

**Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**

---

# Análise do Processo de Infiltração de Água na Bacia do Rio Cônego com Base na Plataforma MOHID e suas Diferentes Formulações

Ademilton Luiz Rodrigues de Souza<sup>1</sup>

Wagner Rambaldi Telles<sup>2</sup>

Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues<sup>3</sup>

Antônio José da Silva Neto<sup>4</sup>

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, IPRJ/UERJ, Nova Friburgo, RJ

**Resumo.** O presente trabalho traz a simulação do escoamento e infiltração da água oriunda de eventos de precipitação ocorridos na bacia do rio Cônego, localizada no município de Nova Friburgo, estado do Rio de Janeiro. O modelo bidimensional foi obtido através do sistema MOHID, tendo como base dados topográficos oriundos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Nova Friburgo. Foram utilizadas as formulações explícita e implícita, bem como as diferentes simplificações das equações de Saint Venant durante as simulações realizadas. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios e convergentes. Pode-se concluir que o sistema MOHID representou bem a rede de drenagem assim como o processo de infiltração e o perfil de escoamento da bacia do rio Cônego.

**Palavras-chave.** Simulação Ambiental, Infiltração de Água, MOHID, Rio Cônego

## 1 Introdução

Os recursos hídricos constituem um dos componentes naturais que mais sofrem com os impactos negativos causados pelas interferências antrópicas. Diversos eventos, tais como: expansão e adensamento das cidades sem o devido planejamento, inadequação de antigas estruturas de drenagem para as demandas atuais de deflúvios e mudanças climáticas, provocam alagamentos e inundações de trechos urbanos, requerendo solução de técnicas em Engenharia Hidráulica [3].

---

<sup>1</sup>ademiltonluiz@gmail.com

<sup>2</sup>wr\_telles@yahoo.com.br

<sup>3</sup>pwatts@iprj.uerj.br

<sup>4</sup>ajsneto@iprj.uerj.br

Neste contexto, há a necessidade do estudo da delimitação e do regime de chuvas para a bacia hidrográfica e suas relações de intensidade, frequência, escoamento e infiltração, a fim de fazer um planejamento urbano adequado para evitar possíveis inundações. De acordo com [4], as delimitações de bacias hidrográficas desenvolvidas com base em levantamentos topográficos e por meios analógicos demandam muito tempo e estão sujeitas a muitos erros. Surge então a necessidade de utilização de softwares que se baseiam em informações geoespaciais que, dentre outras finalidades, podem ser utilizadas para previsão de variáveis hidrológicas, perfil de escoamento e estimativa de inundações. Dessa forma, torna-se indispensável o conhecimento das causas e consequências da urbanização no incremento da magnitude e na quantidade de eventos de inundações, visando estabelecer um ponto de equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e as necessidades dos ecossistemas, garantindo, assim, o desenvolvimento sustentável [2].

Neste trabalho é apresentado o perfil de escoamento e o processo de infiltração da água da bacia do rio Cônego, o qual constitui um dos principais aportes fluviais que cortam a cidade de Nova Friburgo-RJ, a fim de obter uma estimativa de possíveis inundações na região banhada por essa bacia. Para a simulação desses processos foi utilizado o sistema MOHID, mais especificamente, a interface gráfica MOHID GIS e a ferramenta MOHID Land. Os resultados encontrados foram comparados com as diferentes simplificações das equações de Saint Venant frente às formulações explícita e implícita.

## 2 Metodologia

O conhecimento das características físicas de uma bacia hidrográfica permite prever espacialmente o regime hidrológico da região banhada pela mesma. Com a tecnologia digital aplicada em modelagem computacional e através das equações físicas e da ocorrência de precipitação em determinados pontos de uma bacia hidrográfica é possível estimar a quantidade de água presente em cada compartimento da superfície da bacia, sua posição no momento seguinte e simular seu escoamento [5].

Os processos de infiltração transiente e movimento da água no solo são governados pela equação de Richards que tem a seguinte descrição:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \vec{X}} K(\psi) \left[ \frac{\partial \psi}{\partial \vec{X}} + \frac{\partial z}{\partial X} \right] \quad (1)$$

onde  $\theta$  é a umidade do solo;  $t$  é o tempo;  $z$  é a coordenada vertical;  $\vec{X}$  é o vetor contendo as variáveis de posição;  $\psi$  é a pressão hidrostática e  $K(\psi)$  é a condutividade hidráulica.

