

USO DE MODELO RASTER PARA SIMULAÇÃO DE ONDA DE CHEIAS EM UM VALE ENCAIXADO

Matheus Martins de Sousa^{1} & Marcelo Gomes Miguez² & Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira³ & Osvaldo Moura Rezende⁴ & Bianca Maria Gomes da Silva⁵ & Ana Caroline Pitzer Jacob⁶ & Luiza Batista de França Ribeiro⁷*

Resumo - A maior facilidade de obtenção de dados topográficos e de modelos digitais de elevação proporcionou a difusão dos modelos chamados "Raster". A estrutura de um arquivo Raster, utilizado nesse modelo, é adaptado para funcionar como um modelo Quasi-2D, onde cada pixel funciona como uma célula, com nível de água horizontal nos elementos e fluxo em função das diferenças de nível de água entre o elemento e seus quatro vizinhos. Devido à maior velocidade de processamento dos computadores, viabilizando ainda mais o uso de modelos 2D, o modelo Raster tem ganhado mais credibilidade na comunidade acadêmica e tem apresentado resultados satisfatórios. O presente trabalho busca avaliar o Modelo de Células Escoamento – MODCEL, com o uso de células Raster, aplicando-o a um caso de estudo testado com modelos 2D. O teste consiste na simulação da onda de cheia após ruptura de uma barragem localizada num vale encaixado. O objetivo é avaliar a capacidade do modelo em simular os escoamentos resultantes de uma grande onda de cheia, possibilitando a previsão do risco de inundação decorrente de falha da represa. Os resultados permitem avaliar o funcionamento do modelo MODCEL-Raster e compará-lo a modelos consagrados mundialmente.

Palavras-Chave – Modelo Raster, Onda de Cheia, MODCEL.

USE OF RASTER MODEL FOR FLOOD WAVE SIMULATION IN A VALLEY FLOODING

Abstract – The easiness to obtain topographic data and digital elevation models in nowadays provided the diffusion of the so-called "Raster" models. The structure of a Raster file, used in this kind of model, is adapted to work as a Quasi-2D model, where each pixel behaves as a cell, with horizontal water level in the elements and flow as a function of differences in water level between the element and its four neighbors. Due to the higher processing speed of computers, making the use of 2D models even more feasible, the Raster model has obtained more credibility in the academic community and has presented satisfactory results. The present work seeks to evaluate the Flow Cell Model - MODCEL, with the use of Raster cells, applying it to a case study tested with 2D models. The test consists in the simulation of the flood wave after rupture of a dam located in an embedded valley. The objective is to evaluate the model's ability to simulate the flows resulting from a large flood wave, making possible the prediction of flood risk due to dam failure. The results allow to evaluate the operation of MODCEL-Raster model and to compare it to models consecrated worldwide.

Keywords – Raster model, Flood Wave, MODCEL.

INTRODUÇÃO

¹ AquaFluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos, matheus@hidro.ufrj.br

² COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, marcelomiguez@poli.ufrj.br

³ COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, krishnamurti@poli.ufrj.br

⁴ AquaFluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos, om.rezende@hidro.ufrj.br

⁵ Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, bianca_bia_gomes@poli.ufrj.br

⁶ AquaFluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos, caroline@aquaflexus.com.br

⁷ AquaFluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos, luiza@aquaflexus.com.br

* Autor Correspondente.

Com o incremento da facilidade de obtenção de dados topográficos, em quantidade e qualidade, no início deste século, através de processos como o LIDAR (*Light Detection And Ranging*), uma nova categoria de modelos vem ganhando um espaço maior na comunidade acadêmica internacional. Estes são os modelos chamados “Raster”.

Um arquivo *raster* é representado por uma matriz $M(i, j)$, composta por i colunas e j linhas, que definem células denominadas pixels. Cada pixel representa um valor referente ao atributo, além dos valores que definem o número da coluna e o número da linha, correspondendo, quando o arquivo está georeferenciado, a um par de coordenadas x e y que se encontra dentro da área abrangida por aquele pixel.

