

Autorização concedida ao Repositório Institucional da Universidade de Brasília (RIUnB) pelo Professor Leonardo Zandonadi Moura, em 20 de novembro de 2018, para disponibilizar o trabalho, gratuitamente, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da obra.

#### REFERÊNCIA

MOURA, Leonardo Zandonadi; CARVALHO, Antero Gabriel Vidal. Uso de modelo hidrodinâmico e medições de nível d'água para estimativa de vazão em canal de drenagem. IN: ENCONTRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ENASB), 18; SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (SILUBESA), 18., 2018, Porto.

## **USO DE MODELO HIDRODINÂMICO E MEDIÇÕES DE NÍVEL D'ÁGUA PARA ESTIMATIVA DE VAZÃO EM CANAL DE DRENAGEM**

### **USE OF HYDRODYNAMIC MODEL AND WATER LEVEL MEASUREMENTS FOR DISCHARGE ESTIMATION IN DRAINAGE CHANNEL**

*Zandonadi Moura Leonardo<sup>a, \*</sup>, Vidal Carvalho Antero Gabriel<sup>b</sup>*

<sup>a</sup>Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

<sup>b</sup>Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

#### **RESUMO**

Métodos alternativos para medição de vazão em situações de campo desfavoráveis são uma necessidade recorrente nos campos da hidráulica e hidrologia. Questões como custo e risco aos equipamentos e operadores podem gerar contextos de escassez de informação sobre locais de interesse. O presente trabalho empregou uma combinação de medições de nível d'água e uso do modelo hidrodinâmico HEC-RAS e de algoritmos evolucionários no pacote Solver do software Excel para estimar vazões em um canal de drenagem em Brasília, Brasil. O escoamento no local é supercrítico, rapidamente variado com ocorrência de ressalto hidráulico e com uma curva de cerca de 70 graus a jusante. Empregando hipóteses simplificadoras e fixando o coeficiente  $n$  de Manning entre 0,028 e 0,04, otimizou-se a vazão desconhecida tendo como função objetivo o erro quadrático do nível a jusante, observado por um linígrafo. O método convergiu, com os hidrogramas resultantes se mostrando pouco sensíveis à alteração de  $n$  na faixa proposta, e vazões de pico consistentemente próximas de 17 [m<sup>3</sup>/s]. Foi demonstrada uma alternativa conceitualmente simples e com softwares de uso disseminado para estimar vazão.

**Palavras Chave** – Estimativa de Vazão, Hidrometria, Modelo Hidrodinâmico, Escoamento Supercrítico, Calibração.

#### **ABSTRACT**

Alternative methods for discharge measurement in unfavorable field situations are a recurring necessity in the fields of hydraulics and hydrology. Issues such as cost and risk to equipment and operators may generate contexts of data scarcity on locations of interest. The present work has employed a combination of water depth gauging, use of the HEC-RAS hydrodynamic model and evolutionary algorithms in the Solver add-in from Excel software to estimate discharges on a drainage channel in Brasília, Brazil. On this site the flow is supercritical, rapidly varied with the occurrence of hydraulic jump and a curve of about 70 degrees downstream. Employing simplifying assumptions and setting Manning's  $n$  coefficient between 0,028 and 0,04, the unknown discharge was optimized having as objective function the squared error of water level downstream, observed by a level gauge. The method has converged, with resulting hydrographs showing small sensitivity to changes in  $n$  in the proposed range, and peak discharges consistently around 17 [m<sup>3</sup>/s]. A conceptually simple alternative to estimate discharge using widespread software has been demonstrated.

**Keywords** – Discharge Estimation, Hydrometry, Hydrodynamic Model, Supercritical Flow, Calibration.

---

\* *Autor para correspondência. Corresponding author.*

E-mail: lzmoura@unb.br

(Prof. L. Zandonadi Moura)

## 1 INTRODUÇÃO

As técnicas utilizadas para obtenção de séries históricas de vazão em rios envolvem o conhecimento sobre a geometria de seções transversais do rio, do seu perfil longitudinal, declividade de fundo e relação entre nível d'água e vazão. Essa relação é comumente expressa na chamada curva-chave (Boiten, 2003), uma curva de correlação desenvolvida utilizando medições simultâneas de vazão e nível d'água, formulações hidráulicas e métodos de ajuste estatístico de funções (Jacon e Cudo, 1989; Le Coz et al., 2014). A medição direta de vazão é consideravelmente onerosa e complexa, por isso a partir desse método passa-se a estimar vazões utilizando dados de níveis d'água, coletados com maior frequência (comumente diários).

