

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **APLICAÇÃO DO TANK MODEL PARA A BACIA DO RIO PERDIZES EM CAMBARÁ DO SUL/RS**

*Karla Campagnolo<sup>1</sup>; Vinicius Santanna Castiglio<sup>2</sup>; Sofia Melo Vasconcellos<sup>3</sup> & Masato  
Kobiyama<sup>4</sup>*

**RESUMO** – A gestão dos recursos hídricos deve envolver um planejamento eficiente e sustentável, através do monitoramento das bacias hidrográficas. No Brasil, a coleta de dados meteorológicos é mais comum. A representação do processo chuva-vazão por meio de modelos hidrológicos conceituais visa quantificar o volume escoado em uma bacia como consequência de uma determinada precipitação. Neste estudo, utilizamos o Tank Model, um modelo matemático composto por tanques dispostos verticalmente em série, normalmente de 2 a 4 tanques. O objetivo foi aplicar o Tank Model para a bacia do rio Perdizes, em Cambará do Sul (RS), e comparar os resultados utilizando dois, três e quatro tanques na modelagem, verificando o formato de modelo mais representativo. Os dados utilizados na simulação foram obtidos pelas estações meteorológica e fluviométrica instaladas na bacia, e os valores de evapotranspiração (ETP) foram calculados pelo Método de Penman modificado. Através dos resultados demonstrados, pode-se concluir que para uma bacia sul brasileira, com área em torno de 50 km<sup>2</sup> e uma série com 121 dias, o formato com 4 (quatro) tanques foi o que melhor representou o processo chuva-vazão.

**ABSTRACT** – The management of water resources should involve efficient and sustainable planning, through the monitoring of the watersheds. In Brazil, the collection of meteorological data is more common. The representation of the rain-flow process by means of conceptual hydrological models aims to quantify the volume flowed in a watershed as a consequence of a specific rainfall. In this study, we use the Tank Model, a mathematical model composed by tanks arranged vertically in series, usually from 2 to 4 tanks. The objective was to apply the Tank Model to the Perdizes river basin in Cambará do Sul (RS), and compare the results using two, three and four tanks in the modeling, verifying the most representative model format. The data used in the simulation were obtained by the meteorological and fluviometric stations installed in the basin, and the evapotranspiration values (ETP) were calculated by the modified Penman Method. From the results demonstrated, it can be concluded that for a southern Brazilian basin, with an area around 50 km<sup>2</sup> and a series with 121 days, the format with four (4) tanks was the one that best represented the rain-flow process.

**Palavras-Chave** – Simulação; hidrologia; monitoramento.

### **INTRODUÇÃO**

A disponibilidade de dados hidrológicos, particularmente pluviométricos e fluviométricos, é fundamental para um planejamento eficiente e sustentável dos sistemas que envolvem recursos

---

1) Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, kbcampagnolo@gmail.com  
2) Graduando do curso de Engenharia Hídrica, UFRGS, viniciuscastiglio@hotmail.com  
3) Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, sofimello@hotmail.com  
4) Professor, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, masato.kobiyama@ufrgs.br

hídricos (Celeste e Chaves, 2014). Através desse planejamento, o manejo da água pode ser feito de forma mais adequada.

No Brasil, ocorre que a coleta de dados meteorológicos é mais comum, devido, entre outros fatores, à maior difusão dos pluviômetros. Em relação aos dados de vazão, sua disponibilidade é mais escassa, visto que a coleta é feita, na maioria das vezes, de forma pontual. Amiri *et al.* (2016) destacaram que estudar hidrologia com essa falta de dados hidrológicos em uma escala espaço-temporal adequada é um grande desafio para os pesquisadores.

Pereira *et al.* (2016) ressaltaram que para evitar que estudos hidrológicos sejam inviabilizados devido à escassez de dados, nas últimas décadas diversos modelos hidrológicos foram desenvolvidos e aperfeiçoados, criando assim mecanismos que relacionam os dados de vazão com os de precipitação, os chamados modelos chuva-vazão.

A representação do processo chuva-vazão por meio de modelos hidrológicos conceituais visa quantificar o volume escoado como consequência de uma determinada precipitação. Um deles é o Tank Model, proposto por Sugawara (1961).

