

## **MODELAGEM HIDROLÓGICA: uma revisão sistemática utilizando o StArt**

Paula Roberta Souza Carvalho<sup>1</sup>  
Welson de Avelar Soares Filho<sup>2</sup>  
Leonardo Golliatt da Fonseca<sup>3</sup>  
Celso Bandeira de Melo Ribeiro<sup>4</sup>

Estudo das práticas de gestão de recursos hídricos, incluindo conservação, tratamento de água e políticas de uso sustentável.

### *Resumo*

A modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial para a gestão dos recursos hídricos, possibilitando o conhecimento da dinâmica da bacia hidrográfica em pouco tempo e de forma econômica. O presente trabalho teve como objetivo a realização de uma revisão sistemática da modelagem hidrológica com foco no modelo chuva-vazão e no software HEC-HMS utilizando a metodologia StArt - *State of the Art through Systematic Review*. Realizou-se uma seleção de artigos publicados nas plataformas *Scopus*, *Science Direct*, *Scielo* e *Web of Science*, sendo avaliado 48 artigos. A plataforma que mais retornou artigos foi a *Scopus* e a revista com mais artigos publicados foi o *Journal of Hydrology*. A maioria das bacias hidrográficas estudadas nos artigos selecionados estão localizadas nos Estados Unidos e na China. O ano de 2022 foi o que teve mais publicação nessa área, mostrando que houve um crescente interesse no assunto recentemente. Os estudos apresentaram resultados satisfatórios do HEC-HMS na simulação chuva-vazão e apontaram a importância dos dados de entrada de séries históricas completas de precipitação e vazão, mostrando como a falta desses dados acaba limitando os estudos nas etapas de calibração e validação.

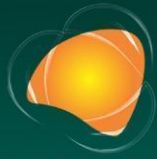
**Palavras-chave:** Recursos hídricos; Bacia hidrográfica; Modelo Chuva-Vazão; HEC-HMS; Escoamento Superficial.

<sup>1</sup>Aluna do Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, paula.carvalho@engenharia.ufjf.br.

<sup>2</sup> Aluno do Curso de Mestrado em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora – Departamento de Ciência da Computação, w.filho@ice.ufjf.br.

<sup>3</sup> Professor Doutor, Universidade Federal de Juiz de Fora – Departamento de Ciência da Computação, leonardo.goliatt@engenharia.ufjf.br.

<sup>4</sup> Professor Doutor, Universidade Federal de Juiz de Fora – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, celso.bandeira@ufjf.br.



## INTRODUÇÃO

O comportamento de uma bacia hidrográfica pode ser demonstrado por meio de um modelo que realiza a previsão e simulação de diferentes condições, permitindo que os eventos extremos sejam antecipados e possibilitando, assim, a adoção de medidas preventivas (Tucci, 2005).

Conhecer o comportamento da vazão de um rio é de extrema importância para a resolução de diversos problemas na hidrologia, principalmente, na gestão dos recursos hídricos. Há diferentes metodologias para estimar a geração e a propagação do escoamento em uma bacia hidrográfica.

Uma dessas metodologias é o estudo e a previsão de vazões por modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão que consiste na aplicação de um modelo hidrológico matemático capaz de representar os principais componentes do ciclo hidrológico, considerando desde a ocorrência da precipitação até a resposta hidrológica – referente às vazões – na bacia hidrográfica. Assim, o modelo de simulação chuva-vazão é uma ferramenta que permite verificar a resposta de precipitação da bacia hidrográfica (Guduru *et al.*, 2022; Teng *et al.*, 2017).

Diversos softwares são utilizados para estudos de escoamento em bacias, dentre eles, o *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), um software de acesso livre e gratuito, que foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos para a simulação dos processos hidrológicos das bacias dendríticas e possui diversas finalidades como, por exemplo, estudo de segurança hídrica, drenagem urbana, previsão de vazão, avaliação de impactos da urbanização e mitigação dos danos ocasionados pela inundação (USACE, 2024).

