

Factores determinantes de los modelos matemáticos para el diseño, simulación y control de redes de abastecimiento de agua potable

Determinants of mathematical models for the design, simulation and control of drinking water supply systems

Reyder Alexander Lambruschini Espinoza¹ 

¹Universidad Nacional Hermilio Valdizán, Huánuco, Perú

RESUMEN

Se tiene como objetivo describir los factores determinantes de los modelos matemáticos para el diseño, simulación y control de redes de abastecimiento de agua potable en zonas urbanas. Se basó en una revisión sistemática mediante la búsqueda en Scopus y Google Académico a través de PRISMA-P. Los criterios de inclusión fueron artículos científicos publicado entre 2017 a 2022, documentos relacionados con el tema y con resultados de análisis de sistemas de tuberías o aplicación de cálculos en diversos procesos de los sistemas hidráulicos. Se encontró 474 artículos, pero solo 25 fueron considerados para el análisis. Los resultados más relevantes fueron: la mayor cantidad de artículos fue el 2019 con 28% (7), 10,40% (10) están dirigidos hacia la simulación en las redes de abastecimiento de agua potable, 8,32% (8) hacia el diseño y 7,28% (7) abordan los aspectos para el control. Se concluye que existen diversos modelos matemáticos que son funcionales en el diseño y simulación de redes de abastecimiento de agua potable, entre los cuales se encuentran los predictivos, que pueden obtenerse mediante simulación y, por lo tanto, presentarse como una opción viable en el desarrollo y posterior gestión de sistemas hidráulicos a nivel de rendimiento y detección de fallos.

Palabras clave: Abastecimiento de agua; agua potable; tratamiento del agua; control de calidad; diseño; agua del suelo

ABSTRACT

The objective is to describe the determining factors of mathematical models for the design, simulation and control of drinking water supply networks in urban areas. It was based on a systematic review by searching Scopus and Google Scholar through PRISMA-P. The inclusion criteria were scientific articles published between 2017 to 2022, documents related to the topic and with results of analysis of piping systems or application of calculations in various processes of hydraulic systems. 474 articles were found, but only 25 were considered for the analysis. The most relevant results were: the largest number of articles was in 2019 with 28% (7), 10.40% (10) are directed towards simulation in drinking water supply networks, 8.32% (8) towards the design and 7.28% (7) address the control aspects. It is concluded that there are various mathematical models that are functional in the design and simulation of drinking water supply networks, among which are the predictive ones, which can be obtained through simulation and, therefore, presented as a viable option in the development and subsequent management of hydraulic systems at the level of performance and fault detection.

Keywords: Water distribution; drinking water; water treatment; quality control; design; soil water

Cómo citar/How to cite:

Lambruschini Espinoza, R. A. (2024). Factores determinantes de los modelos matemáticos para el diseño, simulación y control de redes de abastecimiento de agua potable. *Revista científica en ciencias sociales*, 6, e601116. [10.53732/rccsociales/e601116](https://doi.org/10.53732/rccsociales/e601116)

Editor Responsable:

Chap Kau Kwan Chung 
Email: wendy.kwan@upacifico.edu.py

Revisores:

Myrna Ruiz 
Email: myrna.ruizdiaz@upacifico.edu.py

Hernán Sutti

Email: her_su@hotmail.com

Fecha de recepción: 10/07/2024.

Fecha de revisión: 18/07/2024.

Fecha de aceptación: 18/08/2024.

Autor correspondiente:

Reyder Alexander Lambruschini Espinoza
E-mail: rlambruschini@unheval.edu.pe

INTRODUCCIÓN

Una red de abastecimiento de agua potable es un sistema estructurado que facilita el traslado del fluido desde el punto de captación hasta el punto de consumo, en condiciones de salubridad seguras y en las cantidades específicas requeridas (Wang *et al.*, 2021). En este sentido, existen cuatro aspectos fundamentales que deben ser observados en este tipo de redes, tales como la captación y almacenamiento de agua bruta, tratamiento del agua, almacenamiento del agua tratada y distribución por medio de conducciones (Quintana *et al.*, 2020).

En el diseño de las redes para el suministro de agua potable con ramificaciones desde el origen a distintos destinos, existe una preocupación relacionada con el riesgo potencial de que ante el fallo o rotura de alguna de las tuberías que la conforman, se interrumpa el servicio a todos los usuarios que estén atendidos desde las tuberías aguas abajo de la rotura, principalmente mientras se realizan las reparaciones necesarias (Mazumder *et al.*, 2018). Por esta razón, los ingenieros especialistas en el diseño y operación de estas redes cuentan con sistemas y métodos predictivos que les permiten estimar pérdidas en tuberías mediante software específicos para el diseño, simulación y control (Teichmann *et al.*, 2020).

