Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>

Aplicação do Tank Model como Ferramenta de Gestão na Bacia do Rio Perdizes – Cambará do Sul/RS

Karla Campagnolo¹, Sofia Melo Vasconcellos², Vinicius Santanna Castiglio³, Marina Refatti Fagundes⁴ & Masato Kobiyama⁵

(1)(2). Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Grupo de Pesquisas em Desastres Naturais (GPDEN), Porto Alegre/RS, Brasil. E-mails: karlac@ufrgs.br; sofia.m.vasconcellos1009@gmail.com (3). Graduando em Engenharia Hídrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). E-mail: viniciuscastiglio@hotmail.com (4). Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Grupo de Pesquisas em Desastres Naturais (GPDEN). E-mail: marinarf95@hotmail.com.br (5). Professor. Grupo de Pesquisas em Desastres Naturais (GPDEN), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS. E-mail: masato.kobiyama@ufrgs.br

Artigo recebido em 22/10/2020 e aceito em 05/04/2021

RESUMO

A representação do processo precipitação-vazão por meio de modelos hidrológicos conceituais visa quantificar o volume escoado em uma bacia como consequência de uma determinada precipitação. Aliados a eles, os índices têm sido uma ferramenta útil para quantificar eventos extremos, como o *Tank Moisture Index* (TMI) que foi formulado a partir do modelo hidrológico *Tank Model*. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi aplicar o *Tank Model* para a bacia do rio Perdizes, em Cambará do Sul (RS), e avaliar o desempenho do TMI para prever a ocorrência de cheias, limiar este utilizado para o fechamento da trilha do rio do Boi, no Parque Nacional de Aparados da Serra (PNAS). Os dados utilizados na simulação foram obtidos pelas estações meteorológica e fluviométrica instaladas na bacia. Após a calibração e validação de três séries históricas no *Tank Model*, os valores obtidos do TMI foram comparados com os dias que a trilha foi fechada, a partir de altos níveis registrados no rio Perdizes. O TMI médio demonstrou que o nível utilizado para fechar a trilha do rio do Boi correspondeu a cheias em 72% das vezes, e o mediano, em 75%. Portanto, o TMI mostrou bom desempenho ao indicar a ocorrência de cheias na área estudada, sendo uma ferramenta útil para a tomada de decisões na gestão do PNAS.

Palavras-chave: Tank Moisture Index, fechamento de trilha, Parque Nacional de Aparados da Serra.

Application of the Tank Model as a Management Tool in the Perdizes River Basin - Cambará do Sul/RS.

ABSTRACT

The representation of the rainfall-runoff process by means of conceptual hydrological models aims to quantify the volume drained in a basin as result of a specific precipitation. Allied to them, the indices have been a useful tool to quantify extreme events, such as the Tank Moisture Index (TMI) which was formulated from the Tank Model. Thus, the objective of this work was to apply the Tank Model to the Perdizes river basin, in Cambará do Sul (RS), and to evaluate the performance of the TMI to predict the occurrence of floods, the threshold used for the closure of the Rio do Boi trail, in the Aparados da Serra National Park (PNAS). The data used in the simulation were obtained at the meteorological and fluviometric stations installed in the basin. After the calibration and validation of three historical series in the Tank Model, the values obtained in the TMI were compared with the days when the Trail was closed, from high levels recorded in the Perdizes river. The average TMI values demonstrated that the level used to close the Rio do Boi Trail corresponded to floods 72% of the time, and the median, 75%. Therefore, the TMI showed good performance in indicating the occurrence of floods in the study area, being a useful tool for decision making in the PNAS management.

Keywords: Tank Moisture Index, trail closure, Aparados da Serra National Park.

Introdução

A disponibilidade de informações hidrológicas é fundamental para um planejamento

eficiente e sustentável dos sistemas que envolvem os recursos hídricos (Celeste e Chaves, 2014). No Brasil, a coleta de dados pluviométricos é mais comum, devido, entre outros fatores, à maior

difusão dos pluviômetros. Além disso, o monitoramento com uso de radares e imagens de satélite aumentou significativamente a disponibilização de dados de áreas extensas. Em relação aos dados de vazão, sua coleta é feita, na maioria das vezes, de forma esporádica.

Amiri et al. (2016) destacaram que estudar hidrologia com a falta de dados hidrológicos em uma escala espaço-temporal adequada é um grande desafio para os pesquisadores. Segundo Beven (2001) é necessário extrapolar os dados hidrológicos disponíveis no espaço e no tempo, especialmente para bacias sem monitoramento, e também para o futuro, a fim de avaliar o impacto de futuras mudanças no regime hidrológico.

No contexto das mudanças climáticas, a intensificação do regime pluviométrico e o uso intenso do solo sem um manejo adequado são fatores causadores e potencializadores, respectivamente, da ocorrência de fenômenos naturais, tais como movimentos de massa (escorregamento e fluxo de detritos) e inundações bruscas (Kobiyama et al., 2020) nas bacias montanhosas. De acordo com Rocha e Silveira (2021) destinos turísticos de vários países têm sido atingidos por eventos extremos associados às mudanças climáticas, como inundações.

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 mecanismos que relacionam os dados de vazão com os de precipitação, os chamados modelos precipitação-vazão. Vasconcellos et al. (2021), ao mapear zonas de risco em leques aluviais através de modelagem, reforçaram que na escassez de dados hidrológicos deve-se buscar metodologias menos complexas para o estudo de bacias hidrográficas, como, por exemplo, no mapeamento das cheias.

A representação do processo precipitação-vazão por meio de modelos hidrológicos visa quantificar o volume escoado como consequência de uma determinada precipitação. De acordo com Marinho Filho et al. (2012), quanto mais detalhado for o modelo hidrológico a ser utilizado, maior será a quantidade de dados de entrada necessários a seu desenvolvimento. Por esse motivo, a disponibilidade de informações é um fator importante de ser levado em consideração na hora de escolher qual modelo hidrológico será aplicado ao caso em estudo.

