

## APLICAÇÃO DO MODELO PRECIPITAÇÃO-VAZÃO NAM (MIKE HYDRO RIVER) NA BACIA HIDROGRÁFICA DA BARRAGEM DO ALTO CÁVADO

*Luane Ines Brito Monteiro*<sup>1\*</sup> *Vanessa Martins Ramos*<sup>2</sup> *Rodrigo Jorge Foncesa de Oliveira Maia*<sup>3</sup>

**Resumo** – Os modelos precipitação-vazão surgiram como forma de melhorar a base de dados da série de vazão a partir dos dados de precipitação que são, no geral, de melhor qualidade e maior disponibilidade. Entretanto, o processo de estimativa das vazões a partir da precipitação é complexo, não linear e dependente de diversos fatores de origem natural e/ou antrópica. O “Nedbor Afrstromnings Model (NAM)” é um modelo precipitação-vazão incorporado no modelo MIKE HYDRO River desenvolvido pelo Danish Hydraulic Institute (DHI). Tal modelo se baseia em representações conceituais dos processos físicos do fluxo de água acumulado em toda a área da bacia hidrográfica dividindo o escoamento total em escoamento superficial, sub-superficial e de base. No presente trabalho teve-se como objetivo calibrar e validar o modelo NAM para a bacia hidrográfica da barragem do Alto Cávado, localizada na bacia hidrográfica do rio Cávado (Portugal). Como principais resultados obtiveram-se, respectivamente, para os períodos de calibração e validação: 1) erros do volume total escoado ( $E_v$ ) iguais a 16,87% e 7,64%; 2) coeficientes de determinação ( $R^2$ ) iguais a 0,83 e 0,71; e 3) coeficiente de eficiência de Nash and Sutcliffe’s iguais a 0,81 e 0,70.

**Palavras-Chave** – MIKE SHE, Modelagem Hidrológica, Calibração.

## RAINFALL-RUNOFF MODEL APPLICATION NAM (MIKE HYDRO RIVER) FOR ALTO CÁVADO DAM WATERSHED

**Abstract** – Rainfall-Runoff models have emerged as a way to improve the discharge series from rainfall data which are, in general, of better quality and greater availability. However, the process of estimating discharge from precipitation is complex, non-linear and dependent on several factors of natural and/or anthropogenic origin. The "Nedbor Afrstromnings Model (NAM)" is a Rainfall-Runoff model incorporated into the model MIKE HYDRO River developed by the Danish Hydraulic Institute (DHI). Such a model is based on conceptual representations of the physical processes of the water flow accumulated throughout the watershed area by dividing the total flow into overland-flow, interflow and baseflow. In the present research, the objective was to calibrate and validate the NAM model to the Alto Cávado dam watershed, located in the Cávado river basin (Portugal). The results obtained, respectively, for the calibration and validation periods: 1) errors on water balance ( $E_v$ ) equal to 16.87% and 7.64%; 2) coefficients of determination ( $R^2$ ) equal to 0.83 and 0.71; and 3) efficiency coefficient of Nash and Sutcliffe's equal to 0.81 and 0.70.

**Keywords** – MIKE SHE, Hydrology Modeling, Calibration.

---

<sup>1</sup> Doutoranda em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa\*, luane.luane@gmail.com.

<sup>2</sup> Doutoranda em Engenharia do Ambiente na Universidade do Porto, vmr@fe.up.pt.

<sup>3</sup> Professor adjunto do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, rmaia@fe.up.pt.

## INTRODUÇÃO

A modelagem hidrológica é um processo de estimativa de vazões em bacias hidrográficas que tenta descrever de modo simplificado o ciclo hidrológico (Amir et al, 2013). Resumidamente, os modelos precipitação-vazão permitem transformar dados de precipitação, em séries de escoamento superficial da bacia hidrográfica (hidrograma). Esta transformação é efetuada de forma complexa, pois diz respeito à execução de um processo não linear, variável no tempo e espacialmente distribuído. Estes modelos são influenciados por diversos fatores, tais como: a distribuição da precipitação, evapotranspiração, transpiração, abstrações iniciais pela vegetação, solo e rugosidade do terreno, topografia, tipo de solo, tamanho e forma da bacia e tempo de concentração (Galkate et al., 2011; Agrawal e Desmukh, 2015).