En este orden de ideas, al llevar a cabo simulaciones y pruebas mediante modelos matemáticos en el diseño de redes de agua potable con redes malladas, se tiene la ventaja de que, ante la posible rotura de alguna de sus tuberías, se afecte a la menor cantidad de usuarios, sobre todo al establecerse rutas alternas al flujo a través de estructuras conformadas por estaciones de bombeo, tuberías principales, secundarias y terciarias, tanques de almacenamiento intermediarios, válvulas, dispositivos para medición y derivaciones domiciliarias que conforman la red (Daniel *et al.*, 2021).

En un contexto específico, para la concepción de este tipo de redes se lleva a cabo un prediseño a escala donde se planifica y proyecta la operatividad y la seguridad de las redes (Pérez-Vidal *et al.*, 2020). En esta etapa se considera la planificación de las redes y nodos, el tipo de material de las tuberías, la estimación de los valores de presiones, flujo, velocidades de diseño y todos los cálculos que hacen prever un comportamiento seguro y confiable de la red (Mala-Jetmarova *et al.*, 2018). Es aquí donde la aplicación de las herramientas tecnológicas sustentadas en la modelación matemática se vuelve parte fundamental del diseño y operatividad de la red, sobre todo en las etapas de diseño, simulación y control (Benavides *et al.*, 2018).

En el ámbito social, las redes de abastecimiento de agua potable en zonas urbanas suelen ser muy complejas, debido a que se deben estructurar mediante un entramado de tuberías de gran envergadura, por lo cual, la diversificación de las fuentes de suministro puede mejorar el servicio. Sin embargo, en algunos casos se han generado consecuencias de alto impacto por no tener precisados los flujos que realmente discurren por las tuberías, y lo que es más grave, por desconocer el destino final del agua inyectada (Beker & Kansal, 2024). En consecuencia, una de las acciones a llevar a cabo para mejorar la gestión de procesos o sistemas es la aplicación de los modelos matemáticos (Escobar *et al.*, 2022).

En el caso puntual de la red para el suministro de agua potable, uno de los recursos técnicos para elevar su eficiencia hídrica es la sectorización, que consiste básicamente en subdividir la red en varios segmentos de menor tamaño, cuyas entradas y salidas de agua estén controladas (Bianchotti *et al.*, 2021). La sectorización está fuertemente ligada al uso de modelo matemático de la red y resulta muy comprometedor llevarla a cabo sin la ayuda de un modelo de simulación de las condiciones reales en que quedará el abastecimiento, tras limitar los puntos de entrada del agua a cada sector (Lizcano *et al.*, 2019). En este aspecto, los administradores de la red podrán contar con la información precisa sobre los valores de presión en puntos críticos y velocidades de circulación por las tuberías de entrada o por los ramales terminales (Rokstad & Van Laarhoven, 2022).

A partir de lo anterior, se evidencia que se puede contar con factores determinantes para el diseño y simulación de redes de abastecimiento de agua potable, lo que demuestra una gran capacidad de soporte en la resolución de fallas y averías en el sistema hidráulico. Por tal motivo, el presente estudio tiene como objetivo describir los modelos matemáticos para el diseño, simulación y control de redes de abastecimiento de agua potable en zonas urbanas, además de ahondar en su rol para el registro de fallas y alteraciones en los sistemas. Al llevar a cabo este estudio, se busca aportar información detallada sobre la importancia de la modelación matemática en la sectorización de las redes de abastecimiento de agua potable, así como evidenciar modelos específicos y sus respectivas aplicaciones. Desde esta perspectiva, se plantea como punto de partida la formulación de la problemática mediante la siguiente interrogante: ¿cuáles son los factores determinantes de los modelos matemáticos para el diseño, simulación y control de redes de abastecimiento de agua potable? Esta pregunta sirve como guía para el desarrollo de la investigación.

METODOLOGÍA

Este artículo se basó en una revisión sistemática de la literatura científica acerca de los modelos matemáticos para el diseño, simulación y control de redes de abastecimiento de agua potable en zonas urbanas. Se abordó el estudio bajo un enfoque cualitativo de carácter exploratorio y descriptivo. Para el desarrollo de la revisión, se aplicó una ecuación de búsqueda en las bases de datos Scopus y Google Académico, empleando el operador booleano “AND”, y se optó por aplicar la metodología PRISMA-P (Preferred Reporting Itymes for Systematic Review and Meta-Analysis Protocols), que facilita la ubicación y selección de las investigaciones académicas sobre un tema concreto, lo que da lugar a una evaluación bibliográfica exhaustiva, directa y comprensible, bajo criterios de inclusión y exclusión (Reina & La Serna, 2020) en el 2023. En la tabla 1 se indican los criterios de inclusión y exclusión.