No modelo “Raster”, a estrutura de um arquivo *raster* é adaptado para funcionar como um modelo Quasi-2D. Essa configuração é empregada desde a década de 1980 (WOOLHISER e LIGGETT, 1967 *Apud* JOHNSON e MILLER, 1997; MORRIS e WOOLHISER, 1980 *Apud* JOHNSON e MILLER, 1997), mas foi no início do século XXI, com a abundância de dados topográficos, que passa a ter sua aplicação mais difundida (HUNTER *et al.*, 2007). Atualmente esse tipo de modelo tem ganhado cada vez mais credibilidade para a modelagem de planícies de inundações (BATES e DE ROO, 2000; HORRIT e BATES, 2001; HUNTER *et al.*, 2005; PAZ, 2008, MOUSSA e BOCQUILLON, 2009; CASTELLARIN *et al.*, 2011; OIKONOMOU, 2013; SKINNER *et al.*, 2015), tendo como principal vantagem, em relação a modelos 2D, a velocidade de processamento (PAZ, 2010).

No modelo “Raster”, cada pixel funciona como uma célula de um modelo Quasi-2D, com nível d’água horizontal nos elementos e fluxo hidráulico entre o elemento e seus quatro vizinhos calculado em função das diferenças de níveis d’água, podendo, ainda, incorporar fontes e sumidouros (PAZ, 2010). Nesse modelo, cada célula/pixel tem como atributo um valor referente a elevação, equivalente à média de todas as alturas existentes no seu interior. Tamanhos de grade de 10 a 100 metros tendem a representar melhor a topografia (HUNTER *et al.*, 2007), no entanto, deve-se buscar o ponto de equilíbrio entre a melhor resolução da área modelada e o custo computacional (HORRITT e BATES, 2001), sem desconsiderar o custo do levantamento topográfico.

Nesse artigo, é apresentada uma adaptação do Modelo de Células de Escoamento - MODCEL, desenvolvido por MIGUEZ (2001), para sua utilização como um modelo “Raster” Quasi-2D aplicado a um caso de evento de cheia em vale encaixado, apresentado por NÉELZ e PENDER (2010), como parte de um pacote de testes para comparação de modelos 2D, proposto pela agência Britânica *Environment Agency*. Os modelos cuja os resultados são apresentados por NÉELZ e PENDER (2014) e que serão usados na comparação dos resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 -Modelos de escoamento submetidos aos testes da Agencia Ambiental Britânica.

Modelo	Desenvolvedor	Esquema Numérico	Equações
ANUGA	Geoscience Australia	Volumes finitos explícitos	Equação de águas rasas completa
Flowroute-iTM	Ambiental Ltd		
InfoWorks ICM	Wallingford Software		
ISIS 2D	Halcrow	Diferenças Finitas	
ISIS 2D GPU		Volumes finitos explícitos (Kurganov Petrova)	
JFLOW +	JBA Consulting	Volumes finitos explícitos	
MIKE FLOOD	DHI	Diferenças Finitas	
SOBEK	Deltares	Diferenças finitas (grade implícita escalonada)	
TUFLOW	BMT WBM	Diferenças Finitas Implícitas	
TUFLOW GPU		Volumes finitos	
TUFLOW FV			
XPSTORM	Micro Drainage Ltd	Diferenças Finitas Explicitas	
LISFLOOD-FP	University of Bristol	Diferenças Finitas Explicitas	
RFSM EDA	HR Wallingford	Combinação de Diferenças Finitas e Volume Finitos (explícito)	
ISIS Fast Dynamic	Halcrow	Sem discretização no Tempo	Equação 2D – despreza os termos de aceleração e de Pressão
UIM	University of Exeter	Diferenças Finitas Explicitas	
Ceasg	Ceasg Flow Modelling (Amazi Consulting Ltd)	Autômato Celular	Conservação da massa e do momento (mesmos processos físicos que os modelados pelas Equações de Águas Rasas)
RFSM Direct	HR Wallingford	Sem discretização no Tempo	Distribui volumes pela continuidade entre áreas de armazenagem e computa a vazão usando Manning
ISIS Fast	Halcrow		

O MODELO DE CELULAS DE ESCOAMENTO

Modelos “Raster” são modelos que transformam cada ponto de um Modelo Digital de Elevação (MDE) ou Modelo Digital do Terreno (MDT) em um compartimento/célula de um modelo Quasi-2D. No modelo de Células “Raster”, a estrutura do MODCEL (MIGUEZ, 2001) é adaptado para configuração de modelo digital de elevação apresentado no formato de um arquivo “Raster”. Assim, cada elemento, do tamanho do pixel de origem, é representado no modelo como uma célula de escoamento ligada às demais células em seu entorno pelas equações de Saint-Venant, sem os termos de inércia, conforme representado esquematicamente na Figura 1.