O Tank Model trata-se de um modelo matemático simples, composto por tanques dispostos verticalmente em série (normalmente de 2 a 4 tanques) que representam esquematicamente a estratificação das camadas do solo. Para o cálculo do armazenamento no tanque superior, a precipitação é colocada e a evapotranspiração é descontada. Se não houver água no tanque superior, a evapotranspiração é subtraída do segundo tanque, e assim sucessivamente (Sugawara, 1995). A quantidade de tanques adotada na simulação depende principalmente do intervalo de tempo simulado e da discretização temporal dos dados utilizados. Porém, características específicas como área, clima e uso e ocupação do solo da bacia também podem afetar esta escolha. Desta forma, o Tank Model é muito versátil, e o número de tanques pode ser alterado para melhor caracterizar uma determinada bacia hidrográfica.

Portanto, o objetivo do presente trabalho foi aplicar o Tank Model para a bacia do rio Perdizes em Cambará do Sul (RS). Ainda, comparar os resultados obtidos com dois, três e quatro tanques na modelagem, verificar o formato de modelo mais adequado para o local e, a partir disso, analisar o balanço hídrico desta bacia.

## **METODOLOGIA**

### **Área de estudo**

O trabalho foi desenvolvido na bacia do rio Perdizes (51,0 km<sup>2</sup>) em Cambará do Sul (RS) (Figura 1), a qual está inserida no bioma Mata Atlântica.

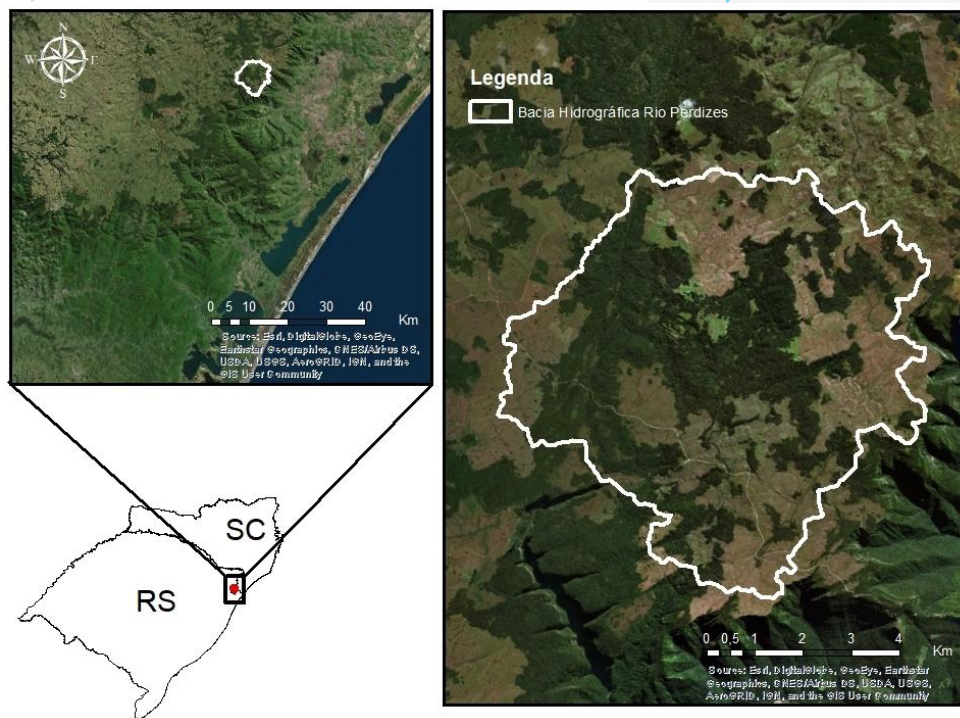


Figura 1 – Localização da bacia do rio Perdizes.

Parte da bacia está localizada dentro do Parque Nacional dos Aparados da Serra (PNAS). A principal formação florestal existente na região corresponde à Floresta Ombrófila Mista (Floresta de Araucárias), que tem a dominância fisionômica da *Araucaria angustifolia* (IBAMA, 2004). Segundo a classificação do Sistema de Köppen, o clima da região é subtropical úmido sem estação seca definida, com verão ameno (Cfb).

Os dados utilizados na calibração do modelo foram obtidos nas estações listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estações utilizadas.

