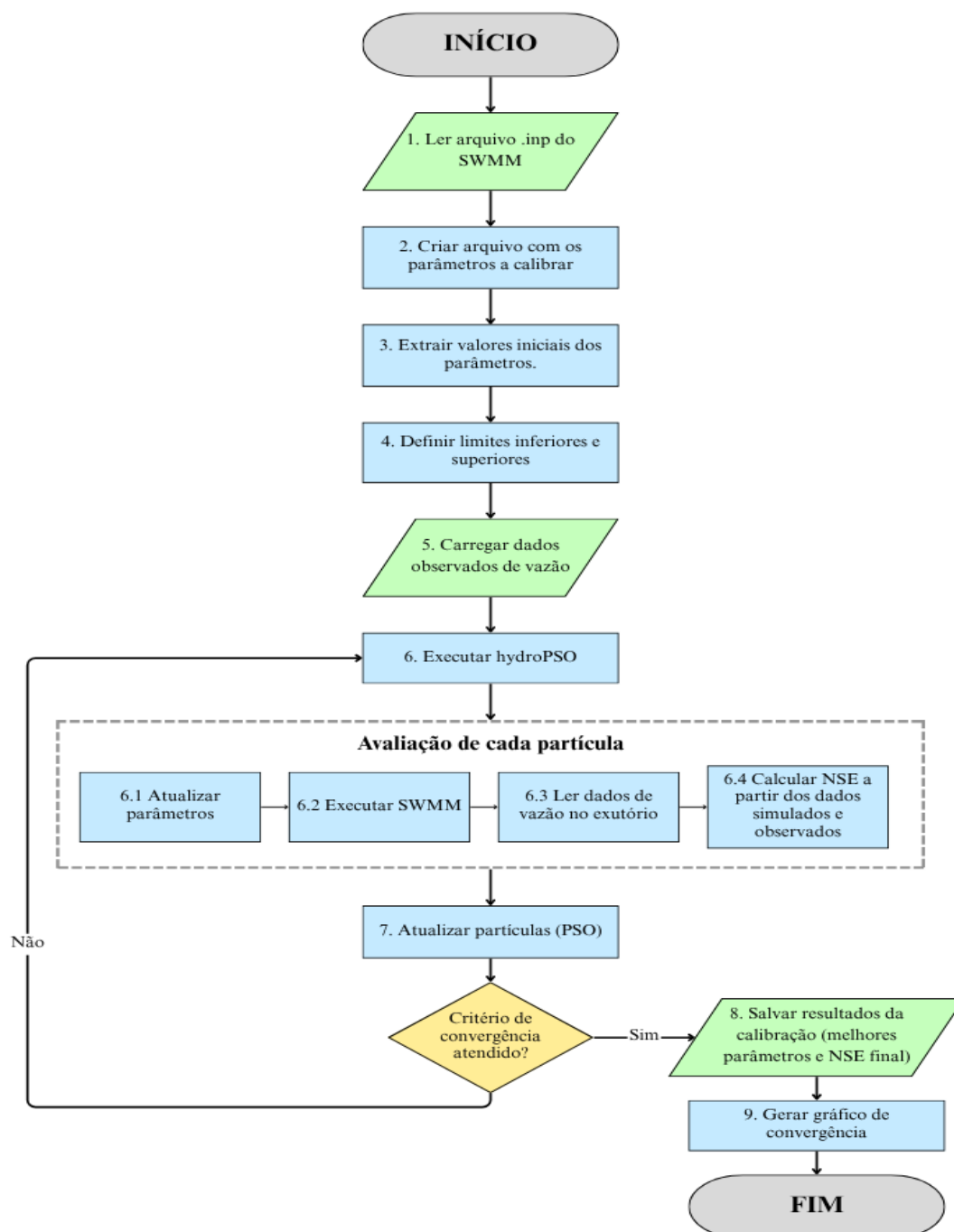


Figura 3 - Fluxograma da rotina de calibração automática do SWMM.