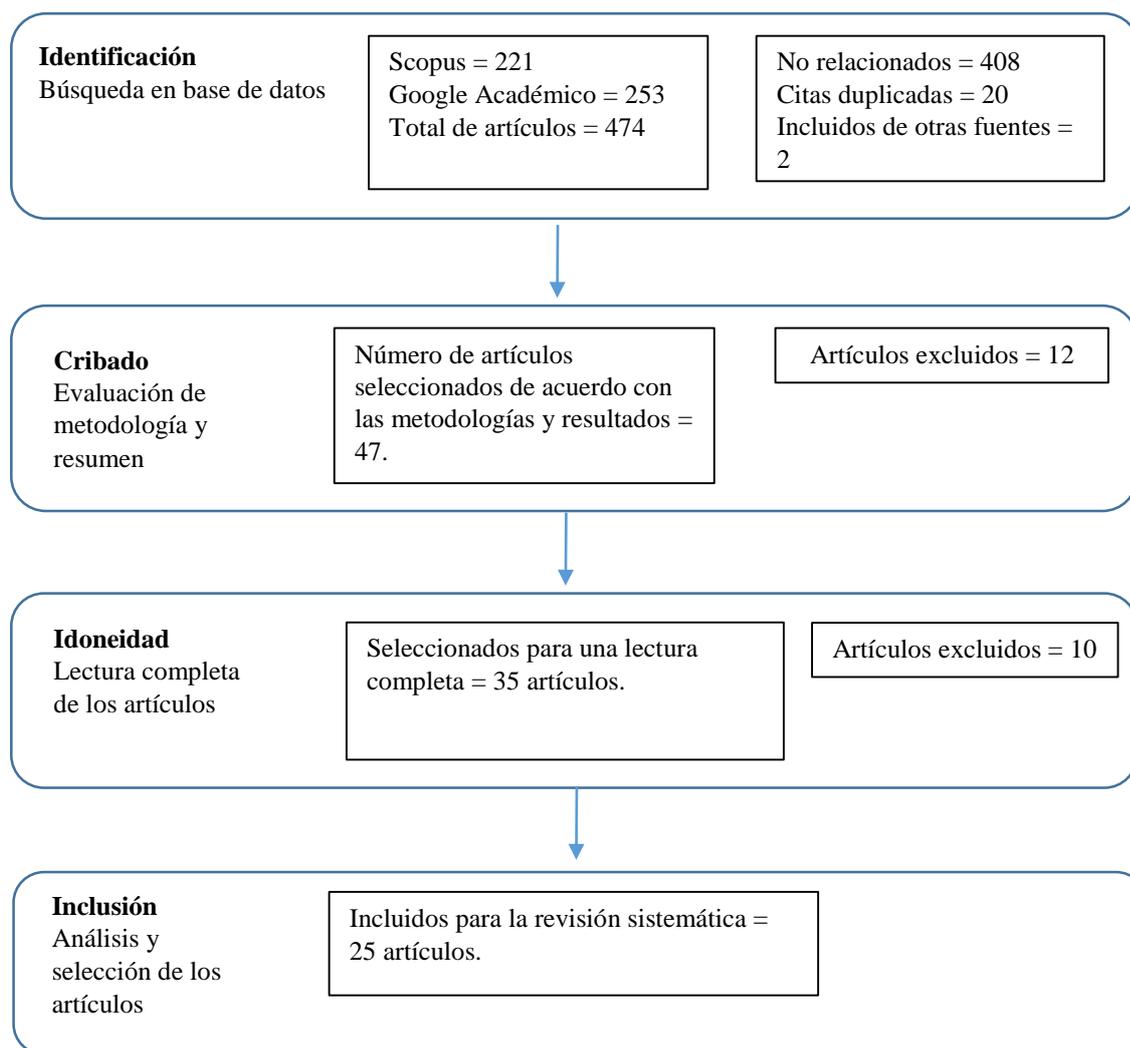
Tabla 1. *Criterios de inclusión y exclusión*

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
1.- Artículos científicos publicados en revistas indexadas.	1.- Otros documentos distintos a artículos científicos indexados.
2.- Período de publicación 2017 a 2022, con el fin de obtener información nueva e innovadora sobre el tema.	2.- Publicaciones anteriores a 2017.
3.- Documentos sobre modelos matemáticos para el diseño, simulación y control de redes de abastecimiento de agua potable en zonas urbanas.	3.- Documentos que no traten sobre los modelos matemáticos para el diseño, simulación y control de redes de abastecimiento de agua potable en zonas urbanas.
4.- Documentos con resultados de análisis de sistemas de tuberías o aplicación de cálculos en diversos procesos de los sistemas hidráulicos.	4.- Documentos que no traten los sistemas de tuberías o aplicación de cálculos en diversos procesos de los sistemas hidráulicos.

Fuente: Elaboración propia (2023)

En la figura 1 se presenta el flujograma del proceso de búsqueda, alcanzado a un total de 25 documentos analizado.

Figura 1. *Flujograma del proceso de búsqueda bajo lineamientos basados en la metodología PRISMA*



Fuente: Elaboración propia (2023)

RESULTADOS

La búsqueda generó un total de 474 artículos, que luego de los procesos de cribado, idoneidad e inclusión se redujo a 25 artículos: el 44 % (11) pertenece a la base Scopus, y el resto, es decir, el 56 % (14) se extrajo de Google Académico (ver tabla 2). Se aprecia, además, que el año en el que se publicó la mayor cantidad de artículos fue el 2019 (7), que representa el 28 % de todos los documentos, seguido por el año 2018 (5) con el 20 %; luego los años 2021 y 2022 con 4 artículos cada uno, que significa un 16 % en cada uno; después el año 2020 con un 12 % (3).