No entanto, além da curva-chave não ser uma representação perfeita do processo, são escassas as medições de vazão em situações de cheia, nas quais o rio pode estar ocupando sua planície de inundação e os controles hidráulicos são bastante distintos daqueles presentes no seu leito. A relação entre nível e vazão pode ser não-única, com pares cota-vazão diferentes ocorrendo durante o tramo de subida de uma onda de cheia e o tramo de descida (Perumal, Shrestha e Chaube, 2004). A dinâmica de deposição-erosão de sedimentos pode modificar a geometria do rio. Todos esses fatores podem ser avaliados na hidrometria e modelagem de um rio (Di Baldassarre e Claps, 2011).

Modelos hidráulicos são outra importante ferramenta para determinação das profundidades de escoamento associadas com determinada vazão em um rio, ou com várias vazões simultâneas, em casos complexos de confluências entre vários rios. Os dados de entrada incluem seções transversais do rio e cotas da planície de inundação e de estruturas, que idealmente provém de levantamentos topográficos e têm alta resolução espacial. Além disso, é desejável que haja dados de estações fluviométricas com cotas do nível d'água e vazão.

Existem técnicas disponíveis para a determinação de vazões a partir de medições de nível em dois locais em um escoamento gradualmente variado, inclusive em situações transientes (Damangir e Abedini, 2014; Oliveira et al., 2016; Perumal et al., 2007). Isso envolve a calibração de um modelo computacional, que pode ser realizada via algoritmos evolucionários.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Local de interesse e arranjo experimental

O trabalho foi realizado em um canal de drenagem localizado ao lado de uma estação de tratamento de esgoto na região administrativa do Riacho Fundo, Brasília, DF, Brasil. O canal é o exutório do sistema de drenagem de águas pluviais da bacia que corresponde a boa parte da região, onde outros trabalhos de pesquisa do grupo estão sendo realizados, daí o interesse nas medições de vazão.

O trecho estudado corresponde a uma transição entre vertentes com forte declividade, a montante o canal passa por uma queda de 20 metros ao longo de 280 metros de distância. Com isso o escoamento durante eventos de precipitação tem altas velocidades e ocorre no regime supercrítico, o que impossibilitou sua medição com os equipamentos disponíveis no grupo de pesquisa, seja por ultrapassar os limites superiores de velocidade do equipamento (molinetes e ADCs), por temor de que a ancoragem do equipamento não fosse resistente o suficiente para prevenir seu carregamento, ou de que material carregado pelo escoamento causasse danos.

Com cerca de 26 metros de comprimento, o trecho de canal em concreto rugoso tem fundo variado, partes em brita, partes em concreto e em alguns pedaços coberto por musgo. Conforme exibido na Figura 1, sua largura é de três metros, e a extremidade de jusante é uma curva cujas características aproximadas são: ângulo de 70 graus e raio de 9,74 metros.

A profundidade média é dois metros, e a declividade vai de fundo plano a 2,2%. Cerca de 30 metros a montante e logo a jusante ocorrem degraus de cerca de 0,5 metro. Foi realizado levantamento topográfico do trecho empregando GPS geodésico e nível ótico.

Foram instalados linígrafos modelo WL16 da marca Global Water, com elemento sensor de diafragma de silicone, transdutor úmido/úmido, nas extremidades do canal. No trecho entre os linígrafos o canal não possui degraus. O intervalo de obtenção de dados dos sensores foi fixado em cinco minutos. O monitoramento foi executado no período entre a segunda quinzena de fevereiro de 2018 e a primeira semana de abril.

## 2.2 Modelagem e otimização

A modelagem hidrodinâmica foi realizada com o software HEC-RAS. Cada par de medidas dos linígrafos (montante e jusante) foi tratado como um escoamento permanente (vide seção resultados e discussão a seguir para justificativa). As condições de contorno empregadas foram: escoamento crítico na saída do trecho (cerca de 1 metro a jusante da seção com um dos linígrafos - Jus) e com a profundidade medida pelo linígrafo de montante (Mon) na entrada.

Foi utilizado um único valor do coeficiente  $n$  de Manning do canal para todo trecho a fim de se obter uma representação parcimoniosa dos parâmetros do problema. Valores de  $n$  entre 0,028 e 0,032 foram adotados, incorporando o efeito mais relevante, da curva ao final do trecho, bem como das mudanças de material do fundo e estado das laterais do canal, bastante degradadas. O valor máximo citado no manual do software HEC-RAS (Brunner, 2001) para concreto inacabado (áspero) é de 0,02. O conhecido método de Cowan sugere que os valores de  $n$  podem ser majorados de até 30% devido ao efeito de meandros.