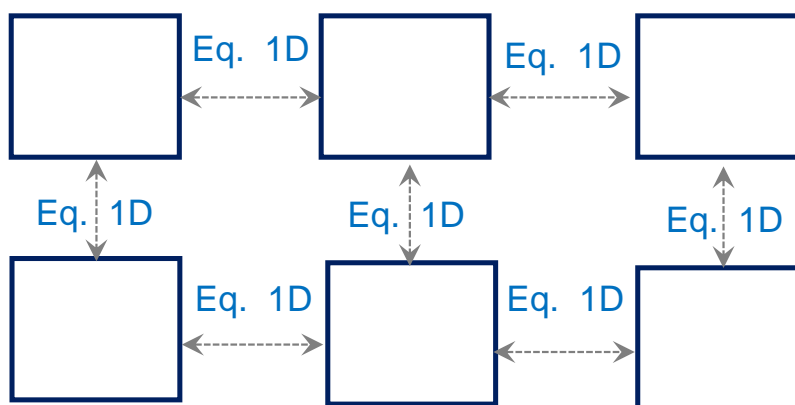


Figura 1– Representação esquemática da ligação entre as células/pixels do MODCEL-Raster.

ESTUDO DE CASO

A Agência de Meio Ambiente Britânica (NÉELZ e PENDER, 2010 e NÉELZ e PENDER, 2014) tem publicado, nos últimos anos, uma compilação com diferentes modelos de escoamento submetidos a 8 tipos de situações. Esses testes servem de pré-requisito para a contratação de projetos e estudos com o uso de modelos de escoamento pela agência. Diante disso, vários autores têm aproveitado esses testes para apresentar e testar outros modelos, nas mesmas bases de comparação (JAMIESON *et al*, 2012; COULTHARD *et al*, 2013; LEANDRO *et al*, 2014; BEEVERS *et al*, 2016; GUIDOLIN *et al*, 2016).

Um dos testes consiste na simulação de uma onda de cheia em um vale bem encaixado, após a ruptura de uma barragem, representado por um hidrograma de entrada trapezoidal com um pico de ascensão rápida de 3.000 m³/s, conforme observado na Figura 2.

O objetivo do teste é avaliar a capacidade do modelo em simular o escoamento de uma grande onda de cheia ao longo de um vale encaixado e prever o risco de inundação decorrente de falha de uma represa (pico, velocidades e tempos de viagem).

O modelo em células adaptado em escala “Raster” foi elaborado com 6.808 células quadradas de área de 10.000 m² cada, ligadas entre si pela equação de Saint-Venant, sem os termos de inércia, e com o Coeficiente de Manning de 0,04 em toda a extensão da modelagem (valor definido no teste padronizado). As especificações da Agência Ambiental Britânica sugeriam a utilização de um *grid* com elementos de área de 2.500m² cada, o que resultaria em 27.232 elementos no MODCEL. Um *grid* tão detalhado tornaria o tempo computacional requerido pelo MODCEL extremamente longo. Portanto, optou-se por simular o rompimento da barragem com uso de uma grade menos refinada, inclusive como forma de avaliar a possibilidade de se obter os mesmos resultados (satisfatórios) com menor detalhamento.

A condição de contorno de vazão (Figura 2) foi aplicada na seção à montante da região modelada do vale, representado na Figura 3, conforme as especificações do teste.