Tabla 2. *Artículos seleccionados por año*

Base de datos	Año de publicación						Total	Porcentaje
	2017	2018	2019	2020	2021	2022		
Scopus	0	1	5	2	2	1	11	44.00%
Google Académico	2	4	2	1	2	3	14	56.00%
Total	2	5	7	3	4	4	25	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2023)

Otro resultado importante que se desprende de esta búsqueda son las características y aplicaciones detectadas en cada documento en relación con los modelos matemáticos. En este sentido, de los 25 artículos seleccionados, 10,40% (10) están dirigidos hacia la simulación en las redes de abastecimiento de agua potable, 8,32% (8) hacia el diseño y 7,28% (7) abordan los aspectos para el control.

En la tabla 3 se pueden apreciar diversos elementos, como año de publicación, autor o autores y los hallazgos.



Tabla 3. Artículos seleccionados para el análisis de resultados (n=25)

	Año	Autor	Modelo	Aplicación	Hallazgo
1	2017	Morelos y Ramírez	Epanet	Diseño	Para el diseño de la geometría de la RDAP se emplearon diversos softwares como el ArcGis, Google earth, Microsoft Excel, Autocad, EpaCad y para la simulación el Epanet, en la cual los datos de entrada definen las características de las tuberías, los nodos, el control de las bombas y válvulas en la red de distribución.
2	2017	Hechavarría	Método del Gradiente	Simulación	Se exponen diversos criterios a tener en cuenta durante el diseño de una red de abastecimiento, los cuales deben considerarse en el modelo matemático. Se aplicó el método del Gradiente, que se conforma por un sistema de ecuaciones lineales expresadas en forma matricial, que tiene como principal ventaja evitar el ensamblado de las matrices, por lo que disminuye la cantidad de procesos a realizar en comparación con otros métodos.
3	2018	Chuquín et al.	Modelo matemático hidráulico	Simulación	Los principales parámetros hidráulicos como la presión y la velocidad generan las condiciones bajo las cuales opera el sistema con un intervalo de confianza del 95 %. La simulación se efectuó con el apoyo del <i>software</i> Epanet.
4	2018	Adedoja et al.	Epanet	Simulación	Existen herramientas orientadas principalmente a tareas de modelado y simulación del comportamiento hidráulico en redes de distribución de agua. Entre los modelos para estudiar y mejorar la calidad del agua se nombran el modelo Epanet, Epanet MSX, Porteau, Piccolo, Synergi Water, WaterGEMS y H2ONET.
5	2018	Serrano et al.	Modelación Epanet y Matlab. Modelación de pulsos rectangulares de Poisson (PRP)	Control	Se aplicó la modelación matemática tanto determinística como probabilística. El modelo determinístico consistió en la obtención de la Curva de Variación Horaria de Demanda (CVHD). La CVHD fue obtenida de los consumos y presiones de la red principal, y de puntos seleccionados estratégicamente. Para el procesamiento de datos de la curva de variación se emplearon los programas Epanet y Matlab.
6	2018	Jiménez-Banzo et al.	Redes inteligentes de distribución o Smart Water Networks.	Diseño	El algoritmo de predicción de consumos basado en patrones permitió detectar fugas de forma temprana con un error relativo promedio por debajo del 10 %, independientemente de la naturaleza del sector hidrométrico. De igual forma, se ha desarrollado una plataforma de Business Intelligence (BI), que facilitó la visualización de información del SIG, información meteorológica, estado de la red, entre otros.
7	2018	Martínez-Bahena et al.	Solucionador hidráulico Epanet (HES)	Diseño	Se propuso un algoritmo genético para solucionar el problema de deficiencia en la distribución de agua potable en una red hidráulica, con la incorporación de nuevos elementos a la red FRM. Se utilizó el solucionador hidráulico Epanet (HES) con un modelo de optimización para minimizar el costo total de los cambios en la red y el algoritmo genético para valorar el modelo de optimización.
8	2019	Caballero Ravagnani y	Ecuación de Hazen-Williams	Diseño	Los problemas vinculados a los bucles en redes de tuberías presurizadas tienen como resolución alternativa a la ecuación de Hazen-Williams, que presenta la minimización del coeficiente de rugosidad para reducir las pérdidas de presión en las tuberías de agua potable.