O suplemento Solver do software Excel foi empregado, colocando as vazões como parâmetro modificável e utilizando como função objetivo a ser minimizada o quadrado do erro na profundidade simulada a jusante:

$$F_{OBJ} = (Cota_{sim,jus} - Cota_{obs,jus})^2 \quad (\text{eq. 1})$$

onde  $Cota_{sim,jus}$  representa a cota da superfície simulada em [m] e  $Cota_{obs,jus}$  a observada.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme explicitado anteriormente, o escoamento no local é de alta velocidade, e o canal é relativamente estreito, o que faz com que efeitos de armazenamento sejam desprezíveis. É possível observar nos hidrogramas de montante e jusante da Figura 2 que não há atraso do pico da onda de cheia entre os linígrafos. Os efeitos da resistência do canal ao escoamento também ficam explícitos, com diferenças de cerca de um metro de profundidade do escoamento entre os linígrafos no pico da cheia, o que provavelmente indica a ocorrência de ressalto hidráulico, hipótese reforçada pela simulação.

A Figura 3 mostra que na faixa de valores de  $n$  de Manning entre 0,028 e 0,04 existe pouca variação nas vazões otimizadas, com a vazão de pico consistentemente próxima dos 17 [m<sup>3</sup>/s]. No tramo de queda da hidrógrafa, o modelo com  $n = 0,028$  diverge ligeiramente dos outros. No entanto, quando se reduz o coeficiente  $n$  para 0,025, o otimizador não consegue reduzir o erro na cota simulada de jusante dentro do tempo programado, e as vazões estimadas diferem significativamente.

No Quadro 1 é possível verificar que as estatísticas de erro (RMSE e erro quadrático máximo) são maiores para o modelo com  $n = 0,025$ , mostrando uma pior reprodução do observado.



Figura 1. Vista por imagem de satélite da curva de aproximadamente 70 graus, com 9,74 [m] de raio, no canal de drenagem. Triângulos representam os linígrafos de Montante (Mon) e Jusante (Jus). Fonte: Google Earth.

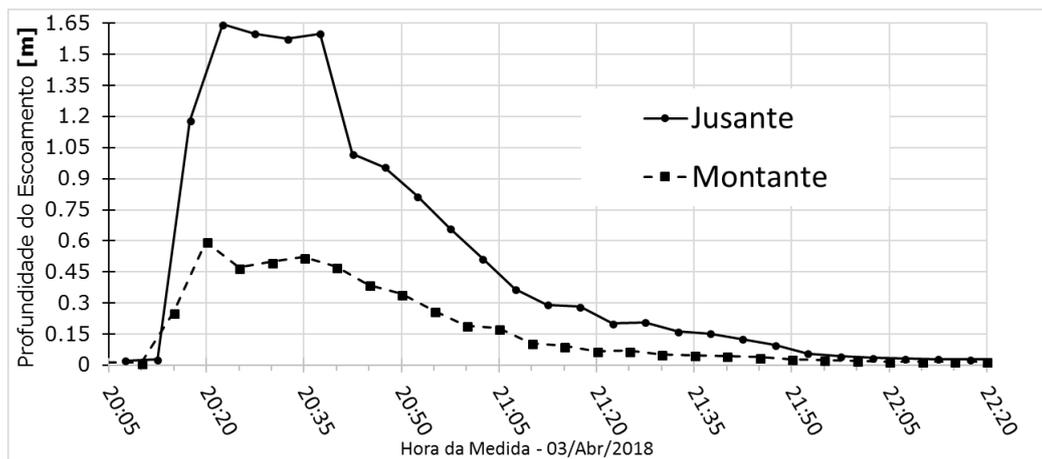


Figura 2. Medidas obtidas para o evento simulado com linígrafos instalados na lateral do canal

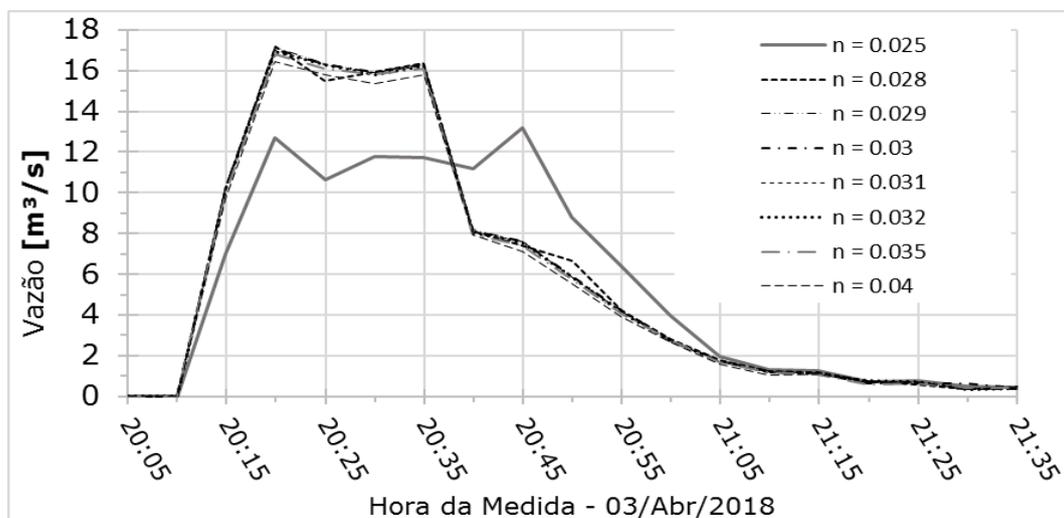


Figura 3. Vazões estimadas para o evento simulado com diferentes valores do coeficiente n de Manning