O surgimento dos modelos precipitação-vazão surgiu da necessidade de obtenção de séries de vazões mais longas e representativas que pudessem auxiliar na elaboração de projetos de sistemas hidráulicos. Considerando que as séries de precipitações são, geralmente, mais longas do que as de vazão, observou-se que seria possível, a partir de dados de precipitação, completar falhas das séries de vazão e estimar tais dados para cenários existentes ou previstos para as bacias (Tucci, 2005).

O “Danish Hydraulic Institute (DHI)” desenvolveu um grupo de modelos de simulação para o planejamento e gestão de recursos hídricos, MIKE, o qual possui o componente MIKE HYDRO River. Este utiliza, dentre outros, o “Nedbor Afrstromnings Model (NAM)” para a simulação do processo precipitação-vazão.

O NAM é um modelo elaborado com base em representações conceituais dos processos físicos do fluxo de água acumulado em toda a área da bacia hidrográfica. Cada parâmetro ou variável deste modelo é representado por um valor médio para a bacia em estudo, sendo classificado como modelo concentrado (DHI, 2016). Uma vez que este valor médio é de difícil quantificação a partir das características da bacia, torna-se necessário o procedimento de calibração. Segundo Agrawal e Desmukh (2015), o NAM pode simular o escoamento de uma bacia hidrográfica com precisão se for adequadamente calibrado. Em complemento ao processo de calibração, o teste de validação é uma ferramenta amplamente utilizada para agregar credibilidade e robustez ao modelo construído.

Portanto, este trabalho teve como objetivo calibrar e validar o modelo precipitação-vazão NAM para a bacia hidrográfica da barragem do Alto Cávado (parte da bacia do rio Cávado, Portugal).

## METODOLOGIA

### Área de Estudo

Para a aplicação do NAM selecionou-se a bacia hidrográfica da barragem do Alto Cávado. Esta barragem integra o Sistema Hidroelétrico Cávado-Rabagão-Homem, o qual possui importância estratégica para o setor de recursos hídricos e energéticos de Portugal.

A bacia da barragem do Alto Cávado, representada na Figura 1, possui uma área de 98,9 km<sup>2</sup>, uma barragem com 35,4 ha de área inundada e 29,3 km de rede de drenagem fluvial. Na mesma figura observam-se as estações pluviométricas presentes na bacia em estudo.