9	2019	Wannapop et al.	Modelo Epanet	Simulación	El <i>software</i> de distribución de agua es una herramienta que puede ayudar a planificar el suministro de agua, ya que el cálculo Epanet se vuelve más preciso en dicha tarea.
10	2019	Ramli et al.	Modelo Epanet	Simulación	El <i>software</i> de cálculo Epanet realiza un seguimiento del flujo de agua a través de cada tubería, la presión en cada nodo, el nivel de agua de cada depósito, así como la concentración de una especie química en toda la red durante una simulación.
11	2019	Abu-Mahfouz et al.	Modelo hidráulico dinámico. Algoritmo de detección de fugas	Control	Se propuso un algoritmo de detección de fugas en segundo plano que, entre otras cosas, permite la localización de posibles nodos críticos o tuberías con mayor flujo de fuga en la red donde se podría realizar el control de la presión. Más aún, nuevos controladores (algoritmos) que realizan gestión de la presión ajustando con precisión la presión, utilizando una válvula de control de presión.
12	2019	Yuan et al.	Instrumentación y Automatización (ICA)	Control	El sistema de aguas urbanas implementa la instrumentación, el control y la automatización (ICA) en las instalaciones de tratamiento de aguas, las redes de distribución de agua, entre otras.
13	2019	Barton et al.	Modelos estocásticos	Simulación	Los modelos estadísticos probabilísticos o estocásticos se emplean hoy en día con mayor frecuencia para predecir la ocurrencia de una falla. Se propone este modelo para reducir las fugas y mejorar los niveles de servicio de las empresas que suministran agua potable por tuberías.
14	2019	González y Bejarano	Modelo Hidráulico	Simulación	La modelización hidráulica representa un avance importante, ya que la información básica proporcionada por los programas de simulación por computadora es más precisa, lo que conduce en particular a una mejor calidad de los resultados. Los datos de SIG proporcionan rápidamente mucha información sobre los sistemas y las áreas que ocupan.
15	2020	Dawood et al.	Modelo Hídrico. Modelo de IA	Control	El modelado de infraestructura hídrica a través de las técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático se ha incrementado debido al elevado índice de rotura y de contaminación del agua en los sistemas de tubería.
16	2020	Doghri et al.	Modos de control CM, CF, TBC, RC y el IC	Control	El rendimiento de cuatro modos de control de la presión (CM) para sistemas de distribución de agua —control fijo (FC), control basado en el tiempo (TBC), control reactivo (RC) y control predictivo ideal (IC)—, se compara en términos de reducción de la tasa de fugas y de la intensidad de la fluctuación de presión.
17	2020	Hernández et al.	Modelos (CPBM). Modelos matemáticos basados en series temporales (Arma, Arima, Sarima)	Simulación	La distribución de agua se hace por medio de controladores predictivos basados en modelos (CPBM). La aplicación de modelos matemáticos basados en series temporales (Arma, Arima, Sarima) pueden ser utilizados para predecir la demanda de agua en las redes urbanas de tuberías.
18	2021	Amiri-Ardakani y Najafzadeh.	Modelos MARS, GEP y de IA.	Control	Los resultados estadísticos indicaron que los modelos MARS y GEP tenían comparativamente al mismo nivel de precisión. De igual forma, las ecuaciones explícitas de los modelos de inteligencia artificial (IA) eran satisfactoriamente comparables con las obtenidas mediante la revisión

					bibliográfica en función de condiciones: factores físicos, operativos y medioambientales, y complejidad de los modelos de IA.	
19	2021	Momeni y Piratla	Modelación Epanet	Hidráulica	Simulación	El uso de la interfaz de programación Matlab se complementa con el instrumento de modelización hidráulica Epanet para poder predecir los factores de rugosidad de las tuberías mediante datos sintéticos y de monitorización que se obtuvieron en simulaciones de sistemas de tuberías.
20	2021	Sánchez y Mendoza	SIG para la optimización del tiempo de diseño de redes de distribución		Diseño	Se lograron los datos de entrada como son las elevaciones, áreas aferentes y demanda base en los puntos de conexión del sistema, además de realizar correcciones al trazado por medio de un análisis topológico mediante la aplicación de las herramientas del <i>software</i> ArcGIS. Así se obtienen resultados de una manera más fácil, rápida y confiable para llevarlos a un <i>software</i> de simulación o modelación hidráulica, en este caso específico Epanet, garantizando un diseño óptimo y de calidad.
21	2021	Gutiérrez et al.	Algoritmo Seudogenético (PGA) Modelo Epanet		Simulación	Se considera un modelo de optimización para solucionar un problema del sistema de bombeo de agua potable, a través de la implementación de un algoritmo pseudogenético (PGA).
22	2022	Gormaz et al.	Expresión matemática extendida de Bernoulli con el término de fricción de Darcy-Weisbach.		Diseño	El bombeo es fundamental en el modelado de redes de agua mediante técnicas de optimización, debido a los términos no lineales de la expresión matemática extendida de Bernoulli con el término de fricción de Darcy-Weisbach.
23	2022	Ladino et al.	Red neuronal		Control	Se aprecia la red neuronal como modelo matemático representativo de la IA, que cuenta con un alto potencial para detectar fugas en tuberías de agua potable.
24	2022	Sarisen et al.	Modelo Hidráulico		Diseño	El modelado hidráulico es una herramienta efectiva para el proceso de planificación, diseño, rehabilitación y operación de la distribución de agua. sistemas. Actualmente, no hay <i>software</i> de computadora disponible para modelar el suministro de agua intermitente (IWS).
25	2022	Mabrok et al.	Modelo Epanet		Diseño	El análisis de la red de agua mostró que parcialmente la ocupación de las personas puede perjudicar la calidad del agua, por lo que se incluyeron diferentes escenarios en el diseño. De los resultados del estudio se concluyó que el modelo basado en Epanet tiene la capacidad de resaltar problemas relacionados con la calidad del agua —edad del agua, en este caso— en las redes de distribución de agua.