O escoamento em rios por meio de um modelo unidimensional pode ser descrito pelas equações de Saint Venant, que são deduzidas a partir das Equações (2) e (3a) da Continuidade e Quantidade de Movimento, respectivamente, e que representam a base para modelar um escoamento em corpos de água. As equações de Saint Venant podem ser simplificadas em modelos que são classificados como de (i) onda dinâmica, dado pela Equação (3a), que utiliza a equação da Quantidade de Movimento em sua forma mais completa; (ii) onda de difusão, conforme a Equação (3b), onde não são considerados os termos de inércia; e (iii) onda cinemática, apresentado pela Equação (3c), onde são desconsiderados também os termos de pressão [6]:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + Ag \left( \frac{\partial h}{\partial x} - S_o + S_f \right) = 0 \tag{3a}$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = S_o - S_f \tag{3b}$$

$$Q = \frac{AR_h^{2/3} \sqrt{S_o}}{n} \tag{3c}$$

onde  $Q$  é a descarga líquida;  $A$  é a área da seção transversal;  $g$  é a aceleração da gravidade;  $h$  é a altura da lâmina d'água;  $S_o$  é a declividade do fundo do canal;  $S_f$  é a declividade da linha de energia;  $R_h$  é o raio hidráulico e  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning.

## 2.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Cônego tem área de drenagem de aproximadamente  $30 \text{ km}^2$  e está localizada totalmente no município de Nova Friburgo, na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. O rio Cônego, gerado da confluência do rio Caledônia com o córrego Cascatinha, nasce na serra da Boa Vista, Pico Caledônia, e percorre cerca de  $10,9 \text{ km}$  antes de encontrar o rio Santo Antônio, no bairro Olaria. A região da bacia caracteriza-se pelo clima tropical de altitude com verões brandos e chuvosos e temperaturas médias de  $13^\circ\text{C}$  no inverno e  $24^\circ\text{C}$  no verão. As precipitações máximas ocorrem entre os meses de novembro e abril e as mínimas entre maio e outubro [2].

O mapa de localização da bacia do rio Cônego está apresentado na Figura 1 a seguir:

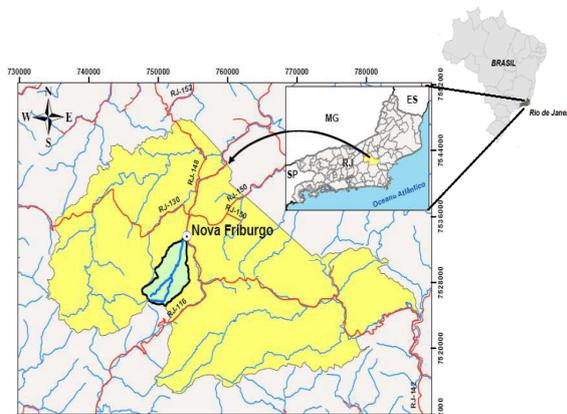


Figura 1: Bacia Hidrográfica do Rio Cônego. Fonte: Adaptado de [2]

## 2.2 Sistema de Modelagem MOHID

A delimitação, bem como os processos de escoamento e infiltração da água resultante de eventos de precipitação na bacia do rio Cônego, foi obtida através da plataforma de

modelagem MOHID, o qual é um sistema integrado de modelos matemáticos desenvolvido pelo *Marine and Environmental Technology Research Center* (Centro de Pesquisas Marinhas e Ambientais - MARETEC) em parceria com o Instituto Superior Politécnico (IST), pertencente a Universidade Técnica de Lisboa. O MOHID inclui contribuições de uma equipe permanente de pesquisadores, de alunos de doutorado dos Programas de Engenharia Ambiental e Mecânica, bem como de alunos do Curso de Mestrado em Modelagem de Ambientes Marinhos [1]. Ele está implementado em linguagem FORTRAN 95, utilizando uma filosofia de programação orientada por objetos. Esta característica permite ao usuário a inclusão de novos módulos, possibilitando a modificação e melhoramento do código. Esse sistema é dividido em quatro ferramentas: MOHID Water, MOHID Land, MOHID River Network e MOHID Soil, que juntos constituem mais de 50 módulos, somando mais de 150 mil linhas de programação possibilitando simulações com abordagem uni, bi e tridimensionais.

Neste trabalho, a geração da malha computacional utilizada nas simulações foi implementada a partir da base de dados informada por [7] no MOHID GIS.