No que tange à previsão de vazão, o HEC-HMS possibilita estimar o escoamento superficial simulando a transformação chuva-vazão em diferentes pontos da rede de drenagem de bacias hidrográficas.

Assim, a simulação no HEC-HMS é feita com a combinação do modelo da bacia, o modelo meteorológico e as especificações de controle que incluem a data e hora de início, a data e hora de término e um intervalo de tempo. Os resultados da simulação podem ser visualizados através do mapa



da bacia e são gerados em forma de tabela e gráfico de série temporal.

O presente trabalho faz parte de um Projeto de Pesquisa da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) cujo título é Caracterização Hidrológica e Modelagem Hidrológica nas Principais Bacias Hidrográficas de Minas Gerais.

No Brasil, os problemas relacionados aos eventos extremos de precipitação têm causado diversos prejuízos materiais e de vidas humanas. Minas Gerais foi um dos estados mais afetados com as chuvas intensas nos últimos anos.

Sendo assim, objetiva-se com esse trabalho realizar uma revisão sistemática da modelagem hidrológica com foco, principalmente, no método chuva-vazão e no software HEC-HMS.

## METODOLOGIA

A revisão sistemática, de acordo com a UFScar (2024), é um estudo secundário utilizado para levantamento do estado da arte de estudos primários sobre determinado assunto com o objetivo de realizar uma metanálise.

O software StArt (*State of the Art through Systematic Review*) (Fabbri *et al.*, 2016) é uma ferramenta que possui uma interface gráfica simples que facilita o acesso do usuário e dá suporte nas seguintes etapas do processo de revisão sistemática, conforme apresentado na Figura 01.

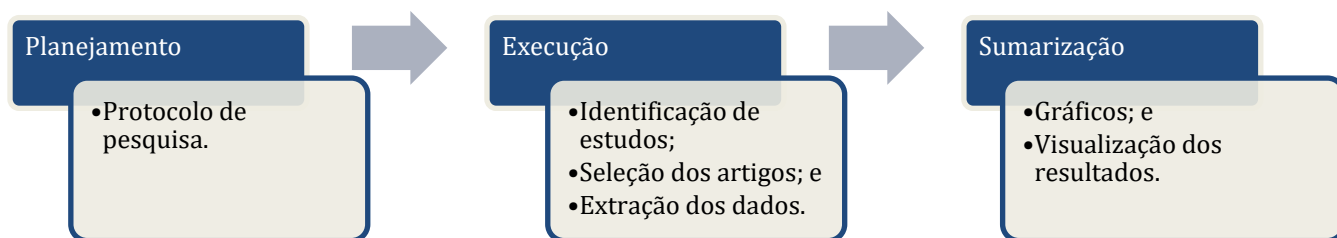


Figura 01: Etapas do processo de revisão sistemática no StArt.



## EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

Primeiramente, definiu-se o protocolo do trabalho, no qual foram inseridas as seguintes palavras-chave: *HEC-HMS*; *chuva-vazão*; *precipitation-runoff*; *precipitação*; *precipitation*; *hidrologia*; *hydrology*; *hidrológico*; *hydrologic*; *hidráulico*; *hydraulic*; *recursos hídricos*; e *water resources* em bibliotecas digitais abrangentes capazes de exportar arquivos no formato BibTEX. A busca tomou como base as seguintes plataformas *Web of Science*; *Science Direct*; *Scielo*; e *Scopus*.

Os estudos foram selecionados inicialmente aplicando-se os critérios de inclusão, sendo necessário que todos os critérios de inclusão fossem atendidos simultaneamente. Para exclusão, bastava que o estudo atingisse pelo menos um critério de exclusão. As palavras-chave definidas nas *strings* foram aplicadas às máquinas de busca nos campos de "*Title*", "*Abstract*" e "*Keyword*" de forma que aparecessem ao menos em um destes campos. Os critérios de exclusão foram: trabalhos sem DOI; score nulo; e trabalhos que não apresentam o método.