Fuente: Elaboración propia (2023)

DISCUSIÓN

En este punto, es importante resaltar el trabajo de Gormaz *et al.* (2022), quienes modelaron el bombeo del agua en una red de distribución de agua potable, aplicando la función de optimización en un sistema no lineal fundamentado en las restricciones no lineales de la expresión matemática extendida de Bernoulli, con el término de fricción de Darcy-Weisbach, que permite desarrollar el modelo de múltiples objetivos y tres funciones específicas. Una de estas tiene la finalidad de permitir la optimización de la ubicación de la planta, mientras que la segunda optimiza la opción de reciclaje del agua. En cuanto a la tercera, abarca el consumo del agua, el costo económico y el potencial del calentamiento global. Las estrategias de simplificación se compararon centrándose en la solución, el error y el tiempo de ejecución. Los mejores resultados se obtuvieron con una estrategia de dos etapas para abordar grandes problemas multiobjetivo del MINLP. Esta estrategia se aplica a un modelo con tres funciones: entrada de agua dulce, potencial de calentamiento global y costo total, a fin de ilustrar el desempeño de la simplificación en una red de agua a escala urbana.

Por su parte, Caballero & Ravagnani (2019) propusieron la ecuación de Hazen-Williams como una alternativa de resolución de problemas de bucles en tuberías presurizadas. La ecuación se plantea de la siguiente forma:

$$\Delta P = FLCD \quad (1)$$

En esta ecuación, ΔP es la caída de presión que se da entre dos nodos, F es el caudal volumétrico, L es la longitud de la tubería, D es el diámetro de la tubería, C se conoce como el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams y α , β y γ son constantes que varían en función del sistema de unidades utilizado. En contraposición, estos dos autores destacan que el empleo de esta ecuación resulta complicado de efectuar debido a la naturaleza de los bucles y al comportamiento no lineal de la misma ecuación. En consecuencia, todas las ecuaciones generadas en este estudio resultaron lineales, excluyendo dos, que tienen un comportamiento exponencial bien delimitado, lo que genera las dificultades presentes en el coeficiente de rugosidad y el uso de las matemáticas determinísticas en las técnicas de programación, con la consecución de soluciones óptimas globales. Además, es importante señalar que es posible resolver ecuaciones hidráulicas simultáneamente en la optimización modelo; estas estrategias permiten el uso de solucionador de optimización global BARON en GAMS.

Por su parte, Sarisen *et al.* (2022) resaltan que el modelo hidráulico representa una forma alternativa de gran utilidad para el proceso de planificación, diseño, rehabilitación y operación de la distribución de agua de flujo intermitente (IWS), aunque acotan que, actualmente, no se cuenta con un modelo matemático totalmente confiable para este fin. En este sentido, es necesario establecer procedimientos y sistemas para una recopilación más sistemática de datos de amplio alcance sobre sistemas IWS reales, de modo que los modelos hidráulicos de estos sistemas puedan construirse y calibrarse con mayor precisión. La información sobre la topología del sistema IWS y los componentes físicos existentes es fundamental para su modelado hidráulico, pero a menudo no está disponible. También suele faltar información crítica para el funcionamiento, mantenimiento y rendimiento de estos sistemas. La recopilación de todos estos datos conducirá a mejores modelos con predicciones más precisas y una visión más clara de cuán equitativa es en realidad la distribución del agua.

Morelos & Ramírez (2017) puntualizaron que, una vez levantada la información sobre las necesidades y requerimientos de la RDAP en cuanto a tubería, bombas, tanques elevados y del

consumo de agua, se puede recurrir a la aplicación de recursos tecnológicos sustentados en la modelación matemática, por ejemplo, programas de dominio público muy conocidos como Epanet, Redcad.8K, Branch, Loop, Hidruval, HidrasSoftware, Netis, Giswater, y otros por suscripción o adquisición comercial, entre los que se encuentran WaterCAD, WaterGems, Scared, Aquis, Kypipe, H2O map. PIPE2014, Hidroflo3, entre otros. En lo particular, se utilizó AutoCad a Epanet utilizando el programa Epcad; el programa Epanet se utilizó para el análisis y diseño, y el programa ArcGis, para el cálculo de la demanda, lotificación, ubicación topográfica y altimetría.