Os modelos hidrológicos conceituais geralmente têm baixos requisitos de dados e são

computacionalmente mais simples do que modelos espacialmente explícitos (Knoben et al., 2019). Entre os diversos modelos existentes pode-se citar o Tank Model, que foi proposto por Sugawara (1961). Trata-se de um modelo matemático simples, composto por tanques dispostos verticalmente em série (normalmente de dois a quatro tanques) que representam esquematicamente a estratificação das camadas do solo. Para o cálculo do armazenamento no tanque superior, a precipitação é inserida e a evapotranspiração é descontada. Se não houver água no tanque superior, a evapotranspiração é subtraída do segundo tanque, e assim sucessivamente (Sugawara, 1995). Lara e Kobiyama (2012) descrevem o Tank Model como um modelo bastante recomendado para simulação de balanço hídrico, por ser computacionalmente simples e gerar bons resultados quanto ao cálculo de vazões de pico e volume escoado superficialmente.

Paik et al. (2005) afirmam que o Tank Model é frequentemente escolhido dentre vários modelos determinísticos chuva-vazão por ser um modelo de fácil aplicação e que utiliza como dados de entrada apenas informações relativas à precipitação e evapotranspiração. Além disso, a precisão das previsões realizadas com o uso do Tank Model é comparável com os resultados obtidos a partir da utilização de modelos mais sofisticados (Kuok et al., 2010).

Para realizar uma previsão de cheia e estiagem, Lindner e Kobiyama (2009) propuseram o Índice de Umidade do Solo (*Tank Moisture Index* - TMI) a partir do Tank Model aplicado à uma bacia de estudo. Vasconcellos et al. (2018) explicaram que o TMI é caracterizado pela máxima das médias dos armazenamentos de cada reservatório. Ainda, Vasconcellos et al. (2020) ressaltam que índices derivados do Tank Model são ferramentas que demonstram resumidamente as condições de umidade do solo em uma determinada região, sendo úteis na tomada de decisões para os gestores ambientais.

Buscando subsidiar a gestão de recursos hídricos, o objetivo do presente trabalho foi aplicar o Tank Model para a bacia do rio Perdizes em Cambará do Sul (RS), com calibração e validação dos resultados. Além disso, avaliou-se o desempenho do TMI como ferramenta para previsão das cheias, a fim de oferecer uma nova ferramenta de gestão, em relação à abertura e fechamento de trilhas no Parque Nacional de Aparados da Serra (PNAS). Segundo Mazzalli et al. (2021), que realizaram estudos na trilha do rio

do Boi, uma das mais famosas do PNAS, a trilha apresenta alto grau de dificuldade de caminhada e também sofre com frequentes desastres hidrológicos associados a enxurradas. Isso demonstra uma urgente necessidade de compreender os processos hidrológicos na região.

Material e métodos

Área de Estudo

O trabalho foi desenvolvido na bacia do rio Perdizes (51,0 km²) que fica localizada no município de Cambará do Sul (RS) (Figura 1), a qual está inserida no bioma Mata Atlântica.

A bacia está inserida nos Parques Nacionais de Aparados da Serra (PNAS) e Serra Geral (PNSG). A principal formação florestal 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).

De acordo com o Banco de Dados de Informações Ambientais (BDiA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na bacia do rio Perdizes há um predomínio de Cambissolos húmicos alumínicos (IBGE, 2020). Esse tipo de solo se caracteriza por ser pouco desenvolvido e apresentar baixa permeabilidade, estando normalmente associado a relevos ondulados e montanhosos e a zonas de clima frio e de altitude (EMBRAPA, 2018).

Figura 1. Localização da bacia do rio Perdizes.

Com relação ao monitoramento das variáveis meteorológicas na região, próximo à bacia do rio Perdizes estão instaladas duas estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo uma localizada no município de Cambará do Sul (A897) e outra no município de Bom Jesus (83919). Além dessas, existe uma estação meteorológica próxima à sede do PNAS, dentro da área da bacia. Essa estação, bem como o sensor de nível do rio Perdizes foram instalados pelo Grupo de Pesquisas em Desastres Naturais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

(GPDEN/UFRGS). A localização das estações está apresentada na Figura 2.

Além desses equipamentos automáticos, também estão instaladas duas réguas linimétricas próximas ao sensor fluviométrico do rio Perdizes. Uma das réguas foi instalada pelos gestores do PNAS do ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) e serve como base para determinar a abertura ou não da trilha do rio do Boi. A outra foi instalada pela equipe do GPDEN em uma seção próxima à anterior. O limiar estabelecido para a abertura da trilha é de 15 cm na

régua do PNAS, o equivalente a aproximadamente 55 cm na régua do GPDEN/UFRGS.

Figura 2. Localização das estações meteorológicas e fluviométrica na região em estudo.

Descrição do Tank Model

O Tank Model é classificado como um 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, de sub-base e escoamento de base).

Como citado anteriormente, para a aplicação do Tank Model são utilizados normalmente de dois a quatro tanques dispostos verticalmente em sequência. De acordo com Sugawara (1995), o número de tanques a serem utilizados depende principalmente do tamanho da bacia, do tipo de solo presente e de seu uso e ocupação.

Nesse sentido, Campagnolo et al. (2019) preliminarmente realizaram uma análise comparativa da eficiência da aplicação do Tank Model na bacia do rio Perdizes a partir da variação do número de tanques utilizados. Os resultados mostraram que, para essa bacia, os melhores valores foram obtidos ao serem utilizados quatro tanques em sequência, sendo este o número que foi utilizado no presente estudo.

Com relação aos parâmetros do modelo, esses podem ser classificados em dois tipos (Figura 3): i) aqueles que refletem processos hidrológicos, como geração do escoamento (Y_{a1} , Y_{a2} , Y_{b1} , Y_{c1} e Y_{d1}), infiltração e percolação (Y_{a0} , Y_{b0} e Y_{c0}); e ii) aqueles que refletem níveis de água (HA_1 , HA_2 , HB_1 e HC_1) nos tanques e servem como parâmetros de inicialização no modelo (Amiri et al., 2016). Estes parâmetros têm relação com o tipo de uso do solo, assim como com características geológicas da bacia hidrográfica (Ishihara e Kobatake, 1979). Entretanto, de forma geral, esses parâmetros não são obtidos diretamente através de análises de campo, mas sim por meio da calibração do modelo (Junsawang et al., 2007).