Em seguida, procedeu-se para a etapa de execução, sendo realizada a identificação dos estudos e selecionada a opção de remover automaticamente os artigos duplicados. Na pasta de não classificados, selecionou-se cada artigo e classificou-o usando os critérios de inclusão ou exclusão. Na sequência, os artigos aceitos na seleção foram analisados para a extração de dados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 02 apresenta um gráfico com os resultados referentes as fontes de pesquisa da revisão sistemática. Foram selecionados 92 artigos nas fontes de pesquisa – 37 da plataforma *Scopus*, 25 da *Science Direct*, 16 da *Scielo* e 14 da *Web of Science* – sendo extraídos 48 artigos.

Os artigos aceitos na parte de extração de dados tiveram os seus resultados sumarizados. A Figura 03 mostra a frequência dos critérios de extração dos artigos aceito, sendo abordar o modelo do tipo chuva-vazão o critério de inclusão mais frequente e que apenas um artigo foi excluído pelo critério de exclusão de não abordar o modelo chuva-vazão.

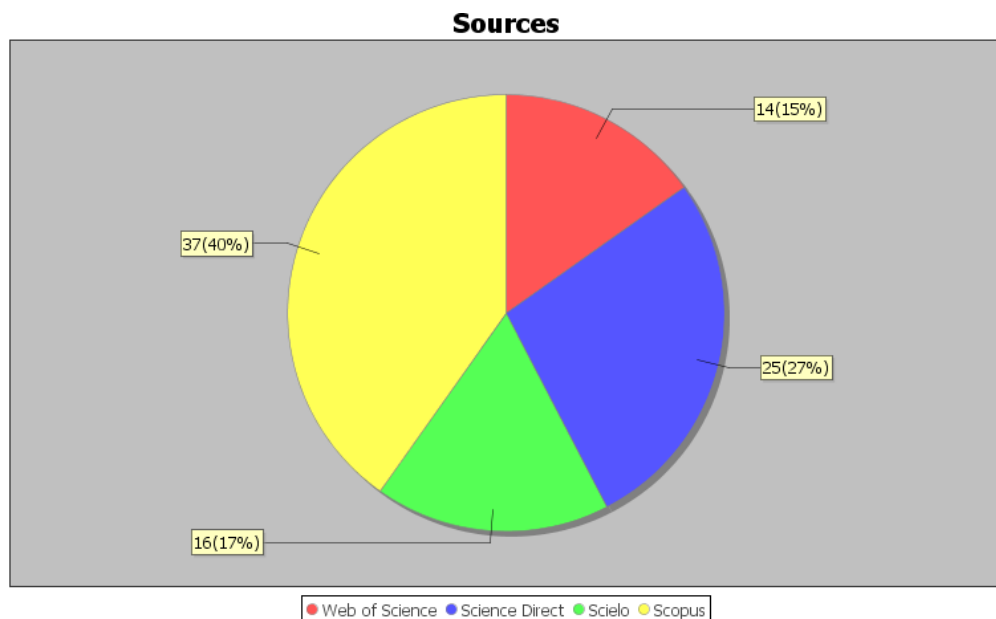
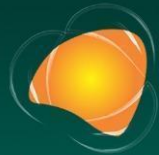


Figura 02: Fontes de pesquisa da revisão sistemática.