Como função objetivo, foi utilizado o coeficiente de Nash & Sutcliffe (NSE), dado pela equação

1. O NSE é amplamente utilizado para medir a eficiência da calibração em modelos hidrodinâmicos.

Quanto mais próximo NSE for de 1, melhor é o ajuste entre os dados observados e os simulados. Se NSE apresentar valores menores que zero, é um indicativo que o uso da média dos dados observados é melhor que a utilização da simulação (Tsuji, 2018).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(q_{obs} - q_{sim})^2}{\sum(q_{obs} - \bar{q})^2} \quad (1)$$

Em que “qobs” é a vazão medida em campo; “qsim” é a vazão simulada; e “q” é a média das vazões medidas em campo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes de realizar a calibração, foi feita uma simulação com o modelo da bacia RF I, somente com a inserção dos dados de entrada, para o evento do dia 12 de março de 2019. O valor da vazão obtida no exutório da bacia foi comparado com a vazão medida pelo coeficiente de Nash & Sutcliffe. O NSE obtido inicialmente foi igual a 0,46, o que indica que o modelo tem uma resposta razoável ao evento de chuva simulado, porém ela pode ser melhorada a partir da calibração. A Figura 4 apresenta o hidrograma da vazão observada (em azul) e da vazão simulada (em vermelho).

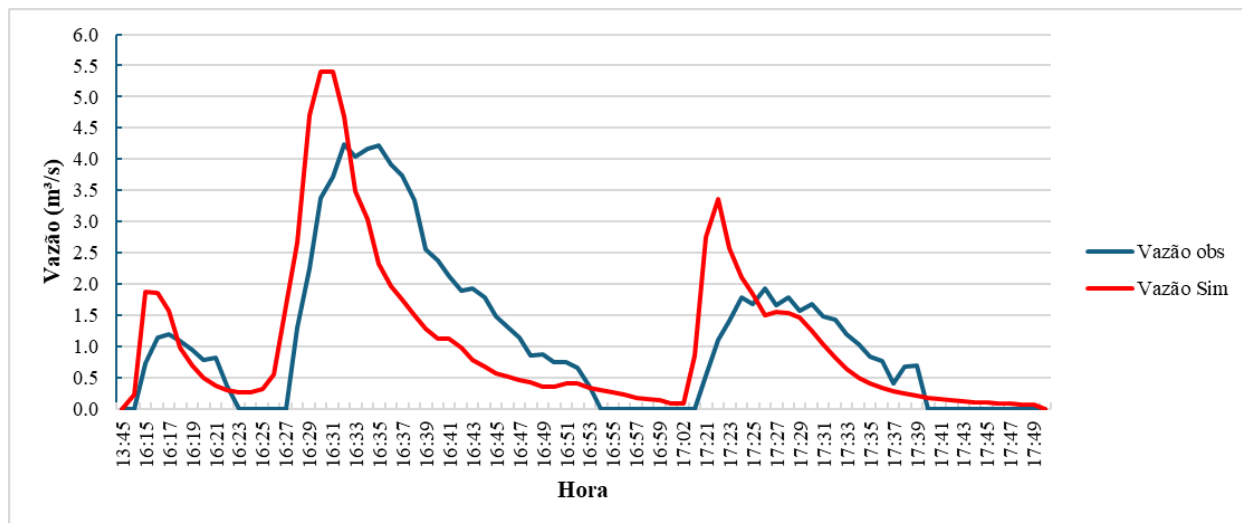


Figura 4 - Hidrograma do evento do dia 12/03/19 sem calibração.

Para dar prosseguimento à calibração, selecionaram-se os parâmetros a serem calibrados, os quais foram: largura da bacia (*width*), declividade (*slope*), n das áreas impermeáveis (*n-imperv*), o número CN e o coeficiente de rugosidade de Manning (*n*). Os limites aplicados para esses parâmetros foram definidos conforme recomendado por James (2005) e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites de calibração dos parâmetros selecionados. Fonte: (James, 2005).

Parâmetro	Limite inferior	Limite superior
<i>Width</i>	-15%	+41%
<i>Slope</i>	-12%	+29%
n-imperv	-9%	+18%
CN	-20%	+20%
n	0,011	0,026

Após definidos os parâmetros e seus limites, os dados foram inseridos na rotina de calibração desenvolvida em R, juntamente com os valores de vazão observados. Para a calibração utilizando o algoritmo PSO é necessário definir a quantidade de partículas, o número de iterações e os critérios de parada. No presente trabalho, foram definidas 20 partículas e 100 iterações totais. Foram adotados dois critérios de parada. O critério absoluto, em que se o NSE atingisse valor maior ou igual a 0,99 a rotina seria encerrada, e o critério relativo, em que se o NSE não obtivesse uma diferença maior que 1×10^{-5} com relação a iteração passada, ele seria considerado como o resultado. O critério que acontecer primeiro, determina quando a rotina de calibração deve finalizar.