Figura 3. Esquema geral do Tank Model indicando os parâmetros do modelo com quatro tanques. Fonte: Adaptado de Amiri et al. (2016).

Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros atribuídos e calibrados no Tank Model, assim como os intervalos máximos e mínimos que os mesmos podem assumir.

Tabela 1. Intervalo dos valores dos parâmetros de calibração do Tank Model.

Parâmetro	Descrição	Intervalo	
		Mín	Máx
<i>HI1</i>	Armazenamento inicial do tanque 1	0	50
<i>HI2</i>	Armazenamento inicial do tanque 2	0	50
<i>HI3</i>	Armazenamento inicial do tanque 3	0	100
<i>HI4</i>	Armazenamento inicial do tanque 4	30	500
<i>HA1</i>	Altura do orifício 1 do tanque 1	10	70
<i>HA2</i>	Altura do orifício 2 do tanque 1	10	45
<i>HB1</i>	Altura da saída lateral do tanque 2	10	70
<i>HC1</i>	Altura da saída lateral do tanque 3	10	70
<i>Ya1</i>	Coeficiente de escoamento superficial (tanque 1)	0,09	0,5
<i>Ya2</i>	Coeficiente de escoamento sub-superficial (tanque 1)	0,09	0,5
<i>Yb1</i>	Coeficiente de escoamento intermediário (tanque 2)	0,09	0,5
<i>Yc1</i>	Coeficiente de escoamento sub-base (tanque 3)	0,01	0,1
<i>Yd1</i>	Coeficiente de escoamento de base (tanque 4)	0,001	0,01
<i>Ya0</i>	Coeficiente de infiltração do tanque 1	0,01	0,1
<i>Yb0</i>	Coeficiente de infiltração do tanque 2	0,01	0,1
<i>Yc0</i>	Coeficiente de infiltração do tanque 3	0,001	0,1

Dados utilizados, Calibração e Validação do Modelo

Os valores de evapotranspiração potencial (ETP) foram obtidos pelo Método de Penman, modificado por Doorenbos e Pruitt (1992), conforme Castiglio et al. (submetido). O método de Penman (1948), ou método combinado, associa os efeitos do balanço de energia com o poder evaporante do ar. Este método é considerado um modelo padrão, ou seja, uma boa opção para estimar a ETP (Tucci e Beltrame, 2000).

Os dados necessários para aplicar o 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:

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

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); *R_n* é a radiação solar líquida (mm/dia); *f(U)* é a função relacionada à velocidade do vento; *e_a* é a pressão de vapor da água no ar saturado (mbar); e *e_d* é a pressão do vapor do ar na condição real (mbar).

Os dados utilizados para calibração e validação do Tank Model foram as séries horárias obtidas nas estações listadas na Tabela 2.

Tabela 2. Dados utilizados nas simulações.

	Descrição	Nome do posto
Série histórica	Radiação solar	Cambará do Sul - A897 (INMET)
	Insolação	Bom Jesus - OMM: 83919 (INMET)
	Meteorológicos	PNAS (UFRGS)
	Níveis	PNAS (UFRGS)
	Vazão	Curva-chave GPDEN
Período de observação		
Calibração	121 dias	01/02/18 a 01/06/18
Validação	169 dias	10/11/18 a 28/04/19
Validação	100 dias	07/12/19 a 16/03/20

Para calibração e validação dos dados, o ajuste da faixa ótima dos parâmetros do modelo demonstra-se como um grande desafio. No presente trabalho, a calibração foi automatizada utilizando o algoritmo evolucionário *Non-dominated sorting genetic algorithm II* (NSGA II), proposto por Deb et al. (2002), que incorpora o conceito de elitismo e dominância em sua formulação. O elitismo ajuda a preservar as melhores soluções, e um esquema de classificação sem dominação é usado para avaliar a adequação das soluções.

O NSGA II gera uma população inicial aleatoriamente, sendo que o tamanho desta população é definido pelo usuário. Para executar o algoritmo, também é necessário informar o número de gerações e o intervalo de variação para cada parâmetro a ser calibrado. As etapas gerais do NSGA II estão descritas na Tabela 3. A versão do algoritmo utilizada no presente trabalho foi desenvolvida por Seshadri (2009), em MATLAB®, e possui código aberto disponibilizado pela MathWorks.

Tabela 3. Etapas gerais do algoritmo NSGA-II (Adaptado de Ticona et al., 2019).

Etapas 1	Uma população de pais (PO) de tamanho N é criada aleatoriamente com base nas características do problema (considerando restrições, limites de parâmetros, etc.).
Etapas 2	A avaliação da aptidão (ou hierarquização) é atribuída de acordo com seu nível de domínio e a população é classificada com base no critério de não-dominância.
Etapas 3	Seleção de torneio binário usual, recombinação, e operadores de mutação são usados para criar a população de filhotes Q_0 de tamanho N .
Etapas 4	Uma população T_i de tamanho $2N$ é formada através da combinação de PO e Q_0 .
Etapas 5	A população T_i é hierarquizada de acordo com a não-dominância, usando uma abordagem de classificação rápida e não dominada, originando as frentes de pareto.
Etapas 6	Uma população combinada P_{i+1} do tamanho N é formada. As soluções pertencentes à primeira frente são as melhores e devem ser enfatizadas na população combinada. Se o tamanho da primeira frente for menor que N , todos os membros serão escolhidos para P_{i+1} . Os membros restantes serão escolhidos das frentes de pareto subsequentes não dominadas na ordem de classificação. Este procedimento continua até que nenhum outro conjunto possa ser acomodado. Para escolher exatamente N membros da população, as soluções da última frente analisada são classificadas usando o operador de comparação aglomerada, determinando as melhores soluções para preencher os novos espaços da população.
Etapas 7	A nova população P_{i+1} de tamanho N é usada para seleção, cruzamento e mutação para criar uma nova população de filhotes Q_{i+1} do tamanho N .
Etapas 8	Se o número máximo de gerações for atingido, pare o algoritmo.