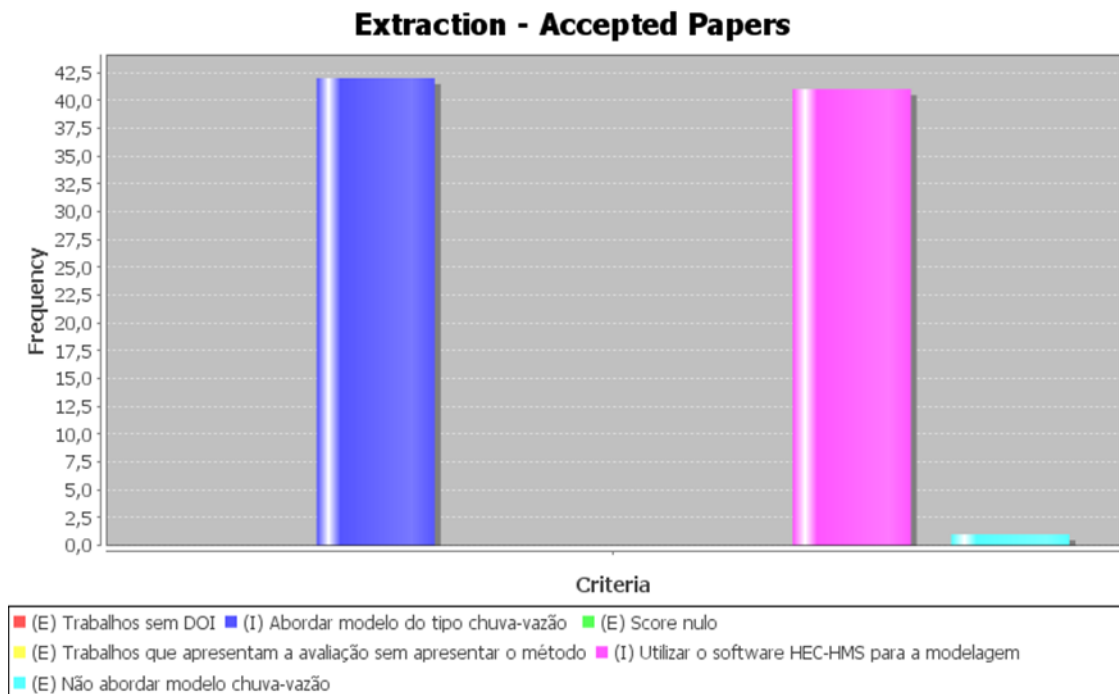


Figura 03: Gráfico dos critérios de extração da revisão sistemática.







**EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS**

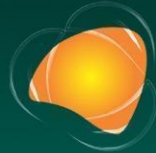
MESTA <i>ET AL.</i> (2019)	PAMUKKALE UNIVERSITY JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES- PAMUKKALEUNIVERSI TESI MUHENDISLIK BILIMLERI DERGISI	YENICEGORUCE - TURQUIA	HEC-HMS
SZYDLOWSKI <i>ET AL.</i> (2015)	14TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM - WATER MANAGEMENT AND HYDRAULIC ENGINEERING 2015	BACIA HIDROGRÁFICA DE STRZY EM GDANSK - POLÂNIA	HEC-HMS
SENGUPTA <i>ET AL.</i> (2018)	FRESHWATER BIOLOGY	REGIÃO SUL DA CALIFÓRNIA – ESTADOS UNIDOS	HEC-HMS
MARKUS <i>ET AL.</i> (2007)	JOURNAL OF HYDROLOGY	NORTHEASTERN ILLINOIS – ESTADOS UNIDOS	HEC-HMS
BEILICCI, ERIKA; BEILICCI, ROBERT (2015)	WATER RESOURCES, FOREST, MARINE AND OCEAN ECOSYSTEMS, SGEM 2015, VOL I	-	HEC-HMS; DUFLOW; WEPP (WATER EROSION PREDICTION PROJECT E GEOLOGICAL SURVEY)
MOURAD, KHALDOON A.; NORDIN, LINA; ANDERSSON-SKÅLD, YVONN (2022)	CLIMATE RISK MANAGEMENT	SUÉCIA	HEC-HMS
GUMINDOGA <i>ET AL.</i> (2017)	PHYSICS AND CHEMISTRY OF THE EARTH, PARTS A/B/C	MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS DE UPPER MANYAME - ZIMBABUÉ	HEC-HMS
ZHANG <i>ET AL.</i> (2022)	ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE	BACIA HIDROGRÁFICA AFETADA PELO TERREMOTO DE WENCHUAN - CHINA	HEC-HMS
CASTRO, CYNDI V. ; MAIDMENT, DAVID R. (2020)	ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE	-	HEC-HMS
LIN, <i>ET AL.</i> (2022)	ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE	BACIA HIDROGRÁFICA DE CHUANCHANG - CHINA	HEC-HMS
ZHANG, <i>ET AL.</i> (2021)	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	BACIA HIDROGRÁFICA AFETADA PELO TERREMOTO DE WENCHUAN - CHINA	HEC-HMS