De igual manera, se destaca el aporte de Jiménez-Banzo et al. (2018), quienes desarrollaron tres algoritmos en pro del establecimiento de una red inteligente de distribución de agua potable y la detección precoz de fugas: un algoritmo de predicción de consumos, luego un algoritmo de caudal mínimo nocturno y finalmente el algoritmo de balance hidráulico. El primero identifica posibles fugas de agua usando una metodología predictiva fundamentada en un modelo de programación lineal múltiple; el segundo, a partir de la comparativa diaria del caudal mínimo nocturno real y esperado, lleva a cabo la identificación de fugas potenciales; el último algoritmo identifica patrones de fugas a partir de las tendencias y replicabilidades de series cronológicas que comparan el caudal de entrada al sector con el sumatorio de los caudales registrados por todos los contadores domiciliarios. Finalmente, se logró estructurar una plataforma de Business Intelligence (BI), lo que permitió confirmar la posibilidad de gestionar la red de distribución de forma proactiva e, incluso, preventiva, lo que abre las puertas para convertir una red convencional de abastecimiento en una red inteligente de abastecimiento.

Un aspecto significativo lo lograron Mabrok et al. (2022), quienes hicieron uso de uno de los paquetes de simulación de WDN más utilizados con fines de investigación y desarrollo, el *software* Epanet. Mediante este programa, se logra la representación de las redes de distribución de agua potable con una serie de tuberías, nodos, bombas, válvulas y tanques de almacenamiento; asimismo, se logra el rastreo del fluido (agua en cada tubería), la presión en cada nodo, la altura del agua en cada tanque y la potencial concentración de una sustancia. Este *software* permite, además, la estimación de pérdidas de carga por fricción empleando diversas formulaciones, por ejemplo, modelando la velocidad del líquido a lo largo de la estructura. Se destaca, además, que se presentaron varios escenarios posibles donde se simularon las condiciones esperadas de la red, lo que facilitó el diseño de esta. Considerando los hallazgos de Martínez-Bahena et al. (2018), se detectó la necesidad de aplicar el *software* Epanet como solucionador de problemas; de esta manera, se encontró una nueva forma de rediseñar los sistemas hidráulicos añadiendo el menor número posible de elementos necesarios a la red de agua. Por tanto, el algoritmo genético puede considerarse como una herramienta potencial para rediseñar redes existentes que no funcionan correctamente. En conclusión, se puede decir que el algoritmo diseñado contribuye a encontrar una solución para corregir el desempeño deficiente de la red. Como complemento, Sánchez y Mendoza (2021), en el diseño de la red de abastecimiento, se apoyaron en los fundamentos de un Sistema de Información Geográfico (SIG) en el que partieron de una simulación de la red incorporando al *software* Epanet, los datos de entrada seccionados en las condiciones de las tuberías y puntos de conexiones; para el caso de las tuberías, los datos de entrada son la rugosidad del material, diámetro y longitud; en los puntos de conexión, son las elevaciones y la demanda base. Esta simulación se llevó a cabo en dos momentos: uno sin eventualidad de incendios y otro con contingencia de incendio. Mediante la simulación de la red se tabularon los diámetros finales de diseño para un periodo extendido de 24 horas, en un rango entre 75 mm y 150 mm, los cuales son mayores al mínimo

establecido por la resolución. Se logró comprobar, mediante este modelo matemático de simulación, que la implementación de los SIG en el diseño de redes de distribución optimiza los tiempos, lo que permite obtener datos con mayor precisión y exactitud conforme a las dificultades presentadas al momento de la recogida.

En relación con la simulación matemática, Chuquín et al. (2018) señalaron —de forma complementaria— un estudio estadístico de varianza, comparación de medias y varias pruebas de rango para validar la viabilidad del modelo. Posteriormente, desarrollaron el modelo de manera que los principales parámetros hidráulicos, como la presión y la velocidad, reprodujeran de forma significativa las condiciones bajo las cuales opera el sistema con un intervalo de confianza del 95 %. La simulación se efectuó con el apoyo del *software* Epanet, con el fin de evaluar el comportamiento hidráulico del sistema tanto en estado dinámico como estacionario.

Por otro lado, Gutiérrez et al. (2021) consideraron un modelo de optimización para solucionar un problema del sistema de bombeo de agua potable a través de la implementación de un algoritmo pseudogenético (PGA). La evaluación del comportamiento hidráulico de la red resultante es analizada utilizando Epanet, según las especificaciones propuestas.

Por consiguiente, el *software* Epanet se muestra como un recurso adecuado para simular y optimizar las alturas de los nodos de la red de distribución, puesto que los cálculos que ofrece son precisos para este tipo de registros; además, es de gran utilidad para planificar el suministro óptimo del agua. El *software* Epanet permite estimar de manera específica aspectos importantes asociados con el flujo de agua, tales como el estado de los nodos, el dinamismo del agua dentro de las tuberías y el seguimiento de los cambios mediante las simulaciones del sistema de distribución (Adedoja et al., 2018; Ramli et al., 2019; Wannapop et al., 2019).