As informações relativas aos dias em que a trilha do rio do Boi foi fechada, que posteriormente foram utilizados para comparar com os resultados obtidos pelo TMI, foram fornecidas pelo escritório do PNAS do ICMBio.

Tank Moisture Index (TMI)

O TMI é um índice que considera a mudança diária nos valores de armazenamento (S) do Tank Model para geração de escoamento, e foi aplicado inicialmente por Lindner e Kobiyama (2009) para a bacia do Rio do Peixe (SC). De

$$F(\text{médio}) = \max(S_{\max 4} * \bar{S}_1 + S_{\max 3} * \bar{S}_2 + S_{\max 2} * \bar{S}_3 + S_{\max 1} * \bar{S}_4) * 0,11 \quad (2)$$

$$TMI(\text{médio}) = \frac{(S_{\max 4} * \bar{S}_1 + S_{\max 3} * \bar{S}_2 + S_{\max 2} * \bar{S}_3 + S_{\max 1} * \bar{S}_4)}{F(\text{médio})} \quad (3)$$

onde $F(\text{médio})$ é o fator de escala considerando o armazenamento médio dos tanques (mm^2); $S_{\max 4}$, $S_{\max 3}$, $S_{\max 2}$, e $S_{\max 1}$ são os valores máximos de armazenamento calculados para o 4º, 3º, 2º e 1º reservatórios, respectivamente; $\bar{S}_1$, $\bar{S}_2$,

acordo com esses autores, os valores dos armazenamentos no primeiro e no quarto reservatórios são importantes para representar as situações de fluxos mais altos. Já os valores armazenados nos outros dois reservatórios são importantes para representar períodos de secas.

Para o cálculo do TMI podem ser utilizados os valores médios ou os medianos do armazenamento contido em cada tanque. A formulação do TMI calculado pela média dos valores do armazenamento do Tank model é:

$\bar{S}_3$ e $\bar{S}_4$ são os valores médios de armazenamento calculados para os respectivos reservatórios.

Já as expressões para a determinação do TMI mediano estão descritas a seguir:

$$F(\text{mediano}) = \max(S_{\max 4} * S_{md_1} + S_{\max 3} * S_{md_2} + S_{\max 2} * S_{md_3} + S_{\max 1} * S_{md_4}) * 0,11 \quad (4)$$

$$TMI(\text{mediano}) = \frac{(S_{\max 4} * S_{md_1} + S_{\max 3} * S_{md_2} + S_{\max 2} * S_{md_3} + S_{\max 1} * S_{md_4})}{F(\text{mediano})} \quad (5)$$

onde $F(\text{mediano})$ é o fator de escala considerando o armazenamento mediano dos tanques (mm^2); S_{md_1} , S_{md_2} , S_{md_3} e S_{md_4} são os valores medianos de armazenamento calculados para os respectivos reservatórios.

As faixas de TMI propostas por Lindner et al. (2011) não puderam ser aplicadas neste estudo devido à grande diferença no tamanho das bacias. Naquele caso, o índice foi determinado para quatro bacias incrementais com áreas variando de 803 a 5238 km^2 , ou seja, muito maiores do que a bacia do rio Perdizes. Por esse motivo, após a calibração dos resultados para o rio Perdizes, as faixas de TMI foram reclassificadas segundo cada classe de umidade do solo.

Análise dos Resultados

As funções-objetivo utilizadas na calibração foram duas: a Relação entre Volumes (ΔV) (equação 6) e o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS) (equação 7).

$$\Delta V = 1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{cal,t} - Q_{obs,t}|}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,t}} \right| \quad (6)$$

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{calc,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - \bar{Q}_{obs})^2} \right] \quad (7)$$

onde $Q_{cal,t}$ é a vazão calculada no intervalo de tempo t ; Q_{obs} é a média dos valores observados; $Q_{obs,t}$ é o valor da vazão observada no intervalo de tempo t ; e n é o número de intervalos de tempo.

O ΔV foi proposto por Criss e Winston (2008), e informa se o balanço hídrico foi bem estimado (faixa ótima é entre -0,1 e 0,1). Já o NS foi proposto por Nash e Sutcliffe (1970), e seus valores podem variar de $-\infty$ até 1, onde 1 corresponde a um ajuste perfeito da vazão simulada aos dados observados. Com base em Moriasi et al. (2007), os resultados de NS podem ser divididos em quatro intervalos: NS < 0,5 (insatisfatório), 0,5 < NS < 0,65 (satisfatório), 0,65 < NS < 0,75 (bom) e 0,75 < NS < 1,0 (muito bom).

Resultados e discussão

Calibração e Validação do Modelo

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). Na etapa de calibração do Tank Model, adotou-se uma população com 100 indivíduos e 500 gerações ($N_p = 100$ e $N_{gen} = 500$), como sugerido por Pushpalatha et al. (2012).

A Tabela 4 apresenta os parâmetros ótimos finais utilizados no Tank Model para as séries de dados, definidos através do método de calibração automática.

Tabela 4. Parâmetros calibrados para o Tank Model.

	Parâmetro	Parâmetro calibrado
Alturas iniciais de armazenamento (mm)	HI1	1,81
	HI2	3,01
	HI3	13,31
	HI4	56,93
Coeficientes de escoamento e infiltração (mm/10min)	Ya2	0,043
	Ya1	0,011
	Ya0	0,015
	Yb1	0,102
	Yb0	0,088
	Yc1	0,001
	Yc0	9,98436E-05
Altura dos orifícios (mm)	Yd1	0,001
	HA2	19,0
	HA1	5,0
	HB	18,5
	HC	8,2

Na Figura 4 estão apresentados os hidrogramas referentes aos períodos de calibração e validação do modelo, que foram gerados através da utilização dos parâmetros demonstrados anteriormente.

Observou-se boa convergência entre os hidrogramas observados e os hidrogramas calculados para os três períodos que foram simulados pelo modelo. Entretanto, apesar de apresentar boa correspondência com as vazões mínimas, em geral, o modelo subestimou as vazões máximas.