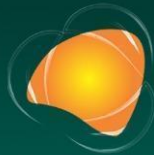
**EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS**

WIJAYARATHNE, DAYAL BUDDIKA; COULIBALY, PAULIN (2020)	JOURNAL OF HYDROLOGY: REGIONAL STUDIES	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO WATERFORD - CANADÁ	TRÊS MODELOS CONCEITUAIS AGRUPADOS, UM MODELO SEMI- DISTRIBUÍDO (HEC-HMS) E UM MODELO BASEADO EM FÍSICA TOTALMENTE DISTRIBUÍDO (WATFLOOD: UNIVERSITY OF WATERLOO FLOOD FORECASTING SYSTEM)
EDAMO, <i>ET AL.</i> (2022)	WATER CYCLE	BACIA HIDROGRÁFICA DE BILATE - ETIÓPIA	HEC-HMS
FERREIRA, <i>ET AL.</i> (2021)	ECOLOGICAL INFORMATICS	BACIA HIDROGRÁFICA NO SUDESTE DO BRASIL	HEC-HMS E SWAT
LIU, <i>ET AL.</i> (2022)	INTERNATIONAL JOURNAL OF DISASTER RISK REDUCTION	TAITOU CATCHMENT - CHINA	HEC-HMS
GUDURU, <i>ET AL.</i> (2023)	JOURNAL OF AFRICAN EARTH SCIENCES	BACIA DO RIO MEKI – ETIÓPIA	HEC-HMS
TOUFIK, <i>ET AL.</i> (2022)	MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS	WADI TAMDMADT - BNI DRAR - EGITO	HEC-HMS
ABDELAL, <i>ET AL.</i> (2021)	JOURNAL OF HYDROLOGY	ANTIGO SISTEMA NABATEUS DE CONTROLE DE ENCHENTES EM PETRA - JORDÂNIA	HEC-HMS
ABBAS, M.; ATANGANA NJOCK, P.G.; WANG, Y. (2022)	APPLIED SCIENCES (SWITZERLAND)	MULTAN – PAQUISTÃO	HEC-HMS
LI, Z. AND CAO, Y.; DUAN, Y. ; JIANG, Z. AND SUN, F. (2022)	WATER (SWITZERLAND)	BACIAS HIDROGRÁFICAS NAS MONTANHAS CHANGBAI - CHINA	HEC-HMS
DARJI, K; PATEL, D.; PRAKASH, I. (2022)	LECTURE NOTES IN CIVIL ENGINEERING	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MACHHU - ÍNDIA	HEC-HMS E SWAT
BOJLOVA, E.K. (2020)	INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC GEOCONFERENCE SURVEYING GEOLOGY AND MINING ECOLOGY MANAGEMENT, SGEM	BACIA DO RIO DANÚBIO - BULGÁRIA.	HEC-HMS



**EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS**

GHUMMAN, <i>ET AL.</i> (2020)	ARABIAN JOURNAL OF GEOSCIENCES	BACIA DO RIO INDUS - PAQUISTÃO	HEC-HMS
SONG, <i>ET AL.</i> (2019)	WATER (SWITZERLAND)	PEQUENO RIACHO URBANO NA COREIA DO SUL	HEC-HMS
AZMAT, <i>ET AL.</i> (2018)	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	BACIA DO RIO JHELUM - PAQUISTÃO	HEC-HMS E MODELO DE ESCOAMENTO DE NEVE (SRM)
NYAUPANE, <i>ET AL.</i> (2018)	WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2018	IRWIN CREEK - CAROLINA DO NORTE	HEC-HMS
JUAN, A.; FANG, Z.; BEDIENT, P.B. (2017)	JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING	BACIA HIDROGRÁFICA DE OYSTER CREEK – TEXAS	HEC-HMS
CANDELA, L.; TAMOH, K.; OLIVARES, G.; GÓMEZ, M. (2016)	WATER (SWITZERLAND)	BACIA FLUVIÀ - ESPANHA	HEC-HMS
YAGHOUBI, M.; MASSAH BAVANI, A.R. (2014)	JOURNAL OF THE EARTH AND SPACE PHYSICS	BACIA SEMIÁRIDA DO RIO AZAM HARAT – IRÃ	HEC-HMS, HBV (HYDROLOGISKA BYRANS VATTENAVDELNING) E IHACRES
ZHANG, <i>ET AL.</i> (2013)	HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	BACIA HIDROGRÁFICA DE CLEAR CREEK EM IOWA – ESTADOS UNIDOS	HEC-HMS
TAHMASBINEJAD, <i>ET AL.</i> (2012)	JOURNAL OF APPLIED SCIENCES	RIO KARUN - IRÃ	HEC-HMS
MOTEVALLI, <i>ET AL.</i> (2012)	AUSTRALIAN JOURNAL OF BASIC AND APPLIED SCIENCES	BACIA HIDROGRÁFICA DO KAN - IRÃ	HEC-HMS
BIGGS, E.M.; ATKINSON, P.M. (2011)	HYDROLOGICAL PROCESSES	BACIA HIDROGRÁFICA SEVERN UPLANDS – REINO UNIDO	HEC-HMS
LIM, Y.H.; HASSELL, J.; TENG, W. (2010)	MODELLING FOR ENVIRONMENT'S SAKE: PROCEEDINGS OF THE 5TH BIENNIAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL MODELLING AND SOFTWARE SOCIETY, IEMSS 2010	LAGO DEVILS – ESTADOS UNIDOS	HEC-HMS



## EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

MILLER, <i>ET AL.</i> (2008)	WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2008: AHUPUA'A - PROCEEDINGS OF THE WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2008	-	HEC-HMS
GARCIA, <i>ET AL.</i> (2008)	JOURNAL OF HYDROLOGY	BACIAS DO NORTE DA ESPANHA	HEC-HMS
MARKUS, <i>ET AL.</i> (2007)	JOURNAL OF HYDROLOGY	ILLINOIS – ESTADOS UNIDOS	HEC-HMS
JENÍČEK, M. (2006)	GEOGRAFIE-SBORNÍK CGS	BACIAS HIDROGRÁFICAS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE	HEC-HMS, MIKE-SHE, SACRAMENTO (SAC-SMA), NASIM E HBV
KNEBL, <i>ET AL.</i> (2005)	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT	BACIA DO RIO SAN ANTONIO – ESTADOS UNIDOS	HEC-HMS
ANDERSON, <i>ET AL.</i> (2002)	JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CALAVERAS – NORTE DA CALIFÓRNIA – ESTADOS UNIDOS	HEC-HMS

Analisando os artigos extraídos, pode-se concluir que houve um crescimento de estudos de modelagem hidrológica utilizando o modelo chuva-vazão nos últimos 10 anos, sendo 2022 o ano que mais teve publicações nessa área.

A plataforma que mais retornou artigos foi a *Scopus*, seguida pela *Science Direct* e *Web of Science*. Por sua vez, as revistas que mais tiveram artigos selecionados foram: *Journal of Hydrology*, *Water* e *Environmental Modelling & Software*.

Ademais, pode-se observar que a modelagem hidrológica utilizando o HEC-HMS vem sendo aplicada em vários lugares do mundo com destaque para os Estados Unidos, China, Irã e Paquistão. Somente um estudo dentre os artigos extraídos teve como área de estudo alguma bacia hidrográfica brasileira, apontando a carência de estudos de previsão de vazão utilizando o HEC-HMS no Brasil.



Os artigos selecionados demonstraram a importância da compreensão do comportamento hidrológico – processo chuva-vazão – na gestão dos recursos hídricos (Guduru *et al.*, 2022; Joshi *et al.*, 2019). Além disso, mostraram a sensibilidade de alguns parâmetros de entrada nas etapas de calibração e validação e os coeficientes estatísticos mais utilizados para avaliar os resultados.