### 3 Resultados

Para a construção da rede de drenagem e a delimitação da bacia do rio Cônego foram utilizados os dados topográficos originários de Cartas Planialtimétricas vetorizadas na escala 1:50.000, fornecidas pelo IBGE e cedidas pela prefeitura municipal de Nova Friburgo [7]. Após a criação do modelo digital do terreno (MDT) na interface MOHID GIS, foram removidas as possíveis depressões e a seguir construídas a rede de drenagem e a delimitação da bacia hidrográfica do rio Cônego, a qual foi realizada através da determinação de um ponto (célula) de saída da rede de drenagem, considerado o exutório da bacia.

As medidas de precipitação e nível de água do rio Cônego foram obtidas de duas estações telemétricas, Olaria (pluviométrica) e Pico Caledônia (pluviométrica), com dados discretizados a cada 15 minutos durante o período de 21 horas do dia 13/11/2011 até às 13 horas do dia 14/11/2011. Quanto à discretização temporal, foram testadas as formulações explícita e implícita, de modo a se avaliar até que ponto a escolha entre essas opções disponibilizadas no MOHID poderia influenciar os resultados gerados nas simulações.

Nas Figuras 2 e 3 são apresentadas as vazões no trecho central do rio Cônego na estação de Olaria e em seu exutório (respectivamente, nos nós 293 e 367 da malha discretizada), utilizando os dados pluviométricos registrados tanto na estação de Olaria quanto na estação do Pico Caledônia. Para a estação de Olaria foram utilizados registros que totalizaram cerca de 249,8 mm de precipitação, enquanto que para a estação Pico Caledônia foi informado ao modelo uma precipitação acumulada de 322 mm. Observa-se na Figura 2 que, considerando a precipitação registrada na estação de Olaria, entre esse ponto e o exutório houve uma forte atenuação da vazão do rio simulada pelo modelo, em decorrência, provavelmente, de infiltração no solo. Por outro lado, considerando os dados obtidos na estação do Pico Caledônia, ainda que essa atenuação se mostre igualmente acentuada, a vazão simulada no exutório foi consideravelmente maior, provavelmente em decorrência da

saturação do solo e a redução de sua capacidade de infiltração (Figura 3). Isso ocorreu devido a maior intensidade e volume das chuvas considerados nessa avaliação.

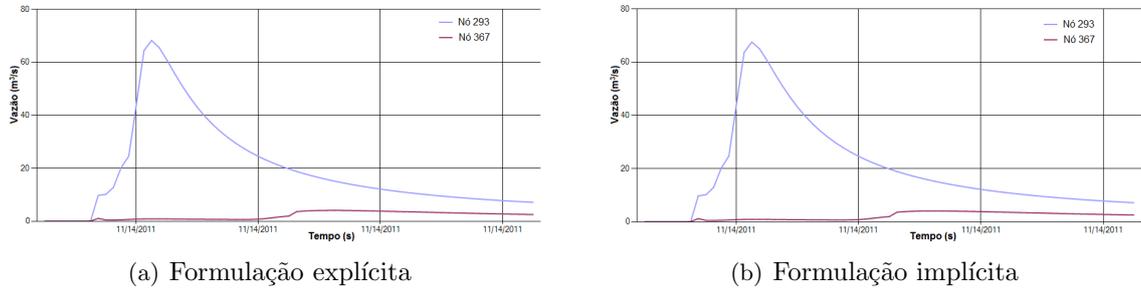


Figura 2: Vazão ( $m^3/s$ ) na estação de Olaria (nó 293) e no exutório (nó 367) utilizando os dados da estação Olaria.

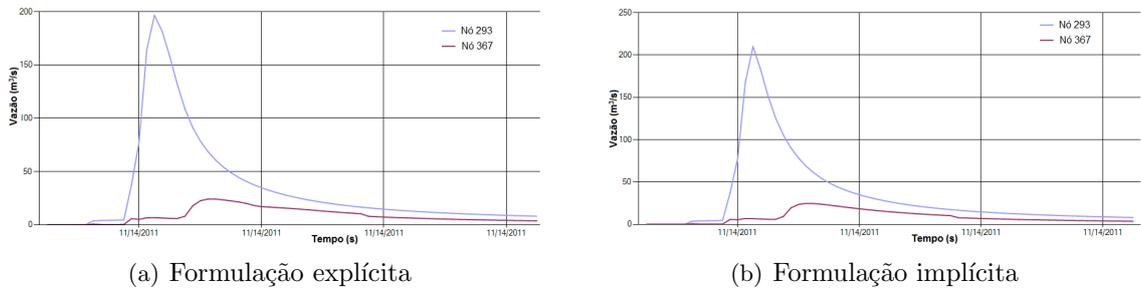


Figura 3: Vazão ( $m^3/s$ ) na estação de Olaria (nó 293) e no exutório (nó 367) utilizando os dados da estação de Pico Caledônia.