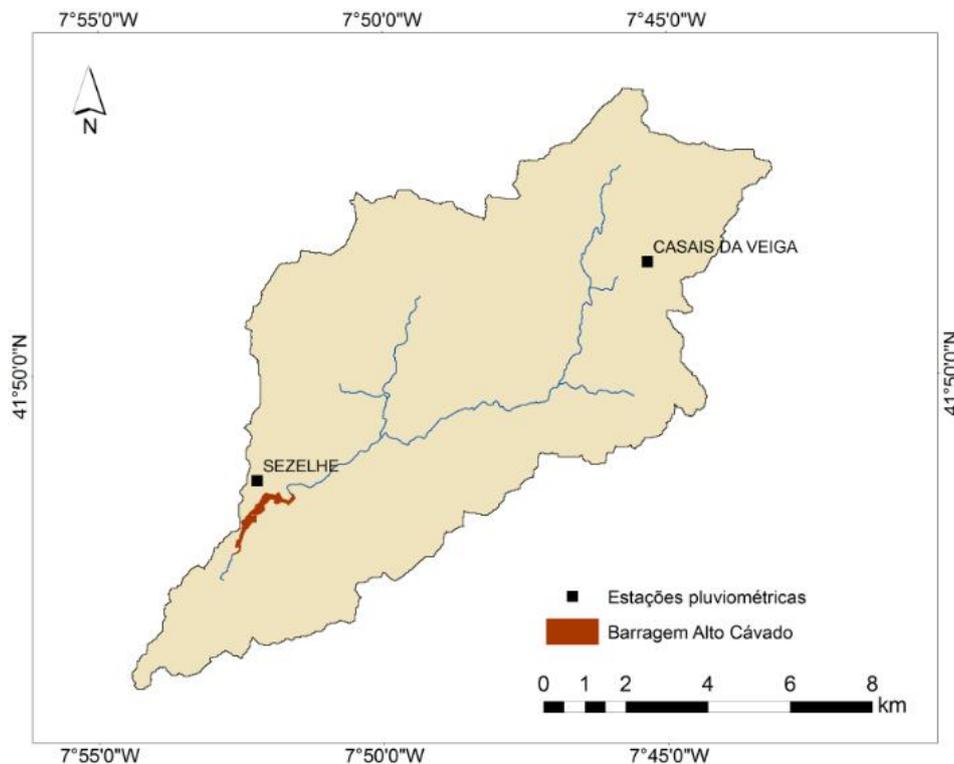


Figura 1- Bacia hidrográfica da barragem do Alto Cávado e estações pluviométricas.

### Dados de entrada do modelo

Os dados básicos de entrada requeridos pelo modelo precipitação-vazão NAM são: precipitação, evapotranspiração potencial e vazão observada. A série de vazão observada foi fornecida pela empresa Energias de Portugal (EDP) e os demais dados pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) de Portugal.

As séries de precipitação diária utilizadas correspondem às duas estações pluviométricas presentes na área de estudo, Sezelhe e Casais da Veiga (Figura 1). Para determinar o valor da precipitação total diária na bacia hidrográfica em estudo, recorreu-se ao método de Thiessen.

A evaporação potencial foi estimada pelo método de Thornthwaite a partir das temperaturas médias mensais registradas na estação meteorológica de Salto (coordenadas: 41°38'0"; 7°56'35"S) e do número de horas de sol no mês, função da latitude local. Por último, as vazões médias diárias observadas correspondem aos valores medidos na estação hidrométrica situada na foz da bacia em estudo.

### Modelo precipitação-vazão NAM

O NAM tem como base os processos que incluem o ciclo hidrológico para a simulação quantitativa do armazenamento e dos fluxos de água na bacia. O modelo divide o escoamento total em escoamento superficial, escoamento sub-superficial e escoamento de base. Estruturalmente, o NAM procura descrever a fase terrestre do ciclo hidrológico dividindo-a em quatro compartimentos de armazenamento de água que se encontram interconectados, são eles: armazenamento superficial, armazenamento na zona radicular, armazenamento subterrâneo e armazenamento sob a forma de neve (DHI, 2016).

O modelo pode ser construído utilizando uma série de parâmetros, porém, inicialmente, são considerados 9 parâmetros como condição “default”, são eles:

1. Máximo conteúdo de água na zona superficial de armazenamento ( $U_{\text{máx}}$ ): conteúdo de água interceptado pela vegetação e zonas de depressão, e armazenado na camada superficial do solo (10 a 20 mm).
2. Máximo conteúdo de água na zona radicular do solo ( $L_{\text{máx}}$ ): representa a máxima humidade do solo na zona radicular, a qual está disponível para ser utilizada pelas plantas, nos processos de transpiração (100 a 300 mm).
3. Coeficiente de escoamento superficial (CQOF): determina a relação do volume precipitado que é escoado superficialmente ou infiltrado (0,1 a 1,0).
4. Constante de tempo do escoamento sub-superficial (CKIF): o montante do escoamento sub-superficial que decresce ao longo do tempo (200 a 1000 horas).
5. Constante de tempo para o escoamento superficial (CK1, CK2): determinam a forma do pico dos hidrogramas. Considera-se dois reservatórios lineares que estão conectados em série com diferentes constantes de tempo expressas em horas. Está relacionado ao tempo entre a ocorrência do evento de precipitação e o pico de caudal registado no curso de água (10 a 50 horas).
6. Limiar de água na zona radicular para que ocorra escoamento superficial (TOF): determina o valor relativo do teor de humidade na zona radicular ( $L/L_{\text{máx}}$ ) acima da qual o escoamento superficial é gerado. O efeito desse valor pode ser observado principalmente na estação chuvosa, para a qual um aumento no valor do parâmetro poderá retardar o início do escoamento (0,0 a 0,99).
7. Limiar de água na zona radicular para o escoamento sub-superficial (TIF): determina o valor de humidade relativa na zona radicular ( $L/L_{\text{máx}}$ ) acima do qual é gerado escoamento sub-superficial (0,0 a 0,99).
8. Limite de água na zona radicular para a recarga de água subterrânea (TG): determina o valor relativo da humidade na zona radicular ( $L/L_{\text{máx}}$ ) acima do qual é gerado recarga de água subterrânea (0,0 a 0,99).
9. Constante de tempo para o fluxo de base (CKBF): este parâmetro pode ser determinado a partir da recessão do hidrograma em períodos secos (1000 a 4000 horas).