Esses estudos confirmaram a capacidade do modelo HEC-HMS na previsão de vazões e que as previsões do modelo são melhores para anos que possuem dados de precipitação mais completos (Li *et al.*, 2022, Sengupta *et al.*, 2018).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho realizou uma revisão sistemática da modelagem hidrológica, principalmente, do modelo chuva-vazão e do software HEC-HMS utilizando a ferramenta STArt. Nesse sentido, pode-se concluir que a modelagem hidrológica é essencial na gestão de recursos hídricos, possibilitando a previsão de eventos extremos e a adoção de medidas preventivas.

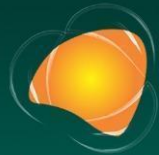
Diversos autores, dentre os artigos avaliados, relataram que a disponibilidade de dados de chuva e vazão é uma grande dificuldade encontrada na simulação hidrológica, mostrando a importância de investimentos nessa área.

Ademais, foi possível observar a escassez de trabalhos de modelagem hidrológica nas bacias hidrográficas brasileiras e a necessidade desse tipo de estudo, tendo em vista os desastres relacionados a inundações que aconteceram recentemente no Brasil.

De maneira geral, os artigos apontaram resultados satisfatórios e a importância de se conhecer o comportamento hidrológico para desenvolver estratégias que auxiliem nos desafios causados pelas mudanças climáticas.

## AGRADECIMENTOS

**Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais**



(FAPEMIG) e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) pelo apoio – processo APQ-01226-22.

## REFERÊNCIAS

FABBRI, S., Octaviano, F., Silva, C., Di THOMMAZO, A., HERNANDES, E., and BELGAMO, A. (2016). Improvements in the Start tool to better support the systematic review process. In Proc. of the 20th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE'16), **Anais [...]** Limerick, Ireland, June 2016.

GUDURU, J.U.; JILO, N.B.; RABBA, Z.A.; NAMARA, W.G. **Rainfall-runoff modeling using HEC-HMS model for Meki River watershed, rift valley basin, Ethiopia.** J. Afr. Earth Sci. 2022, 197, 104743.

JOSHI, N.; BISTA, A.; POKHREL, I.; KALRA, A.; AHMAD, S. Rainfall-Runoff Simulation in Cache River Basin, Illinois, Using HEC-HMS. In World Environmental and Water Resources Congress 2019; American Society of Civil Engineers: **Anais [...]** Pittsburgh, PA, USA, 2019; pp. 348–360.

LI, Z.; CAO, Y.; DUAN, Y.; JIANG, Z.; SUN, F. **Simulation and Prediction of the Impact of Climate Change Scenarios on Runoff of Typical Watersheds in Changbai Mountains, China.** Water 2022, 14, 792.

SENGUPTA, A., ADAMS, S. K., BLEDSOE, B. P., STEIN, E. D., MCCUNE, K. S., & MAZOR, R. D. (2018). **Tools for managing hydrologic alteration on a regional scale: Estimating changes in flow characteristics at ungauged sites.** Freshwater Biology, 63(8), 769–785. <https://doi.org/10.1111/fwb.13074>.

TENG, F., HUANG, W., CAI, Y., ZHENG, C., ZOU, S., 2017. **Application of hydrological model PRMS to simulate daily rainfall runoff in Zamask-Yingluoxia subbasin of the Heihe River Basin.** Water (Switzerland) 9, 2. <https://doi.org/10.3390/w9100769>.

TUCCI, C. E. M (2005). **Modelos hidrológicos.** 2. ed. Porto Alegre: ABRH: Editora da UFRGS.

UFScar - DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, LABORATÓRIO DE PESQUISA EM ENGENHARIA DE SOFTWARE. **StArt.** Disponível em: <https://www.lapes.ufscar.br/resources/tools-1/start-1>. Acesso em: 10 set. 2024.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE (2024). **Manual HEC-HMS.** Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Acesso em: 15 ago. 2024.