De acordo com os parâmetros de análise definidos, o Tank Model foi capaz de simular de forma satisfatória a vazão (Tabela 5).

Tabela 5. Resultados das simulações com o Tank Model.

Período (dias)	Vazão Observada*	Vazão Calculada*	NS	ΔV
121	209,75	184,84	0,65	-0,12
169	542,31	411,91	0,57	-0,24
100	244,89	307,72	0,65	0,26

*mm/período total

Os valores de NS e ΔV foram considerados satisfatórios, tanto para o período de calibração quanto para os períodos escolhidos para a validação do modelo. Os resultados obtidos foram superiores aos encontrados por Goodarzi et al. (2020), que avaliaram a aplicação do Tank Model em bacias de diferentes escalas (pequena, média e grande), e concluíram que a validação do modelo numa bacia pequena pode ser insatisfatória ($NS < 0,5$). Song et al. (2019) calibraram e validaram o Tank Model em 39 bacias hidrográficas com diferentes características, onde a calibração foi considerada satisfatória em 90% dos casos, e a validação em 72% das bacias.

Figura 4. a) Calibração do Tank Model para a série de 121 dias; b) validação do Tank Model para a série de 169 dias; e c) validação para a série de 100 dias.

Sendo assim, para a bacia do rio Perdizes, a partir de NS e ΔV , pode-se concluir que o Tank Model representou satisfatoriamente os processos precipitação-vazão para as séries históricas selecionadas. Os resultados conjuntos de

calibração e validação confirmam que o modelo pode ser utilizado como uma ferramenta de previsão de vazões para a bacia do rio Perdizes. Entretanto, vale lembrar a manifestação de Basri (2013), de que a simulação é considerada bem-

sucedida e pode ser usada para avaliar a bacia hidrográfica em questão caso um estudo realize uma avaliação do modelo considerando longas séries históricas (cerca de dez anos). Então, para garantir a aplicação do Tank Model para a presente bacia, é necessário continuar o monitoramento e estender a série histórica de dados hidrológicos.

De acordo com Vasconcellos et al. (2021) em razão da intensificação da ocupação humana na região mais jusante da bacia do rio do Boi, bem como pela maior procura no turismo ecológico, é importante que os órgãos públicos adotem medidas preventivas contra desastres hidrológicos, como por exemplo o ordenamento do território com base em mapas de perigo. Para esse tipo de mapeamento, modelos computacionais mais robustos, como o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), podem ser usados para simular essas enchentes, o que foi claramente apresentado também por Monteiro et al. (2021).

Ainda, deve-se observar a mudança de uso do solo no período monitorado. Kobiyama et al. (2020) aponta que a cobertura florestal em uma bacia hidrográfica interfere no ecossistema de várias maneiras, tanto na qualidade e quantidade de vazão no rio, como nas características da chuva através dos processos de escoamento pelo tronco e chuva interna.

Aplicação do Tank Moisture Index –TMI

O TMI foi determinado com as séries de dados calculadas a partir dos valores de armazenamento dos quatro reservatórios do Tank Model. A Tabela 6 demonstra as faixas de valores do TMI para a classificação da condição de umidade do solo, considerando a bacia do rio Perdizes.

Tabela 6. Faixas do TMI para a classificação da umidade do solo.

Classe de umidade do solo	Intervalo
Muito seco	$\leq 0,1$
Seco	$0,1 < \text{TMI} \leq 0,2$
Normal	$0,2 < \text{TMI} \leq 0,3$
Úmido	$0,3 < \text{TMI} \leq 0,7$
Muito úmido	$> 0,7$

Os valores do TMI obtidos a partir dessa classificação foram comparados com os dias em que a trilha do rio do Boi foi fechada pelos gestores

do PNAS. A Tabela 7 explicita os intervalos do índice, e sua comparação com os registros dos dias de trilha fechada, considerados aqui como dias de cheias. Aqui nota-se que, uma vez que o ICMbio fecha a trilha, a trilha fica fechada o dia inteiro.

Tabela 7. Aplicação do TMI médio e mediano na bacia do rio Perdizes e comparação com os registros de fechamento da trilha do rio do Boi, durante os períodos de calibração e validação.

Intervalo TMI	Dias de trilha fechada e TMI médio	Dias de trilha fechada e TMI mediano
$\leq 0,1$	0	1
$0,1 < \text{TMI} \leq 0,2$	6	4
$0,2 < \text{TMI} \leq 0,3$	11	10
$0,3 < \text{TMI} \leq 0,7$	37	39
$> 0,7$	7	7
Total	61	61

Os resultados evidenciam que durante as séries de calibração e validações, de um total de 61 dias em que a trilha do rio do Boi foi fechada, em 72% dos eventos o TMI médio classificou as condições do solo como úmidas ou muito úmidas ($\text{TMI} > 0,3$), ou seja, houve acerto no fechamento ao considerar esse índice, pois os níveis atingiram os limiares de cheia pré-determinados. Com o TMI mediano, o acerto chegou a 75%.

A aplicação de índices derivados do Tank Model como indicadores conceituais do armazenamento de água no solo já é amplamente utilizada no Japão para avaliar a predisposição de ocorrência de inundações ou deslizamentos. Matsuyama et al. (2021) aplicaram 2 índices derivados do Tank (SWI e SWI-modificado) em uma bacia hidrográfica na Rússia para previsão de deslizamentos acarretados por neve, com bons resultados. Outros trabalhos também foram bem-sucedidos na estimativa de deslizamentos (Lin et al., 2020) e estabilidade de encostas (Matlan et al., 2018). Neste sentido, o TMI possui formulação mais robusta do que o SWI por adotar a média e mediana dos armazenamentos calculados pelo modelo, enquanto o SWI é calculado pelo simples somatório das alturas de armazenamento dos tanques.

Vasconcellos et al. (2018), ao aplicar o TMI para analisar eventos de seca no baixo rio São Francisco, com uma série de 26 anos, observaram que em 89% dos eventos houve acerto do índice. Lindner e Kobiyama (2009) verificaram que o

índice TMI obteve 84% de ajuste a decretos de calamidade pública relacionados a eventos de inundação, e 90% de ajuste a eventos de seca.