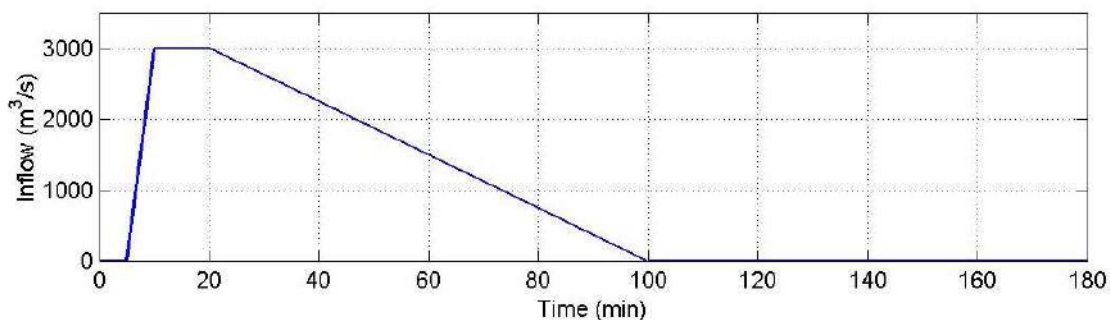


Figura 2– Condição de Contorno de vazão do Teste. Fonte: Environment Agency, 2010.

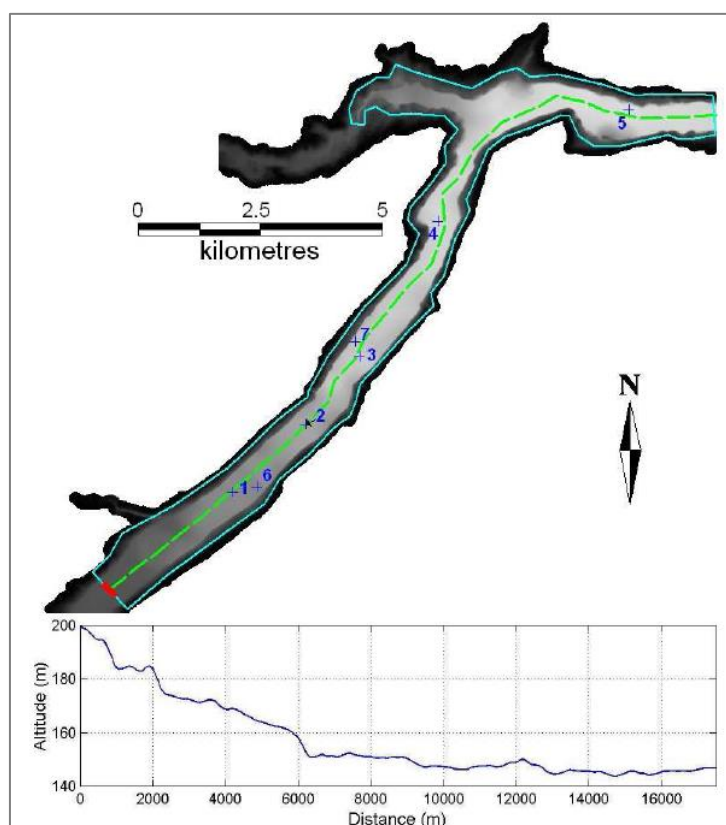


Figura 3– Mapa e Perfil do vale usado no Teste, com a entrada na linha vermelha e 7 pontos de saída. Fonte: Environment Agency, 2010.

COMPARAÇÕES E RESULTADOS

Nos testes apresentados por NÉELZ e PENDER (2014), a maioria dos modelos, em especial os que resolvem as equações de águas rasas completas, apresentam níveis de água máximos coerentes entre si, com diferenças menores que 0,4 metro (cerca de 10% da profundidade de pico), em alguns pontos, em uma faixa inferior a 0,2 metro. Com relação ao tempo do pico da cheia, os resultados se encontraram dentro de uma faixa de variação de 30 minutos.

Os resultados obtidos com o MODCEL-Raster para os pontos 1, 3 e 7, cujas localizações podem ser observadas na Figura 3, estão apresentados na Figura 4.