## Calibração e Validação

A calibração do modelo NAM é realizada com o objetivo de ajustar os parâmetros do modelo para que este seja capaz de estimar valores de vazão o mais próximo possível dos valores observados. Espera-se, de modo geral, obter com a calibração deste modelo: um bom ajuste entre os valores de escoamento superficial simulado e observado; balanço hidrológico adequado; bom ajuste a forma do hidrograma simulado com o observado, incluindo o ajuste às vazões máximas e mínimas em relação ao tempo de ocorrência e à magnitude.

Para a calibração do modelo NAM à bacia do Alto Cávado adotou-se o método de autocalibração para as seguintes funções objetivo: balanço global de água e erro quadrático médio global.

Após a calibração do NAM à bacia do Alto Cávado para o período de janeiro de 1983 a dezembro de 1988, realizou-se a validação do mesmo para o período de janeiro de 1989 a julho de 1992. Tais períodos de simulação foram escolhidos conforme a disponibilidade da base de dados.

## Avaliação da performance do modelo

A performance do modelo foi avaliada com base em três critérios: 1) balanço global de água através do erro do volume total escoado (Ev) que é calculado pela diferença relativa entre os volumes escoados observados e simulados; 2) coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e 3) coeficiente de eficiência de Nash and Sutcliffe's (NS).

Para melhor avaliar a qualidade do ajuste das vazões simuladas com as vazões observadas, calculou-se o  $R^2$ , separadamente, para as vazões médias, máximas e mínimas. Para os dados médios foram consideradas as vazões médias mensais, para os máximos considerou-se 20% dos maiores valores da série de vazão e, analogamente, para os mínimos considerou-se 20% dos menores valores.

## RESULTADOS

Os valores dos parâmetros calibrados para o modelo NAM foram: Umax, 19,76 mm; Lmax, 250,14 mm; CQOF, 0,45; CKIF, 486,69 horas; CK1,CK2, 24,20 horas; TOF 0,51; TIF 0,19; TG 0,76; CKBF 1076,21 horas.

Nas Figuras 2 e 3 apresentam-se os hidrogramas de vazão referentes à calibração e validação do modelo, respectivamente.

Os hidrogramas apresentados sugerem uma tendência de superestimativa das vazões menores do que  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ , e de subestimativa das vazões superiores a este valor. Como 97% dos registros de vazão observados são menores ou iguais a  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ , é esperado que o modelo apresente uma tendência geral de superestimativa dos volumes escoados, o que pode ser confirmado com os resultados apresentados na tabela 1. Nesta tabela, apresentam-se os valores médios para o período de calibração e validação do modelo referentes aos volumes escoados anualmente calculados com base nas vazões observadas (Q-obs) e simuladas (Q-sim), assim como os volumes relativos aos demais componentes do balanço hídrico. Todos os valores são expressos em unidade de mm.