Dados utilizados (horários)	Nome do posto	Período de observação
Radiação solar	Cambará do Sul - A897 (INMET)	Fevereiro a Junho/2018
Insolação	Bom Jesus - OMM: 83919 (INMET)	Fevereiro a Junho/2018
Meteorológicos	PNAS (GPDEN)	Fevereiro a Junho/2018
Níveis	PNAS (GPDEN)	Fevereiro a Junho/2018

Dentro do PNAS, as localizações das estações são apresentadas na Figura 2. A curva-chave do rio Perdizes foi construída através de dados de nível coletados pela estação fluviométrica e medições de vazão com ADCP Sontek® modelo M9.



Figura 2 – Localização das estações pluviométrica e fluviométrica.

### Descrição do Tank Model

O Tank Model é classificado como modelo concentrado e determinístico. Como dados de entrada para a simulação, o modelo demanda apenas informações de precipitação e evapotranspiração. Conforme descrevem Nagasaka e Nakamura (1999), o Tank Model simula o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, onde o armazenamento do primeiro tanque é determinado pela precipitação e o armazenamento dos demais tanques é determinado pela infiltração do tanque superior. Cada tanque ainda tem orifícios laterais, representando as frações do escoamento (superficial, subsuperficial, intermediário e escoamento subterrâneo) (Figura 3).

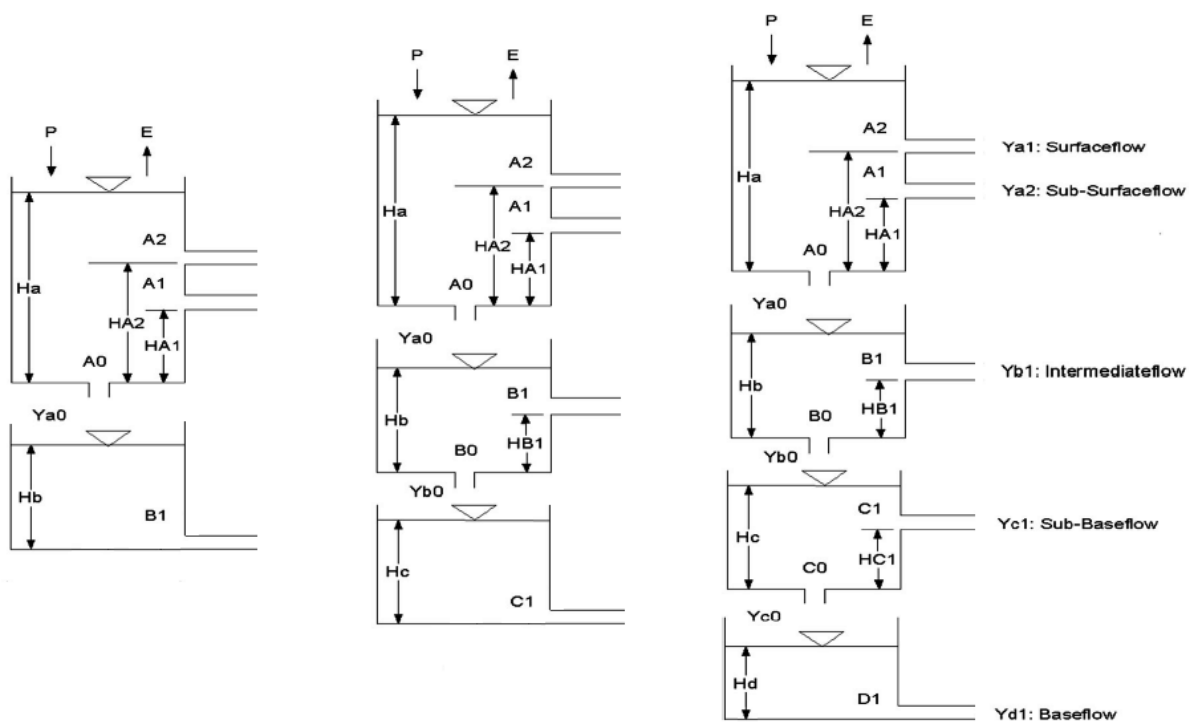


Figura 3 – Esquema geral do Tank Model indicando todos os parâmetros do modelo com 2, 3 e 4 tanques.  
Fonte: Adaptado de Amiri *et al.* (2016).

Os parâmetros do modelo podem ser classificados em dois tipos: i) aqueles que refletem processos hidrológicos, como geração do escoamento (A1, A2, B1, C1 e D1) e infiltração e percolação (A0, B0 e C0,); e ii) aqueles que refletem níveis de água (HA1, HA2, HB1 e HC1) nos tanques e servem como parâmetros de inicialização no modelo (Amiri *et al.*, 2016).