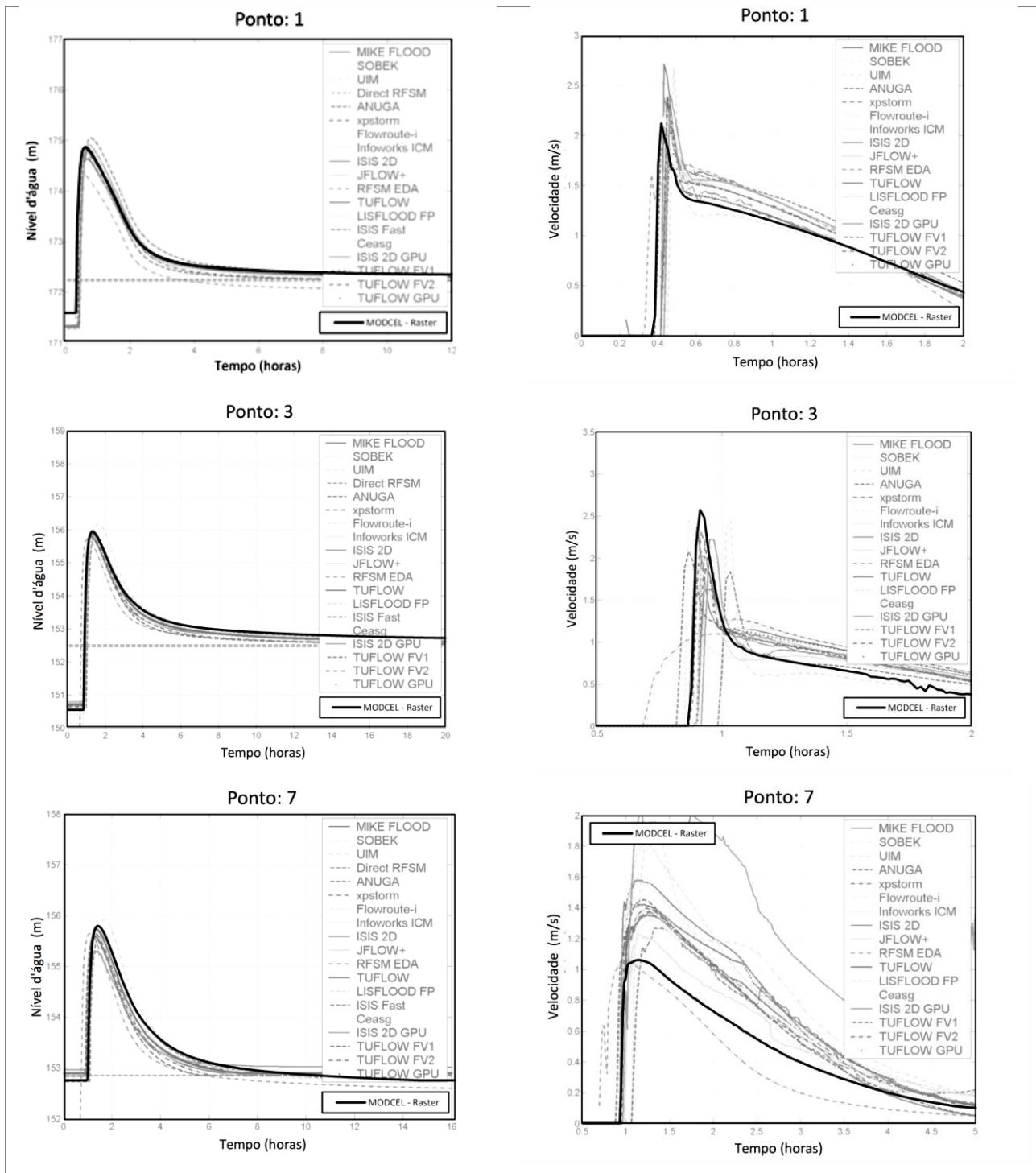


Figura 4– Resultados do MODCEL – RASTER nos pontos 1, 3 e 7.

O MODCEL-Raster também chegou a resultados dentro da faixa de valores satisfatória, conforme resultados dos demais modelos testados. A Tabela 2 apresenta a comparação dos resultados de níveis e lâminas do MODCEL-Raster com os resultados obtidos por NÉELZ e PENDER (2013) para os modelos MikeFlood e Infoworks (tomados como referência, pela sua difusão e aceitação em nível mundial) nos pontos 1, 3, 5 e 7 conforme localização na Figura 3.

Tabela 2 – Comparação de resultados de nível d'água, em metros.