Através dos resultados apresentados, observa-se que o período de calibração registrou maiores índices pluviométricos do que o período de validação. No que diz respeito aos demais componentes do balanço hídrico, estimaram-se, para o período de calibração, maiores valores, com exceção da parcela da evapotranspiração potencial.

Conforme os valores de ES, ESub e EB apresentados na Tabela 1, conclui-se que o modelo gerou uma série de vazões simuladas que traduzem uma contribuição média do escoamento de base em cerca de 47% para o período de calibração e de 45% para o período de validação.

Na Tabela 2 apresentam-se os resultados dos índices estatísticos calculados para avaliar a performance do modelo para os períodos de calibração e validação.

De acordo com classificação de Moussa et al. (2007) desenvolvida com o objetivo de avaliar modelos hidrológicos, os resultados obtidos para a bacia da barragem do Alto Cávado para o período de calibração poderiam ser classificados como bom segundo os valores de NS e  $R^2$  e como razoável segundo os valores de Ev. Já para o período de validação a modelagem seria classificada como razoável, segundo os valores de NS e  $R^2$  e como boa em relação ao erro na estimativa do balanço global de água (Ev).

Diversos trabalhos que retratam experiências de aplicação do MIKE HYDRO River NAM obtiveram valores de NS entre 0,50 a 0,95 (Agrawal e Desmukh, 2015). Observa-se que os valores de NS apresentados na Tabela 2 também estariam inseridos dentro deste intervalo.

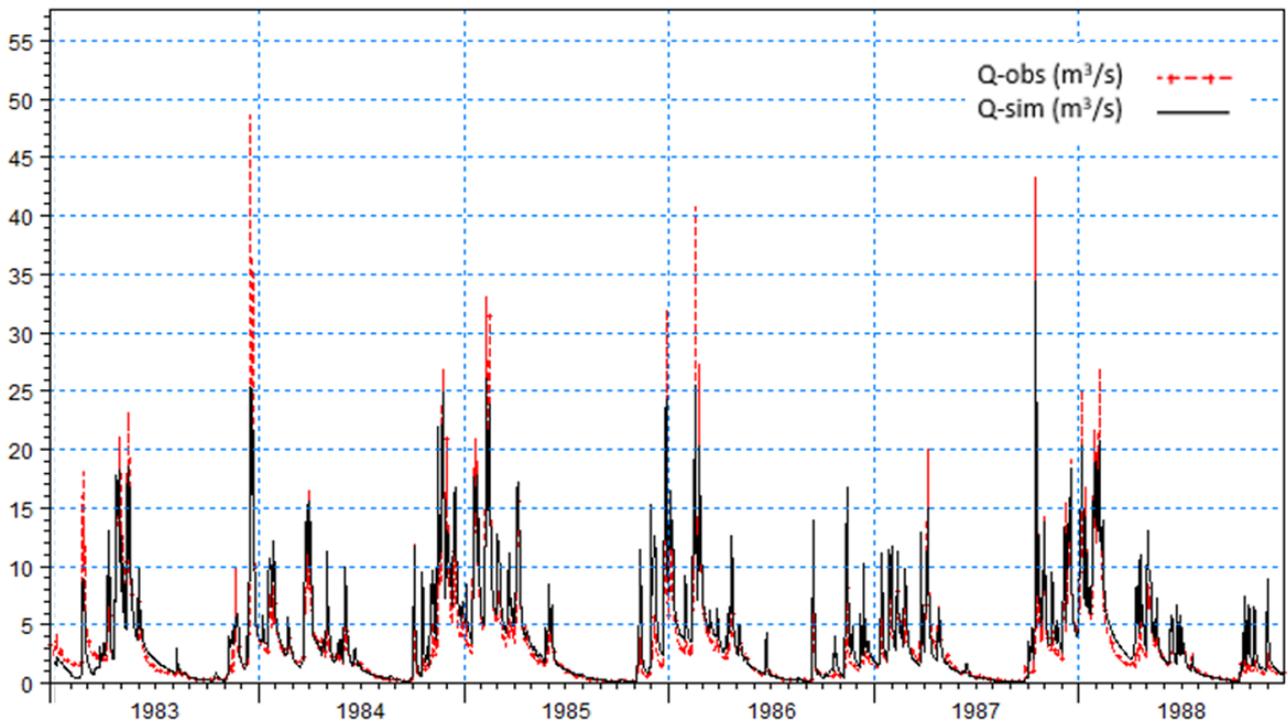


Figura 2 - Hidrograma de vazões observadas e simuladas pelo modelo NAM para a bacia do Alto Cávado durante o período de calibração.