Comparando os dados de precipitação acumulada diária com o TMI médio máximo diário da série de 121 dias (Figura 5), é possível verificar uma variação direta dos períodos de crescimento e decréscimo, com boa correlação entre as variáveis.

Como é esperado, o TMI médio máximo cresceu de forma mais acentuada nos períodos em que a precipitação acumulada foi mais elevada. Da mesma forma, quando a precipitação diária ou em até dois dias alcança 15 mm acumulados, o TMI é maior que 0,3, sendo esse um possível critério para fechamento da trilha do rio do Boi.

Figura 5. TMI médio máximo diário e precipitação diária no período de 01/02/2018 a 01/06/2018 (121 dias).

No período entre 15/03/18 e 06/04/18 o TMI médio máximo apresentou valores próximos ou $>0,3$, tendo até mesmo valores próximos de 1, período esse onde foi registrada uma precipitação acumulada de 173,4 mm. Além disso, mesmo nos períodos em que as precipitações acumuladas diárias ficaram <5 mm, o TMI médio máximo não apresentou valores $<0,3$, sendo necessário no mínimo três dias com precipitações ≤ 5 mm para a redução do TMI abaixo de 0,3.

Ainda assim, observamos que, nos períodos analisados, a precipitação de 15 mm foi um potencial gerador de escoamento superficial na

bacia e essa precipitação representou de maneira mais significativa o aumento da vazão do rio Perdizes. Contudo, isso deve ser avaliado com maior profundidade em futuros trabalhos.

Foi plotado graficamente os dias em que o TMI médio máximo calculado foi maior do que 0,3, junto à vazão máxima no mesmo dia (Figura 6). A partir da avaliação desses dados foi possível estimar um coeficiente de regressão de 0,684 entre o TMI médio máximo e a vazão máxima observada, podendo esse ser considerado como um resultado satisfatório.

Figura 6. Regressão linear da vazão máxima diária com o TMI médio máximo diário e o TMI mediano máximo diário, para a série de 121 dias.

Para os períodos em que o TMI médio apresenta valores entre 0,3 e 0,4 é difícil identificar um valor de referência para a vazão do mesmo período, com exceção das vazões acima de 5,0 m³/s. Porém pode-se referenciar uma vazão média entre as taxas de 1,8 m³/s. Com o aumento da vazão, é possível identificar com maior clareza os pontos em que o TMI médio máximo é >0,5, tendo uma boa relação entre o aumento de vazão com o aumento do TMI médio. Assim, podemos inferir que para vazões >5 m³/s, o TMI médio apresenta valores >0,3 e que sua elevação está diretamente relacionada com a vazão.

Ao analisar o TMI mediano na Figura 6, em geral, foram obtidos os mesmos pontos que TMI médio máximo nas situações em que a taxa é >0,4. Contudo, nos pontos em que a taxa varia entre 0,3 e 0,4, é perceptível uma diminuição na densidade de pontos. Desta forma, o modelo apresentou uma diminuição nos pontos em que as vazões baixas podem gerar possíveis erros no

critério de fechamento pelo TMI. Sendo assim, é válida sua utilização quando comparado com o TMI médio.

A Figura 7 especifica a relação do nível máximo diário com o TMI médio máximo >0,3, sendo que os níveis coincidem com as vazões demonstradas anteriormente. O nível mínimo para um TMI acima de 0,3 é maior que 0,2 m. Da mesma forma como ocorre com a vazão, o TMI médio cresce junto ao aumento do nível do rio Perdizes, havendo um vínculo direto entre as duas variáveis, conforme é esperado.

Usando como referência o atual critério de fechamento da trilha (nível igual ou maior que 0,55 m), o gráfico apresentado na Figura 7 mostra que um possível valor de referência a ser adotado para o TMI médio seja $\geq 0,55$. Ainda, pode ser adotado um sinal de alerta ou precaução quando o TMI médio ficar $\geq 0,4$.

Figura 7. Regressão linear do nível máximo diário com o TMI médio máximo diário observado e o TMI mediano máximo diário, para a série de 121 dias.

Como ocorreu com o TMI médio, o TMI mediano máximo foi comparado com o nível das vazões máximas diárias obtidas (Figura 7). Analisando graficamente, para níveis entre 0,2 e 0,4 m o TMI mediano máximo variou entre 0,3 e 0,4, com exceção de dois pontos extremos, no qual os níveis foram superiores a 0,6 m.

Quando a taxa ficou $>0,4$, não foram observados níveis menores que 0,4 m, como ocorreu com o TMI médio. Contudo, o TMI mediano, quando comparado com o TMI médio, gerou menos pontos que podem gerar falsos alertas, entre as taxas de 0,3 e 0,4, um fator favorável para a sua utilização.

Para uma análise mais aprofundada, foram analisados na série os dias em que o nível do rio Perdizes apresentou valores $\geq 0,55$ m, comparando com a resposta dada pelo TMI médio e TMI mediano (TMI máximo obtido no dia). Dessa forma, foram analisados os dias em que o nível estava $\geq 0,55$ m, mas que não foram identificadas respostas do TMI ou dias em que o TMI apresentou uma taxa $>0,3$, mas o nível observado foi $<0,55$ m.

Observou-se que o TMI médio apresentou 25 dias com falsos alertas, no qual em 24 dias o TMI estava $>0,3$, porém o nível observado estava $<0,55$ m, e 1 dia em que o nível monitorado foi $\geq 0,55$ m, mas o TMI médio apresentou um valor $<0,3$. Já para os pontos em que o nível observado estava $\geq 0,55$ m e o TMI médio apresentou valores

$>0,3$, foram identificados 16 dias em que o modelo respondeu bem à elevação do nível.

Desta forma, quando o nível observado foi $\geq 0,55$, o TMI mediano e o TMI médio apresentaram apenas 1 dia de falso alerta, ou seja, o modelo não identificou um TMI $>0,3$. Já em 25 dias, o modelo apresentou uma taxa $>0,3$ e o nível observado foi $\geq 0,55$ m, tendo assim um acerto de 96% em sua resposta à elevação do nível.