O presente trabalho calculou os valores de evapotranspiração (ETP) com o Método de Penman, modificado por Doorenbos e Pruitt (1992). O método de Penman (1948) é também chamado de método combinado, por combinar os efeitos do balanço de energia com o poder evaporante do ar (Kobiyama e Vestena, 2006). Este método é considerado um modelo padrão, ou seja, uma boa opção para estimar a ETP (Tucci e Beltrame, 2000).

Os principais dados necessários para estimar a evapotranspiração potencial diária através do método de Penman modificado são: temperatura (°C), insolação (hora/dia), umidade relativa do ar média (%) e velocidade média do vento (km/dia). A equação desse método é:

$$ETP = c[W \times Rn + (1 - W) \times f(U) \times (e_a - e_d)] \quad (1)$$

Onde: *ETP* é a evapotranspiração potencial diária (mm/dia); *c* é o fator de ajuste (adimensional); *W* é o fator de ponderação relacionado com a temperatura e a altitude (adimensional); *Rn* é a radiação solar líquida (mm/dia); *f(U)* é a função relacionada à velocidade do vento; *e<sub>a</sub>* é a pressão de vapor da água no ar saturado (mbar); e *e<sub>d</sub>* é a pressão do vapor do ar na condição real (mbar).

### Calibração automática do Tank Model

O ajuste dos parâmetros do modelo é o principal desafio na aplicação do mesmo. Chen *et al.* (2005) afirmaram que o procedimento de tentativa e erro tem sido comumente usado para calibração. No entanto, o processo de calibração manual é exaustivo devido ao número de parâmetros envolvidos. Portanto, vários estudos foram realizados para determinar um procedimento de calibração mais eficiente.

A calibração automática passou a ser bastante utilizada pelo fato de proporcionar maior rapidez ao processo. Portanto, no presente trabalho, a calibração foi automatizada utilizando o MATLAB<sup>®</sup>, que utiliza o algoritmo do NSGA-II desenvolvido por Seshadri (2009), e possui código aberto disponibilizado pela *MathWorks*. A faixa ótima dos parâmetros também foi obtida por meio de testes prévios de calibração manual, conforme Vasconcellos (2017).

## Análise dos resultados

Para analisar os resultados da calibração, o presente trabalho utilizou a Relação entre Volumes ( $\Delta V$ ), que indica se o balanço hídrico foi bem estimado (faixa ótima é entre -0,1 e 0,1), e o coeficiente de eficiência *Nash-Sutcliffe* (Nash e Sutcliffe, 1970). O *Nash* pode variar de  $-\infty$  até 1, onde 1 corresponde a um ajuste perfeito da vazão simulada aos dados observados. O cálculo do *Nash* é:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

Onde:  $E$  é o critério *Nash*;  $Q_{obs}(t)$  é a vazão observada; e  $Q_{sim}(t)$  é a vazão calculada.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A discretização temporal dos dados de entrada na simulação foi horária. Sendo assim, os valores de entrada do modelo, precipitação, vazão e ETP, estavam na mesma unidade (mm/hora). A Tabela 2 apresenta os parâmetros ótimos finais utilizados no Tank Model, para a mesma série de dados, encontrados através do método de calibração automática.

Tabela 2 – Parâmetros calibrados para os diferentes formatos de Tank Model.

<b>Coefficientes</b>	A2	A1	A0	B1	B0	C1	C0	D1
<b>Número de tanques</b>								
2-Tank	0,078	0,007	0,007	0,002	-	-	-	-
3-Tank	0,300	0,001	0,188	0,289	0,039	0,004	-	-
4-Tank	0,200	0,001	0,230	0,248	0,061	0,707	0,010	0,001

<b>Altura dos orifícios</b>	HA2	HA1	HB	HC
2-Tank	16,9	1,0	-	-
3-Tank	40,0	10,0	9,2	-
4-Tank	40,0	14,2	9,5	15,0

A Figura 4 demonstra os hidrogramas gerados através dos parâmetros demonstrados anteriormente.