Quadro 1. Raiz do erro médio quadrático (RMSE) e erro quadrático máximo (MáxSE) para simulações com diferentes valores de  $n$  de Manning.

$n$ Manning	0,04	0,035	0,032	0,031	0,03	0,029	0,028	0,025
RMSE	0,00950	0,00255	0,00779	0,00781	0,00282	0,00394	0,02114	0,28317
MáxSE	0,00074	0,00006	0,00053	0,00048	0,00007	0,00011	0,00358	0,41952

#### 4 CONCLUSÕES

Diante da dificuldade em medir vazão em um trecho de canal de drenagem com escoamento supercrítico utilizando os equipamentos disponíveis em um grupo de pesquisa local, uma técnica alternativa empregando medições de nível d'água apenas e ferramentas computacionais foi empregada. A situação de campo trazia complicações como escoamento rapidamente variado, com ressalto hidráulico e também transiente, com hidrogramas agudos. O arranjo experimental também trazia problemas, pois contava-se com um linígrafo intermediário aos dois utilizados, que teve problemas de funcionamento. Isso trouxe dificuldades quanto às condições de contorno.

Algumas hipóteses justificáveis se fizeram necessárias: utilizar como condição de contorno de jusante o escoamento crítico, já que há um degrau próximo ao linígrafo de jusante; considerar o escoamento como uma sucessão de regimes permanentes, já que o curto trecho, fluxo confinado ao canal e altas velocidades presentes viabilizam uma consideração de onda cinemática; usar um coeficiente  $n$  de Manning único para o canal, a fim de facilitar a otimização computacional.

Softwares gratuitos (HEC-RAS) ou de uso bastante disseminado (Excel) foram utilizados, e com o emprego de algoritmos evolucionários (suplemento Solver do Excel) foi possível otimizar as vazões para reproduzir o hidrograma observado no linígrafo de jusante. O resultado da vazão otimizada é pouco modificado pela alteração do coeficiente  $n$  na faixa de valores  $0,028 \leq n \leq 0,04$ . O modelo reforçou a hipótese de ocorrência de ressalto hidráulico. As vazões de pico estimadas chegam a cerca de  $17 \text{ [m}^3/\text{s]}$ .

Como trabalhos futuros pretende-se: executar a otimização sem fixar a priori o coeficiente  $n$  de Manning e considerar regime transiente, com uma curva-chave a montante cujos parâmetros também serão variáveis a otimizar. Em outras estações chuvosas o arranjo experimental pode ser modificado para incluir no mínimo mais um linígrafo, e idealmente medições de velocidade e vazão por técnicas como velocimetria por imagem, radar de velocidade de superfície, dentre outras.

#### REFERÊNCIAS

- Boiten, W. *Hydrometry*. Rotterdam; Brookfield, Vt., USA: Balkema, 2003.
- Brunner, G. W. *HEC-RAS river analysis system: User's manual*. USA: US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 2001.
- Damangir, H.; Abedini, M. J. System identification and subsequent discharge estimation based on level data alone—Gradually varied flow condition. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 36, p. 24–31, abr. 2014.
- Di Baldassarre, G.; Claps, P. A hydraulic study on the applicability of flood rating curves. *Hydrology Research*, v. 42, n. 1, p. 10–19, 2011.
- Jaccon, G.; Cudo, K. J. *Curva-chave: Análise e Traçado*. Brasília, Brasil: DNAEE, 1989.
- Le Coz, J. et al. Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, v. 509, p. 573–587, fev. 2014.
- De Oliveira, F. A. et al. Uso de modelo hidrodinâmico para determinação da vazão a partir de medições de nível. *RBRH*, v. 21, n. 4, p. 707–718, dez. 2016. ISSN 2318-0331. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616007>.

Perumal, M. et al. A methodology for discharge estimation and rating curve development at ungauged river sites. *Water Resources Research*, v. 43, n. 2, p. n/a-n/a, fev. 2007.

Perumal, M.; Shrestha, K. B.; Chaube, U. C. Reproduction of hysteresis in rating curves. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 130, n. 9, p. 870–878, 2004.