Com base nos resultados, consideramos que o TMI mediano seja um critério útil para a definição do fechamento da trilha do rio do Boi segundo as observações no rio Perdizes, apresentando-se como uma ferramenta disponível e que pode agregar aos critérios atuais de definição. Além disso, pode-se indicar uma taxa de TMI de alerta para possíveis cheias, algo que pode ser aprofundado com maior monitoramento. Embora o presente trabalho tenha mostrado que o TMI mediano foi melhor do que o TMI médio, essa comparação deverá ser investigada com um maior período de monitoramento e também em outras regiões com diferentes características geográficas.

Fagundes et al. (2019), através da utilização conjunta de modelos e de um índice de perigo, concluíram que é possível aprimorar o critério de fechamento da trilha do rio do Boi, de modo a considerar não somente o nível do rio Perdizes, mas também outras variáveis hidrometeorológicas que influenciam a dinâmica

do escoamento e, assim, aumentar a segurança dos turistas. Rocha e Silveira (2021) confirmaram que no Brasil existem inúmeros destinos turísticos que possuem áreas de riscos aos desastres naturais em seus territórios e, que, ao mesmo tempo, reúnem centenas de turistas, como acontece do rio do Boi.

O entendimento sobre as variações da vazão dos rios é assunto recorrente nos debates científicos sobre recursos hídricos no Brasil, pois a vazão é um parâmetro fundamental para atividades que atingem diretamente a comunidade, como previsão de cheias, abastecimento público e irrigação. Sendo assim, considerando os recursos disponíveis, o TMI demonstrou ser uma ferramenta útil para previsão das cheias, e assim pode ser usado para gestão de trilhas no PNAS.

De acordo com Rocha e Silveira (2021) há uma carência de estudos que visam analisar a ocorrência de desastres naturais na atividade turística, uma vez que as pesquisas realizadas no Brasil não são divulgadas pela comunidade científica de modo satisfatório, gerando uma lacuna no conhecimento ao não demonstrar de forma efetiva como os destinos turísticos estão expostos aos desastres naturais.

Conclusões

Com base nos resultados obtidos, pode-se chegar nas seguintes conclusões:

- O Tank Model, aplicado para a simulação de vazões horárias, apresentou bom desempenho para os períodos analisados e foi capaz de simular os escoamentos para a bacia do rio Perdizes ao serem avaliadas as métricas de eficiência de ΔV e NS;
- Para uma bacia sul brasileira, parcialmente florestada e altamente preservada, com área em torno de 50 km², o TMI mostrou bom desempenho na indicação da ocorrência de cheias, o que indica que este pode ser utilizado como ferramenta de gestão na tomada de decisões para o fechamento da trilha do rio do Boi;
- O modelo apresentou os melhores resultados através da utilização do TMI mediano, tendo um acerto de 96% quando comparado com os níveis de cheias registrados. A partir da obtenção e análise de séries históricas mais longas no monitoramento da bacia do rio Perdizes, a precipitação acumulada diária de 15 mm pode ser considerada como um critério de resposta da bacia ao aumento da

vazão no trecho monitorado, e consequente fechamento da trilha do rio do Boi;

- Para aprimorar a gestão integrada do PNAS, mais estudos conjuntos de hidrologia, meteorologia, hidrodinâmica, entre outros, precisam ser realizados.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Programa Pró-Recursos Hídricos, chamada nº 16/2017. Os autores agradecem aos gestores do PNAS do ICMBio pelo apoio logístico em campo.

Referências bibliográficas

- 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, 5065-5085. DOI: 10.1007/s11269-016-1469-5
- Beven, K.J., 2001. *Rainfall-runoff modelling: the primer*. Chichester, U.K.: John Wiley and Sons Press, Department of Geography Royal Holloway.
- 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, 26-37. DOI: 10.13170/aijst.2.1.572
- Campagnolo, K., Castiglio, V.S., Vasconcellos, S.M., Kobiyama, M., 2019. Aplicação do Tank Model para a Bacia do Rio Perdizes em Camará do Sul/RS. In: *Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- Castiglio, V.S., Campagnolo, K., Kobiyama, M. Análise de evapotranspiração potencial no município de Camará do Sul/RS. *Revista Geonorte* (submetido).
- 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, 527-537. DOI: 10.5902/2179460X13421
- Criss, R.E., Winston, W.E., 2008. Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. *Hydrological Processes* 22, 2723-2725. DOI:10.1002/hyp.7072

- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T.A.M.T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6, 182–197. DOI: 10.1109/4235.996017
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília.
- Fagundes, M.R., Fan, F.M., Paixão, M.A., 2019. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica como ferramenta para auxiliar no critério de fechamento da trilha do rio do Boi (RS e SC). In: *Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- Goodarzi, M., Amiri, B.J., Azarneyvand, H., Khazaei, M., Mahdianzadeh, N., 2020. Assessing the performance of a hydrological Tank Model at various spatial scales. *Journal of Water Management Modeling* 28. DOI: 10.14796/JWMM.C472
- Gutierrez, J.C.T., Adamati, D.S., Bravo, J.M., 2019. A new stopping criterion for multi-objective evolutionary algorithms: Application in the calibration of a hydrologic model. *Computational Geosciences* 23, 1219–1235. DOI: 10.1007/s10596-019-09870-3
- IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2004. Plano de Manejo dos Parques Aparados da Serra e Serra Geral. Ministério do Meio Ambiente. Brasília.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Banco de dados de Informações Ambientais - Pedologia. Disponível em <<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>>. Acesso em 3 out. 2020.
- Ishihara, Y., Kobatake, S., 1979. Runoff model for flood forecasting. *Bulletin of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University* 29, 27–43.
- Junsawang, P., Asavanant, J., Lursinap, C., 2007. Artificial Neural Network Model for Rainfall-Runoff Relationship. In: *2nd International Conference on Asian Simulation and Modeling*. Chiang Mai, Tailândia, pp. 267–273.
- Kobiyama, M., Campagnolo, K., de Menezes, D., Paixão, M.A., 2020. Manejo da zona ripária para redução de risco de desastres no ambiente montanhoso. In: *Junior, L.M., Freitas, C.M., Lopes, E.S.S., Castro, G.R.B., Barbosa, H.A., Londe, L.R., Magnoni, M.G.M., Silva, R.S., Teixeira, T., Figueiredo, W.S. (Org.) Redução do risco de desastres e a resiliência no meio rural e urbano*. Centro Paula Souza, São Paulo, pp. 764–794.
- Knoben, W.J.M., Freer, J.E., Fowler, K.J.A., Peel, M.C., Woods, R. A., 2019. Modular Assessment of Rainfall–Runoff Models Toolbox (MARRMoT) v1.2: an open-source, extendable framework providing implementations of 46 conceptual hydrologic models as continuous state-space formulations. *Geoscientific Model Development* 12, 2463–2480, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2463-2019>
- Kuok, K.K., Harun, S., Shamsudin, S.M., 2010. Global optimization methods for calibration and optimization of the hydrologic Tank model's parameters. *Canadian Journal on Civil Engineering* 1, 2–14.
- Lara, P.G., Kobiyama, M., 2012. Proposta de Modelo Conceitual: PM Tank Model. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 17, 149–161. DOI: 10.21168/rbrh.17.149-161
- Lin, G.-W., Kuo, H.-L., Chen, C.-W., Wei, L.-W., Zhang, J.-M., 2020. Using a Tank Model to Determine Hydro-Meteorological Thresholds for Large-Scale Landslides in Taiwan. *Water* 12, 253. <https://doi.org/10.3390/w12010253>
- Lindner, E.A., Kobiyama, M., 2009. Proposal of Tank Moisture Index to predict floods and droughts in Peixe River watershed, Brazil. *IAHS-AISH Publication* 331, 314–323.
- Lindner, E.A., Kobiyama, M., Caprario, G.N., 2011. Proposal of Tank Moisture Index to Predict Floods and Droughts in Peixe River Watershed, Brazil. In: *XIVth IWRA World Water Congress*. ABRH, Porto de Galinhas, Brasil, pp. 1–17.
- Marinho Filho, G.M., Andrade, R.S., Zukowski, J.C., Magalhães Filho, L.N.L., 2012. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. *Revista de Ciências Ambientais* 2, 35–47. DOI: 10.18316/268
- Mazzalli, L.H., Diaz, L.R., Kobiyama, M., Campagnolo, K., 2021. Análise dos Trechos da Trilha do Rio do Boi no Parque Nacional de Aparados da Serra. *Biodiversidade Brasileira* (no prelo).
- Matlan, S.J., Abdullah, S., Alias, R., Mukhlisin, M., 2018. Effect of Working Rainfall and Soil Water Index on Slope Stability in Ranau, Sabah. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 9, 1331–1341.
- Matsuyama, H., Saito, H., Zemtsov, V., 2021. Application of Soil Water Index to landslide prediction in snowy regions: sensitivity

- analysis in Japan and preliminary results from Tomsk, Russia. *Progress in Earth and Planetary Sciences* 8, 17. <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00408-9>
- Monteiro, L.R., Santos, C.I., Kobiyama, M., Corseuil, C.W., Chaffe, P.L.B. Effects of return periods on flood hazard maps: An analysis of the UFSC campus basin, Florianópolis city, Brazil. *Brazilian Journal of Water Resources* (no prelo).
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50, 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153
- Nagasaka, A., Nakamura, F., 1999. The influences of land-use changes on hydrology and riparian environment in a northern Japanese landscape. *Landscape Ecology* 14, 543-556. DOI: 10.1023/a:1008164123102
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part 1-a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90225-6
- Paik, K., Kim, J.H., Kim, H.S., Lee, D.R., 2005. A conceptual rainfall-runoff model considering seasonal variation. *Hydrological Processes: An International Journal* 19, 3837-3850. DOI: 10.1002/hyp.5984
- Pereira, T.S.R., dos Santos, K.A., da Silva, B.F., Formiga, K.T.M., Soares, A.K., 2016. Desenvolvimento de um Modelo Chuva-Vazão via Tank Model e Calibração Automática. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil* 11, 17-28. DOI: 10.5216/reec.v11i3.36007
- Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Andréassian, V., 2012. A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology* 420, 171-182. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.11.055
- Rocha, M.M., Silveira, M.A.T., 2021. Gestão de Risco no Turismo: Análise dos Destinos Turísticos no Brasil e a Vulnerabilidade a Desastres Naturais. *Marketing & Tourism Review* 6, 1-32. DOI: 10.29149/mtr.v6i1.6463
- 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>>.
- Song, J.-H., Her, Y., Suh, K., Kang, M.-S., Kim, H., 2019. Regionalization of a Rainfall-Runoff Model: Limitations and Potentials. *Water* 11, 2257. <https://doi.org/10.3390/w11112257>
- Sugawara, M., 1961. On the Analysis of Runoff Structure about Several Japanese Rivers. *Japanese Journal of Geophysics* 2, 1-76.
- Sugawara, M., 1995. Tank Model. In: V.P. Singh (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, pp. 165-214.
- Tucci, C.E.M., Beltrame, L.F.S., 2000. Evaporação e Evapotranspiração. In: C.E.M. Tucci (Org.), *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. ABRH, Porto Alegre, pp. 253-287.
- Vasconcellos, S.M., Moreira, L.L., Kobiyama, M., 2018. Análise de eventos de seca no baixo rio São Francisco a partir do Tank Moisture Index. In: *Anais do I Encontro Nacional de Desastres*. Porto Alegre, RS, Brasil.
- Vasconcellos, S.M., Kobiyama, M., Mota, A.A., 2020. Evaluation of Soil Water Index of distributed Tank Model in a small basin with field data. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. DOI: 10.5194/hess-2019-682.
- Vasconcellos, S.M., Kobiyama, M., Dagostin, F.S., Corseuil, C.W., Castiglio, V.S., 2021. Flood Hazard Mapping in Alluvial Fans with Computational Modeling. *Water Resources Management*. DOI: 10.1007/s11269-021-02794-7