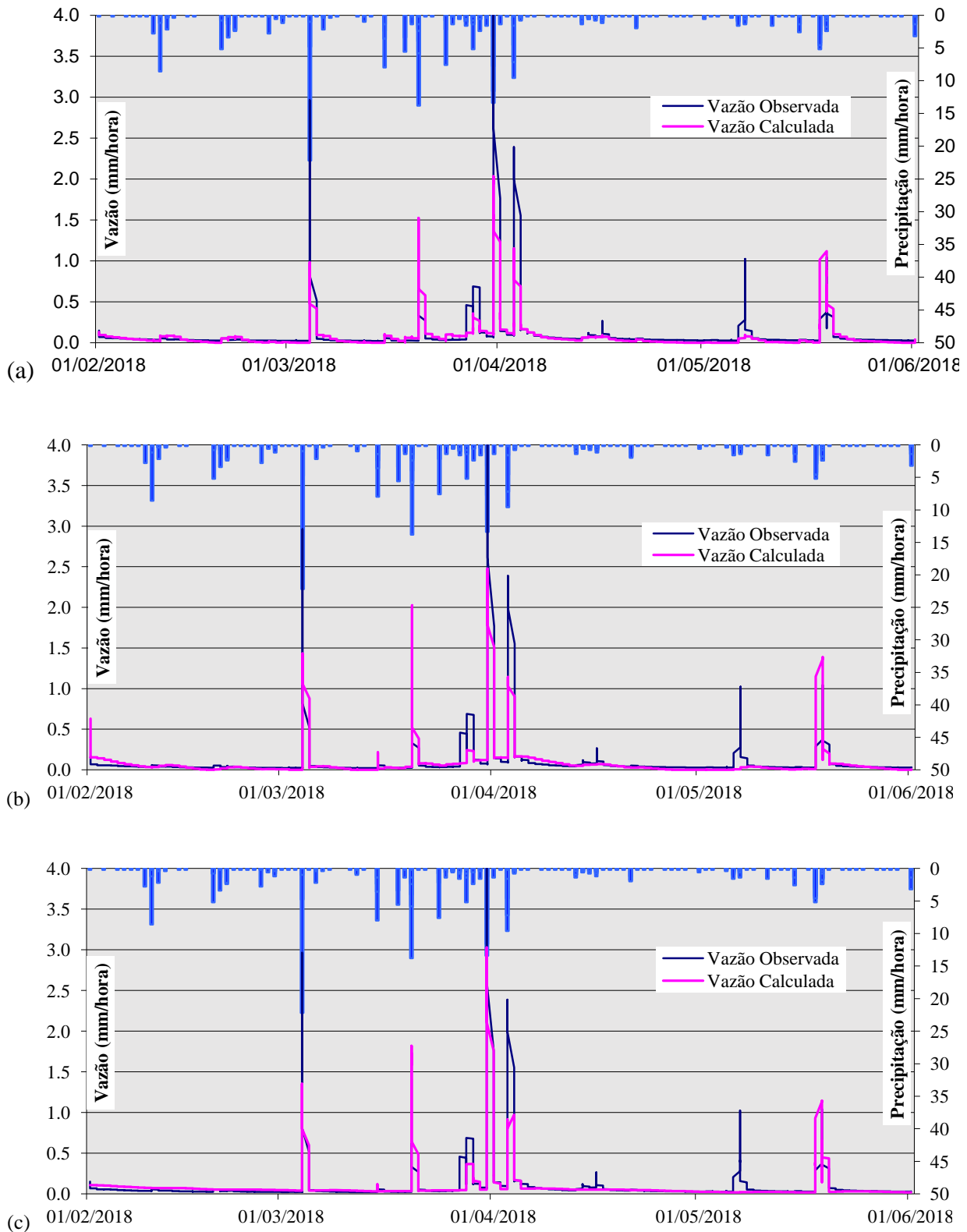


Figura 4 – Hidrograma observado e simulado: (a) com o 2-Tank Model; (b) 3-Tank Model; e (c) o 4-Tank Model.

Em todos os casos observou-se boa convergência entre os hidrogramas observados e simulados. Entretanto, no formato 2-Tank, apesar de apresentar boa correspondência com os picos de vazão máxima, o modelo subestimou as vazões mínimas. Já nos formatos 3-Tank e 4-Tank, a

simulação das vazões mínimas foi mais coerente com os dados obtidos em campo, e as vazões máximas também foram melhor representadas.