Nas Figuras 4(a-f) são apresentados os índices de precipitação e infiltração nas estações de Olaria e Pico Caledônia ocorridos durante o período de estudo. Observa-se pelas Figuras 4(a-c) que no dia 13/11/2011 às 22:30h houve um pico máximo de precipitação registrado na estação de Olaria, atingindo 55,2 mm/h. Nesse período a capacidade de infiltração foi de aproximadamente 40 mm/h, e cerca de 15,2 mm/h não estavam sendo absorvidos pela bacia. Como o nível de alta precipitação não se manteve, não houve evidências significativas de inundação na região, uma vez que a capacidade de infiltração superou o de precipitação na maior parte do tempo. As Figuras 4(d-f) mostram que na noite do dia 13/11/2011 às 23:30h o pico máximo de precipitação na estação do Pico do Caledônia foi de 75,2 mm/h, superior a máxima registrada na estação de Olaria. Nesse período a capacidade de infiltração foi de aproximadamente 20,8 mm/h, e cerca de 54,4 mm/h não entraram no processo de infiltração, indicando um alto escoamento superficial na bacia, o que justifica o aumento da vazão ao longo do rio Cônego.

Adotando-se os modelos de onda de difusão e onda dinâmica, os resultados gerados nas simulações foram similares. Contudo, aplicando-se o modelo de difusão só se obteve convergência com a adoção da formulação explícita, enquanto que com o modelo de onda dinâmica não se obteve convergência com nenhuma das duas formulações.