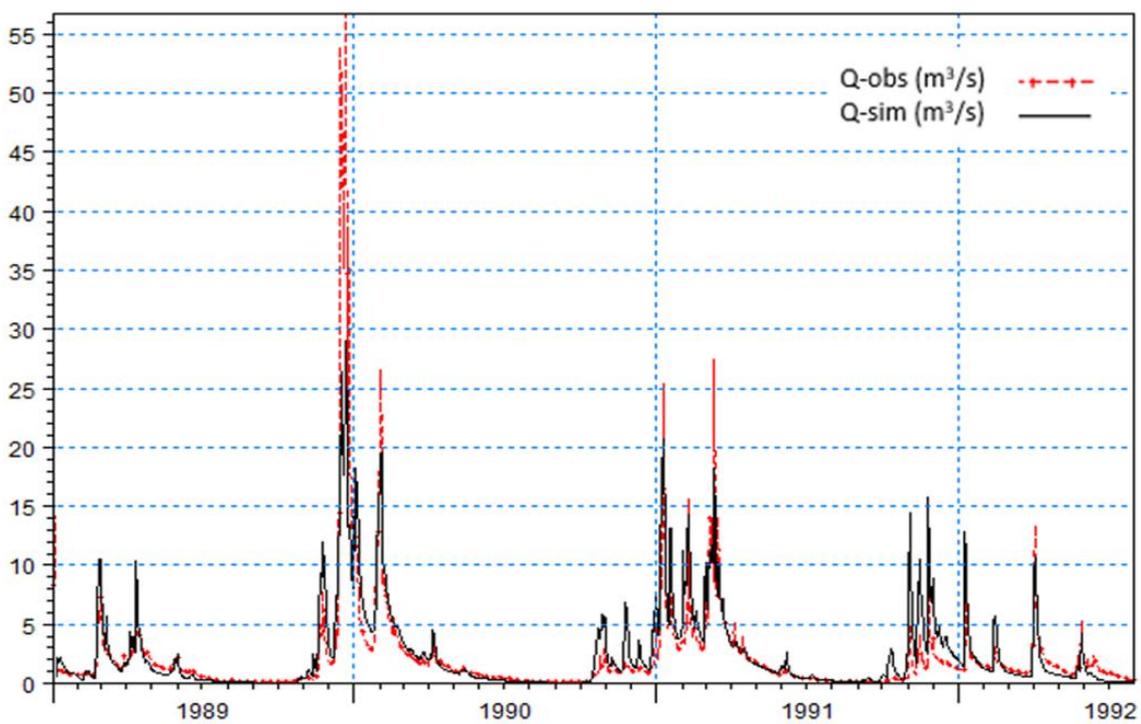


Figura 3 - Hidrograma de vazões observadas e simuladas pelo modelo NAM para a bacia do Alto Cávado durante o período de validação.

Tabela 1. Média dos componentes do balanço hídrico simulados para a bacia da barragem do Alto Cávado, para os períodos de calibração e validação, bem como a diferença percentual entre estes

	Q-obs	Q-sim	PT	EP	EA	RS	ESup	ESS	ESbas
Média Cal. (mm)	1023,9	1196,7	1813,1	743,4	620,2	554,9	471,2	166,5	559,0
Média Val. (mm)	731,9	787,8	1357,4	809,3	610,4	350,0	304,4	129,0	354,5
Dif (%)	-28,5	-34,2	-25,1	8,9	-1,6	-36,9	-35,4	-22,5	-36,6