PONTO	MikeFlood			Infoworks			ModCel Raster		
	NA inicial	NA Max.	h	NA inicial	NA Max.	h	NA inicial	NA Max.	h
1	171.4	174.7	3.3	171.4	174.7	3.3	171.6	174.9	3.3
3	150.8	156	5.2	150.5	155.8	5.3	150.5	155.9	5.4
5	144.5	148.7	4.2	144.5	148.8	4.3	144.4	148.5	4.1
7	152.8	155.6	2.8	152.9	155.8	2.9	152.8	155.8	3.0

Com relação às velocidades, o modelo MODCEL-Raster apresentou resultados razoavelmente semelhantes aos modelos 2D, mesmo considerando as limitações da representação das velocidades pelas equações 1D. Isso ocorreu, pois, nesse teste, o escoamento se comporta basicamente como um escoamento unidimensional descendo o vale.

REFERÊNCIAS

- BATES, P.D.; DE ROO, A. P.J. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of hydrology*, v. 236, n. 1, p. 54-77, 2000.
- BEEVERS, L.; Popescu, I.; Pan, Q.; Pender, D. Applicability of a coastal morphodynamic model for fluvial environments. *Environmental Modelling & Software*, v. 80, p. 83-99, 2016.
- CASTELLARIN, A. DOMENEGHETTI, A., AND BRATH, A. Identifying robust large-scale flood risk mitigation strategies: A quasi-2D hydraulic model as a tool for the Po river. *Physics and Chemistry of the Earth*, v.36, p.299–308, 2011.
- COULTHARD, T. J.; NEAL, J.C.; BATES, P.D.; RAMIREZ, J.; ALMEIDA, G.A.; HANCOCK, G.R. Integrating the LISFLOOD-FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: implications for modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 38, n. 15, p. 1897-1906, 2013.
- GUIDOLIN, M.; CHEN, A. S., GHIMIRE, B., KEEDWELL, E. C., DJORDJEVIĆ, S., & SAVIĆ, D. A. A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis. *Environmental Modelling & Software*, v. 84, p. 378-394, 2016.
- HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, v. 253, n. 1, p. 239-249, 2001
- HUNTER, N. M., HORRITT, M. S., BATES, P. D., WILSON, M. D., WERNER, M. G. An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation. *Advances in Water Resources*, v. 28, n. 9, p. 975-991, 2005.
- HUNTER, N. M., BATES, P. D., HORRITT, M. S., WILSON, M. D. Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: a review. *Geomorphology*, v. 90, n. 3, p. 208-225, 2007.
- JOHNSON, DENNIS L.; MILLER, ARTHUR C. A spatially distributed hydrologic model utilizing raster data structures. *Computers & Geosciences*, v. 23, n. 3, p. 267-272, 1997.
- JAMIESON, S.R., LHOMME, J., WRIGHT, G., GOULDBY, B. A highly efficient 2D flood model with sub-element topography. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*. Thomas Telford Ltd, 2012. p. 581-595
- LEANDRO, J.; CHEN, A. S.; SCHUMANN, A. A 2D parallel diffusive wave model for floodplain inundation with variable time step (P-DWave). *Journal of Hydrology*, v. 517, p. 250-259, 2014.

MIGUEZ, M.G. (2001). Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas. Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

MOUSSA, R.; BOCQUILLON, C. On the use of the diffusive wave for modelling extreme flood events with overbank flow in the floodplain. *Journal of Hydrology*, v. 374, n. 1, p. 116-135, 2009.

NÉELZ, S.; PENDER, G. Benchmarking of 2D Hydraulic Modelling Packages; Environment Agency: Bristol, UK, 2010.

NÉELZ, S.; PENDER, G. Benchmarking of 2D Hydraulic Modelling Packages; Environment Agency: Bristol, UK, 2014.

OIKONOMOU, A., DIMITRIADIS, P., KOUKOUVINOS, A., TEGOS, A., PAGANA, V., PANAGOPOULOS, P. D., KOUTSOYIANNIS, D. Floodplain mapping via 1D and quasi-2D numerical models in the valley of Thessaly, Greece. *EGU General Assembly 2013, Geophysical Research Abstracts*, v. 15, 2013.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. *Revista Geográfica Acadêmica*, 2(2), p. 84-95, 2008.

PAZ, A. R., COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 15 n.4 Out/Dez 2010, 31-43.

SKINNER, C. J., COULTHARD, T. J., PARSONS, D. R., RAMIREZ, J. A., MULLEN, L., MANSON, S. Simulating tidal and storm surge hydraulics with a simple 2D inertia based model, in the Humber Estuary, UK. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 155, p. 126-136, 2015.