De acordo com os parâmetros de análise definidos, todos os formatos investigados, 2-Tank, 3-Tank e 4-Tank, são capazes de simular de forma satisfatória a vazão. No entanto, o melhor resultado é encontrado no formato 4-Tank (Tabela 3).

Tabela 3 – Resultados para os diferentes formatos de Tank Model.

Formato do Tank	Período (dias)	Vazão observada	Vazão Calculada	Nash	Relação entre volumes
2-Tank Model	121	230,06	200,39	0,53	-0,1
3-Tank Model	121	230,06	208,52	0,67	-0,1
4-Tank Model	121	230,06	230,11	0,73	0,0

A melhor representação dos processos chuva-vazão da bacia pelo 4-Tank resultou do maior número de parâmetros envolvidos no processo de calibração deste formato do modelo. Kuok *et al.* (2011), ao analisar o melhor formato do Tank Model para uma bacia rural em região úmida da Malásia, concluíram que para a bacia analisada (de 47,5 km<sup>2</sup>) e dados horários, o formato 4-Tank Model também apresentou o melhor valor de *Nash*.

A partir das vazões simuladas no 4-Tank, pode-se calcular o balanço hídrico mensal da bacia em estudo (Figura 5).

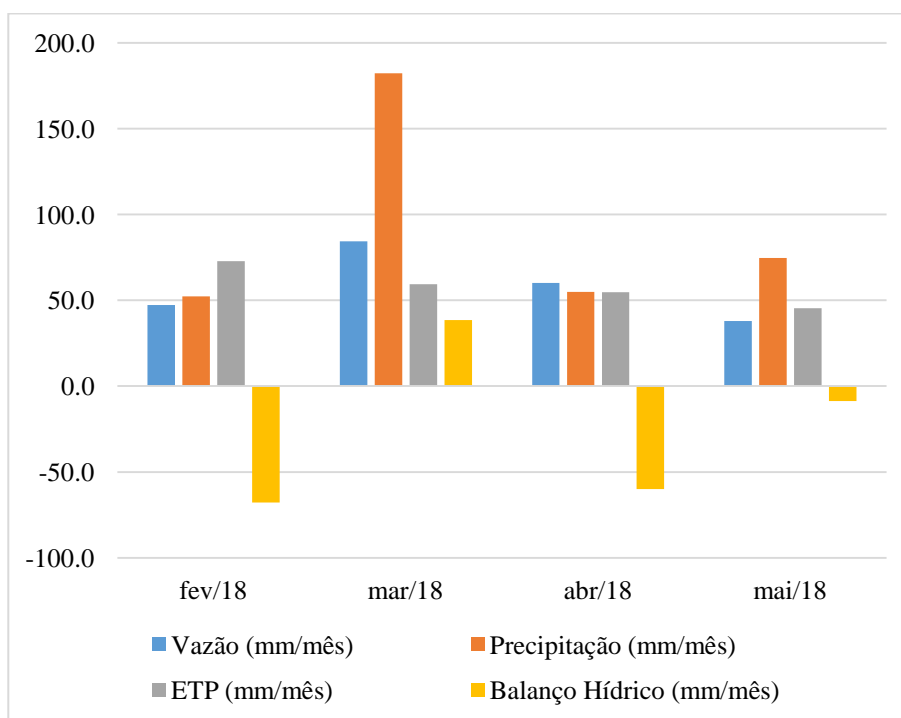


Figura 5 – Balanço hídrico da bacia do rio Perdizes a partir da simulação pelo 4-Tank Model, onde: Balanço Hídrico = Ppt - Q - ETP.



Segundo Sugawara (1995) a estrutura com 4 tanques é normalmente utilizada quando se trabalha com dados hidrológicos diários e o objetivo é analisar vazões de longo período. Porém, como características físicas da bacia também afetam a geração de escoamento, estas também influenciam a estrutura adotada para o Tank Model. Sendo assim, bacias pequenas, por exemplo, ou com muitas áreas urbanizadas e impermeáveis seriam melhor representadas por uma estrutura de 1 ou 2 tanques, pois nestas há predominância do escoamento superficial rápido.

Basri (2013) aplicou o Tank Model em uma bacia na Indonésia, e concluiu que bacias florestais de áreas úmidas são melhor representadas pela estrutura de 4 tanques, pois em geral áreas florestadas possuem camadas de solo mais profundas, com processos de infiltração e percolação ocorrendo de forma mais lenta, e conseqüentemente apresentando também uma resposta mais lenta ao processo de geração de escoamento.