(Q-obs – caudal observado; Q-sim – caudal simulado; PT – precipitação; EP – evapotranspiração potencial; EA – evapotranspiração efetiva; RS – recarga de água subterrânea; ES – escoamento superficial; ESub – escoamento sub-superficial; EB – escoamento de base; Dif – diferença dos valores médios entre os períodos de calibração e validação)

Tabela 2. Resultado dos índices estatísticos para os períodos de calibração e validação do modelo NAM

	Ev (%)	NS	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Q-méd	R <sup>2</sup> Q-mín	R <sup>2</sup> Qmáx
Calibração	16,87	0,81	0,83	0,92	0,76	0,71
Validação	7,64	0,70	0,71	0,77	0,26	0,68

Em relação à estimativa das vazões médias, mínimas e máximas, o modelo elaborado apresentou melhor performance para a estimativa dos valores médios em ambos os períodos avaliados. As vazões máximas foram estimadas satisfatoriamente também para ambos os períodos, enquanto que, as vazões mínimas simuladas apresentaram bom ajuste apenas para o período de calibração. Hafezparast et al. (2013) também constatou problemas com a simulação de vazões mínimas em estudo de modelagem hidrológica para a bacia do rio Sarisoo situada na região noroeste do Iran utilizando a autocalibração do modelo NAM.

## CONCLUSÃO

Conforme os resultados apresentados, o modelo NAM calibrado apresentou valores satisfatórios de R<sup>2</sup> e NS para os períodos de calibração e validação, uma vez que se aproximam dos valores obtidos por diversos autores em trabalhos de modelagem hidrológica utilizado o NAM.

O balanço global de água foi melhor estimado para o período de calibração. Já em relação as vazões médias e máximas, o modelo calibrado foi capaz de estima-las de forma satisfatória para os dois períodos analisados, enquanto que, a estimativa das vazões mínimas para o período de validação não se mostrou apropriada, logo, a estimativa destas através do modelo poderá resultar em valores muito distintos dos reais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao “Danish Hydraulic Institute” pelas licenças de software concedidas e pelo apoio técnico prestado. A primeira autora agradece o apoio financeiro fornecido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES), ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA) e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). A segunda autora agradece o financiamento concedido no âmbito da bolsa de doutorado fornecida pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e a EDP – Produção de Energia, S.A.

## REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, N. & DESMUKH, T.S. (2015) Rainfall Runoff Modeling using MIKE 11 Nam – A Review. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3, 659-667.
- AMIR, M. S. I. I., KHAN, M. M. K., RASUL, M.G., SHARMA, R. H., & AKRAM, F. (2013) Automatic multi-objective calibration of a rainfall runoff model for the Fitzroy Basin, Queensland, Australia *International Journal of Environmental Science and Development*, 4(3), 311-315.
- DHI - DANISH HYDRAULIC INSTITUTE. (2016). MIKE 1D. DHI Simulation Engine for 1D river and urban modelling. Reference Manual.
- GALKATE, R. V, JAISWAL, R. K., THOMAS, T., NAYAK T.R. (2011) Rainfall Runoff Modeling Using Conceptual NAM Model, *International Conference on Sustainability and management strategy*, Institute of Management and Technology, Nagpur.
- HAFEZPARAST, M., ARAGHINEJAD, S., FATEMI, S. E., BRESSERS, H. A. (2013) Conceptual Rainfall-Runoff Model Using the Auto Calibrated NAM Models in the Sarisoo River. *Hydrology Current Research*. (4), 1-6.
- MOUSSA, R., CHAHINIAN, N., AND BOCQUILLON, C. (2007). Distributed hydrological modelling of a Mediterranean mountainous catchment Model construction and multi-site validation, *J. Hydrol.* (337), 35–51.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES DE RECURSOS HÍDRICOS (SNIRH) - <[www.snirh.ambiente.pt](http://www.snirh.ambiente.pt)>.
- TUCCI, C. E. M. (2005). *Modelos Hidrológicos*. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). 2.ed. Porto Alegre: Editora da UFGS, 2005.