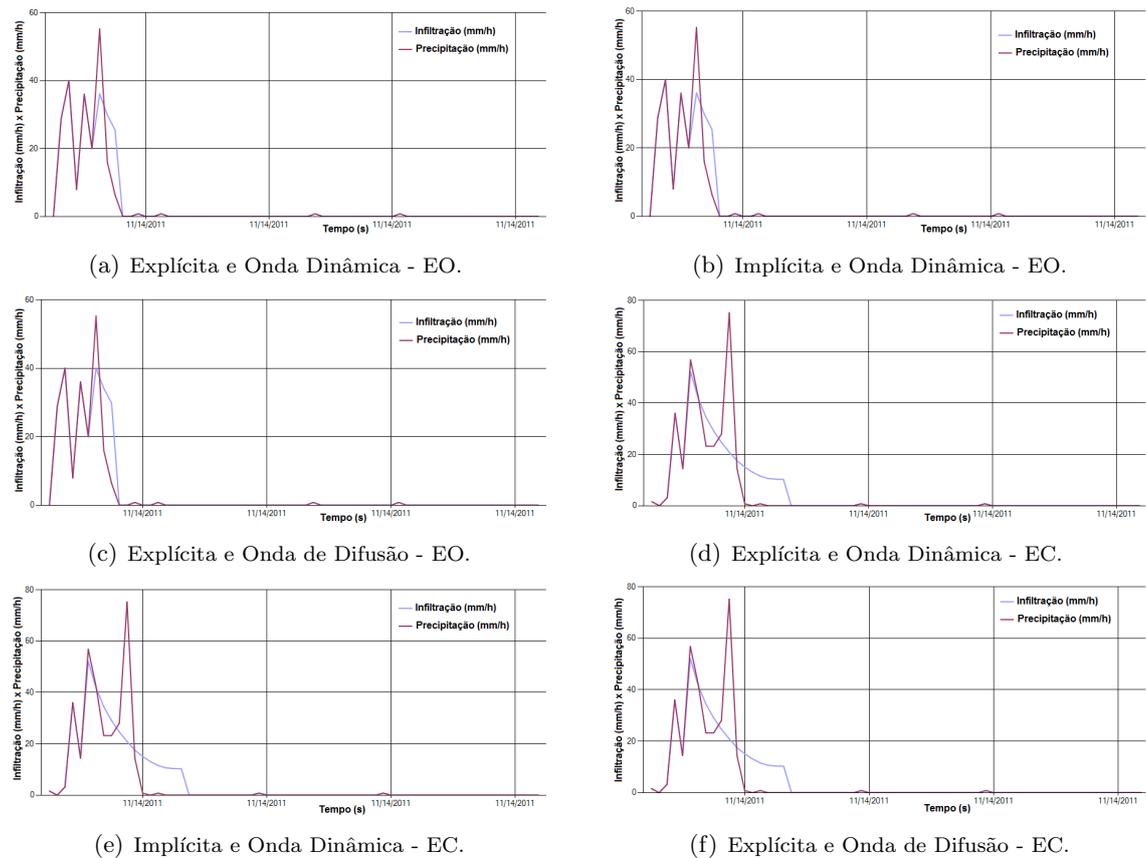


Figura 4: Precipitação e Infiltração na Estação de Olaria (EO) e Estação de Caledônia (EC) frente as diferentes formulações e simplificações das Equações de Saint Venant.

## 4 Conclusões

Neste trabalho verificou-se a possibilidade de utilização do sistema MOHID na delimitação e avaliação dos processos de escoamento e infiltração provenientes de eventos de precipitação que ocorrem na bacia do rio Cônego, bem como as influências e diferenças existentes entre as formulações implícitas e explícitas disponíveis no referido sistema.

Os modelos construídos neste estudo foram alimentados por informações discretizadas em curtos intervalos de tempo contendo registros de eventos extremos de precipitação que causaram incremento significativo na vazão do rio Cônego. Além disso, a duração e magnitude das precipitações registradas nas estações de observação garantem a idealização de que essas ocorreram de maneira homogênea em toda bacia do rio. Além disso, com a análise dos resultados observou-se que, mesmo com a redução da capacidade máxima de infiltração da bacia, o período de máxima precipitação foi curto para afirmar que houve evidências significativas de inundação para a região de estudo.

Para futuros trabalhos, recomenda-se comparar os resultados obtidos pelo MOHID com outros softwares para comprovar a eficiência e confiabilidade das simulações aqui

apresentadas, bem como utilizar a simplificação de onda cinemática das equações de Saint Venant para outras bacias e outras regiões. Por outro lado, como os resultados referentes aos níveis d'água e vazões do rio Cônego foram obtidos com a calibração do MOHID sem considerar os efeitos da infiltração [6], uma abordagem inversa envolvendo métodos de otimização para a determinação de alguns parâmetros visando a melhor calibração do sistema MOHID torna-se desejável.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, CNPq, FAPERJ e Termomacaé Ltda.

## Referências

- [1] F. Braunschweig e L. Fernandez. MOHID: Manual do Usuário, Essentia Editora, Campos dos Goytagazes-RJ, (2010).
- [2] J. E. F. Farias e R. G. M. Botelho. Análise Comparativa do Tempo de Concentração: Um Estudo de Caso na Bacia do Rio Cônego, Município de Nova Friburgo/RJ, XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió-AL, (2011).
- [3] M. S. Lourenço, J. L. Lugon e W. R. Telles. Construção de Modelo Digital de Rede de Drenagem de Bacia Urbana. Estudo de Caso em Rio das Ostras: Uso de Plantas 1:2000, SHIDRO, (2014).
- [4] E. J. Ramme e C. M. Krüger. Delimitação de bacias hidrográficas com auxílio de geoprocessamento. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, (2007).
- [5] P. P. G. Rodrigues e J. L. Lugon. Uso de Modelos Matemáticos na Gestão de Recursos Hídricos, (2012).
- [6] W. R. Telles. Previsão do Comportamento Hidráulico de um Rio com Base na Estimativa de Coeficientes que Controlam seu Escoamento. Estudo de Caso: Rio Bengalas, Nova Friburgo-RJ. Tese Doutorado em Modelagem Computacional, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, (2014).
- [7] W. R. Telles, P. P. W. Rodrigues e A. J. Silva Neto. Utilização de Sistemas de Informações Geográficas na Delimitação de Bacias Hidrográficas, Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, vol. 7, n. 1, (2013).
- [8] W. R. Telles, P. P. W. Rodrigues e A. J. Silva Neto. Simulação Bidimensional - Horizontal da Dispersão de um Traçador em Meio Fluvial. XXXIV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, Águas de Lindóia, SP, (2012).