Sendo assim, para a bacia do rio Perdizes, a partir do coeficiente *Nash* e da relação entre volumes, pode-se concluir que o 4-Tank Model representou melhor os processos chuva-vazão para uma série de 121 dias. Os resultados do presente estudo confirmaram que o Tank Model pode ser utilizado como um modelo de previsão de vazões para bacias com dados escassos de monitoramento.

## CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O Tank Model, aplicado para a simulação de vazões horárias, apresentou bom desempenho para o período analisado;
- Os resultados mostraram que todos os formatos investigados (2-Tank, 3-Tank e 4-Tank) são capazes de simular o escoamento para a bacia analisada;
- Para uma bacia sul brasileira, parcialmente florestada, com área em torno de 50 km<sup>2</sup> e uma série com 121 dias, o Tank Model apresentou melhor calibração com 4 tanques.

**AGRADECIMENTOS** - O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Programa Pró-Recursos Hídricos, Chamada n° 16/2017, Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- AMIRI, B.J.; FOHRER, N.; CULLMANN, J.; HÖRMANN, G.; MÜLLER, F.; ADAMOWSKI, J. (2016). “*Regionalization of Tank Model Using Landscape Metrics of Catchments*”. Water Resour Manage 30, pp.5065-5085.
- BASRI, H. (2013). “*Development of Rainfall-runoff Model Using Tank Model: Problems and Challenges in Province Aceh, Indonesia*”, Aceh International Journal of Science and Technology 2(1), pp. 26-36.
- CELESTE, A.B.; CHAVES, V.S. (2014). “*Avaliação de Algoritmos de Otimização e Funções Objetivo para Calibração Automática do Modelo Chuva-Vazão Tank Model*”. Ciência e Natura 36(3), pp.527-537.
- CHEN, R-S.; LAN-CHIEH, PI.; CHENG-CHENG, H. (2005). “*Application of Parameter Optimization Method for Calibrating Tank Model*”. Journal of the American Water Resources Association 41(2), pp.389-402.
- IBAMA (2004). *Plano de Manejo dos Parques Aparados da Serra e Serra Geral*. Ministério do Meio Ambiente Brasília.
- KOBIYAMA, M.; VESTENA, L.R. (2006). “*Aplicação do Método de PENMAN Modificado no Cálculo da Evapotranspiração Potencial para Quatro Estações Meteorológicas do Estado do Paraná*”. Revista Ciências Exatas e Naturais 8(1), pp.83-97.
- KUOK, K.K.; HARUN, S.; CHIU, P. (2011). “*Investigation Best Number of Tanks for Hydrological Tank Model for Rural Catchment in Humid Region*”. Journal - The Institution of Engineers 72(4), pp.1-11.
- NAGASAKA, A.; NAKAMURA, F. (1994). “*The influences of land-use changes on hydrology and riparian environment in a northern Japanese landscape*”. Landscape Ecology 14, pp.543-556.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. (1970). “*River flow forecasting through conceptual models part 1- a discussion of principles*”. Journal of Hydrology 10, pp.282-290.
- PEREIRA, T.S.R.; SANTOS, K.A.dos; SILVA, B.F.da; FORMIGA, K.T.M.; SOARES, A.K. (2016). “*Desenvolvimento de um Modelo Chuva-Vazão via Tank Model e Calibração Automática*”. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil 11(3), pp.17-28.
- SESHADRI, A. (2009). “*NSGA - II: A multi-objective optimization algorithm*”. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii--a-multi-objective-optimization-algorithm>>.
- SUGAWARA, M. (1961). “*On the Analysis of Runoff Structure about Several Japanese Rivers*”. Japanese Journal of Geophysics 2(4), pp.1-76.
- SUGAWARA, M (1995). “*Tank Model*” in *Computer Models of Watershed Hydrology*. Org. por Singh, V.P. Water Resources Publications. Highlands Ranch, pp.165-214.
- TUCCI, C.E.M.; BELTRAME, L.F.S. (2000). “*Evaporação e Evapotranspiração*”, in *Hidrologia Ciência e Aplicação*. Org. por TUCCI, C.E.M., ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre-RS, pp. 253-287.
- VASCONCELLOS, S.M. (2017). *Desenvolvimento de um índice de umidade do solo derivado da versão distribuída do Tank Model*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS. 104p.