Determinadas todas essas variáveis, iniciou-se a rotina. Para determinar os valores de parâmetros calibrados, tinham sido realizadas 66 iterações quando o critério relativo foi atingido. O tempo levado foi igual a 1 hora e 23 minutos, aproximadamente, e o NSE atingido foi igual a 0,91, indicando um incremento substancial do desempenho do modelo quando comparado ao resultado não calibrado. Costa (2022) realizou a calibração do modelo para o mesmo evento utilizando a ferramenta SRTC do programa PCSWMM e obteve valor de NSE igual a 0,85. Observa-se que a rotina conseguiu atingir um ajuste melhor. A Figura 5 apresenta o novo hidrograma das vazões simuladas e observadas.

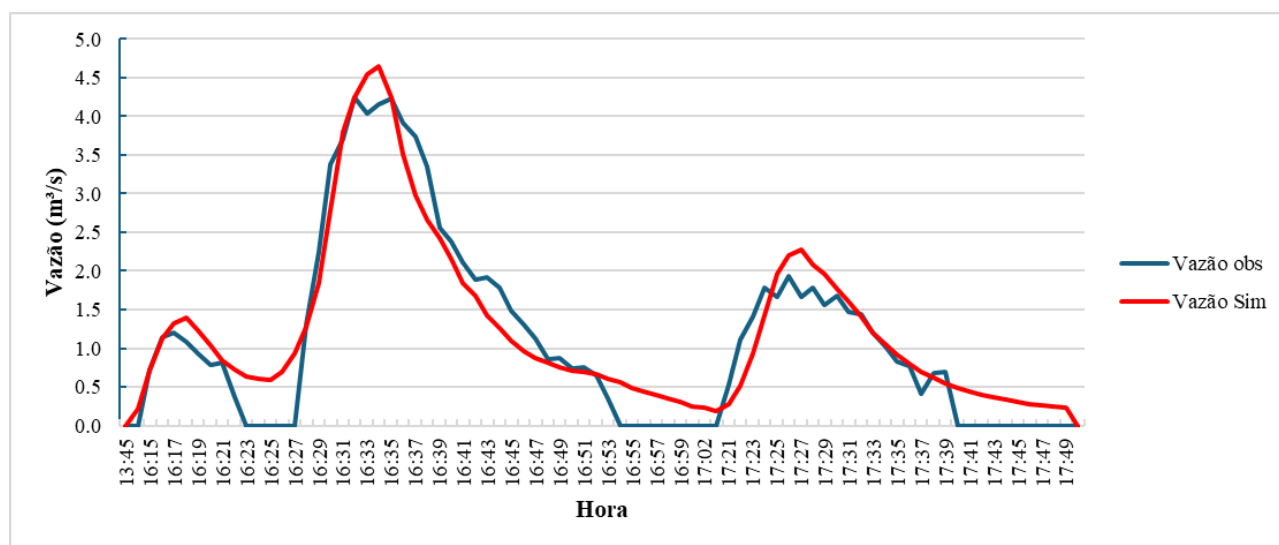


Figura 5 - Hidrograma do evento do dia 12/03/19 calibrado.

Além disso, a Figura 6 apresenta que o processo de calibração apresentou convergência satisfatória. Observa-se rápida convergência do algoritmo, com estabilização do NSE a partir da iteração 22. Paralelamente, há a redução do raio normalizado do enxame, indicando a diminuição da dispersão das partículas.

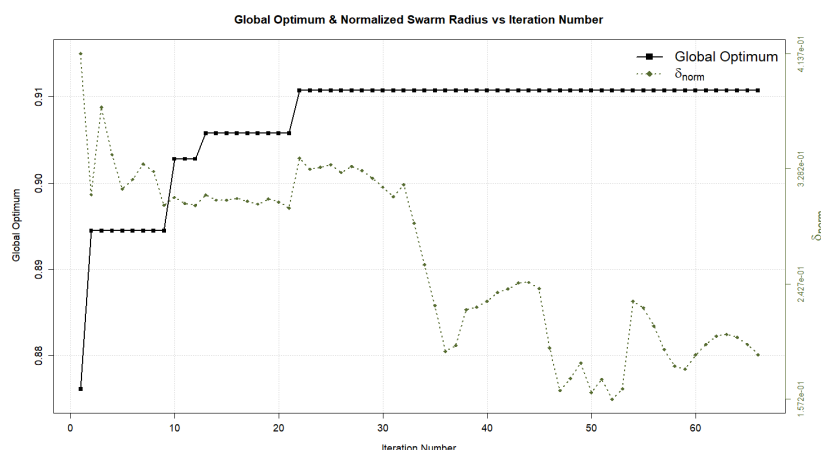


Figura 6 - Gráfico de convergência do PSO.

Diante dos resultados apresentados, observa-se que a rotina de calibração automática feita com o algoritmo de otimização PSO performou bem para o modelo da bacia do RF I, considerando o evento no dia 12/03/2019, ajustando a vazão simulada à observada. A rotina dispôs de pouco tempo computacional para convergir e conseguiu convergir antes da 100ª iteração. A vantagem de se utilizar uma rotina de calibração automática é a redução de subjetividade, quando comparada à calibração manual, por tentativa e erro.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou que a aplicação do algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) via linguagem R é uma estratégia eficaz para a calibração do SWMM. A rotina desenvolvida foi capaz de realizar um ajuste robusto entre as vazões simuladas e observadas na bacia do Riacho Fundo I, elevando o coeficiente NSE de 0,46 para 0,91, sendo considerado um ajuste satisfatório da série. Além disso, a convergência do algoritmo ocorreu em tempo computacional reduzido e de forma estável. Obter um modelo calibrado é fundamental para realizar a simulação de cenários e agir como suporte à tomada de decisão.

Por fim, recomenda-se para trabalhos futuros realizar a validação do modelo com outros eventos medidos e a verificação da convergência para diferentes quantidades de partículas iniciais, além de realizar a análise de sensibilidade dos parâmetros calibrados.

REFERÊNCIAS

- ADASA (2023). *Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal*. 2ª ed. Brasília, DF: Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal - ADASA: UNESCO, 324 p.
- CANHOLI, A. P. (2014). *Drenagem Urbana e Controle de Enchentes*. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 384 p.
- COSTA, M. E. L. (2022). *Poluição Difusa na Bacia do Lago Paranoá*. Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos—Brasília, DF: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 143 p..
- DINIZ, L. Silva. (1999). “Calibragem de Modelos Hidrológicos”. In: *Sistemas Inteligentes: Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais*. Org. por Galvão, C. O. e Valença, M. J. S., ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre - RS, pp. 151–164.
- JAMES, W. (2005). *Rules for responsible modeling*. CHI Guelph, Ontario, Canadá, 317 p.
- LEUTNANT, D.; DÖRING, A.; UHL, M. (2019). “swmmr - an R package to interface SWMM”. *Urban Water Journal*, v. 16, pp. 68-76.
- PDAD. (2024). *Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios*. Brasília, DF: Governo do Distrito Federal, 104 p.
- ROSSMAN, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. USEPA Cincinnati, OH, 353 p.
- TAGHIZADEH, S.; KHANI, S.; RAJAEI, T. (2021). “Hybrid SWMM and particle swarm optimization model for urban runoff water quality control by using green infrastructures (LID-BMPs)”. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 60 127032, p. 12.
- THARWAT, A. et al. (2017). *Particle Swarm Optimization - A Tutorial*. In: *Handbook of Research on Machine Learning Innovations and Trends*. Org. por Gaber, T. e Hassanién, A. E. Advances in Computational Intelligence and Robotics. pp. 614–635.
- TSUJI, T. M. (2018). *Monitoramento e Modelagem das Águas de Drenagem Pluvial no Núcleo Urbano da Bacia do Ribeirão Riacho Fundo, Brasília – DF*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos—Brasília, DF: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 150 p.
- TUCCI, C. E. M. (2005). *Gestão de Águas Urbanas*. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, DF. 197 p.
- XUE, F. et al. (2020). “Parameter Calibration of SWMM Model Based on Optimization Algorithm”. *Computers, Materials & Continua*, v. 65, n. 3, pp. 2189–2199.
- YANG, X. S.; KARAMANOGLU, M. (2013). *Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation*. In: *Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation*. Org. por Yang, X. S.; Gui, Z.; Xiao, R.; Gandomi, A. H. e Karamanoglu, M. Elsevier. pp. 3–23.
- ZAMBRANO-BIGIARINI, M.; ROJAS, R. (2013). “A model-independent Particle Swarm Optimisation software for model calibration”. *Environmental Modelling & Software*, v. 43, pp. 5–25.