Esto se complementa con los resultados del estudio de Hernández et al. (2020), puesto que, así como los sistemas ya mencionados, la distribución de agua se puede llevar a cabo de manera óptima con la aplicación de Modelos Basados en Controladores Predictivos (CPBM) y en los modelos matemáticos basado en series temporales como Arma, Arima o Sarima, los cuales se vislumbran como alternativas para lograr la optimización de funciones objetivos. En este aspecto, mediante los referidos modelos, se pueden obtener datos predictivos para la demanda de agua en diferentes sectores de las redes de tuberías.

Desde la perspectiva de Barton et al. (2019), la aplicación de modelos estadísticos probabilísticos o estocásticos permite predecir la ocurrencia de una falla y, por ende, establecer acciones pertinentes para reducir las fugas y mejorar los niveles de servicio en las empresas que suministran agua potable por tuberías. Esto será posible en la medida en que los modeladores y los diseñadores expertos en sistemas hídricos logren una comunicación efectiva que permita establecer las variables críticas, las disponibilidades, los requerimientos y las funciones objetivos, que conlleven a la simulación, validación y solución efectiva del modelo.

En concordancia, González & Bejarano (2019) sostienen que las redes de distribución deben modelarse para obtener resultados más precisos; con ello, la adquisición de datos la red de distribución mejorará notablemente. En tal sentido, se toma en cuenta el territorio natural y el estado en el que se encuentran las zonas urbanas para desarrollar la modelación hídrica mediante los Sistemas de Identificación Geográfica (SIG). Esto se percibe como un importante avance, debido a que la información básica proporcionada por los programas de simulación por computadora es mucho más confiable, lo que conduce a una mejor calidad de los resultados.

Para Momeni & Piratla (2021), esto se complementa con el uso de las interfaces de programación denominados Matlab, que, junto con el instrumento de modelización para la

simulación Epanet, ayudan a predecir los factores de rugosidad de las tuberías, así como la adquisición de información de forma flexible, debido al monitoreo de casos que se realiza por medio de simulaciones de sistemas de tuberías. En cuanto al aporte de Hechavarría (2017), este autor señala que, para el dimensionamiento hidráulico de la red, se recurre regularmente a modelos de régimen permanente y se direcciona hacia una operatividad en condiciones críticas de servicio, por lo cual se desarrolla la simulación hidráulica con el valor del caudal en el instante del día en que la demanda sea de mayor intensidad. En este contexto, cada ruta o rama de la red se caracteriza por variables críticas; en el caso de una línea que corresponde a una tubería, se registran cuatro variables hidráulicas específicas: velocidad (v), caudal (Q), diámetro D y pérdida de carga (h_f), para lo cual se manejan dos ecuaciones básicas que permiten la convergencia de estas en cada línea: la ecuación de continuidad y la ecuación de pérdidas. De igual manera, introduce el uso del método del Gradiente, asumiendo que cada tubería posee N nodos y NF nodos de altura dada. La relación entre la pérdida de carga para una tubería que va del nodo i al nodo j , y el caudal de paso Q_{ij} , se describe con la siguiente ecuación:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ^{n(ij)} + mQ(ij)$$

Donde:

H_i es la altura piezométrica en el nodo

h : pérdida de carga

r : coeficiente de resistencia

Q : caudal

n : exponente del caudal

m : coeficiente de pérdidas menores

El valor del coeficiente de resistencia depende de la fórmula utilizada para el cálculo de las pérdidas. Para las bombas, la pérdida puede representarse mediante una fórmula potencial del tipo:

$$h_{ij} = -\omega^2(h_0 - r(Q_{ij}\omega)^n)$$

Donde:

h_0 : altura a caudal nulo

W : velocidad relativa de giro

Considerando la función de control, Doghri et al. (2020) señalan que existen cuatro modos de control de la presión fundamentados en ecuaciones matemáticas. El primero es el control maestro CM, que se aplica para el sistema de distribución de agua. El segundo es el control fijo (FC), basado en el tiempo (TBC). El tercero es el control reactivo (RC), y el último, denominado control predictivo ideal (IC), se utiliza para llevar a cabo la comparación en términos de reducción de la tasa de fugas y de la intensidad de la fluctuación de presión.

En el mismo contexto, Yuan et al. (2019) aseguran que en los diversos procesos que poseen los sistemas de aguas urbanas se aplican la instrumentación, el control y la automatización (ICA), principalmente, para las instalaciones de tratamiento de agua, las redes de distribución y suministros, entre otras.

Dawood et al. (2020) enfatizaron en el uso de modelos matemáticos basados en la IA y el aprendizaje autónomo para analizar la tendencia del deterioro en las redes de tuberías y proceder con la minimización de fallos y fugas. Con esto se pretende contribuir con la detección

de averías de manera temprana y elevar la eficiencia del sistema de distribución de agua potable.

De la misma forma, para Amiri & Najafzadeh (2021) los resultados estadísticos permiten demostrar que los modelos MARS y GEP tenían relativamente el mismo nivel de precisión. De manera similar, las ecuaciones explícitas para el modelo de inteligencia artificial fueron significativamente comparables con las ecuaciones identificadas a través de una revisión de la literatura basada en los factores físicos, operativos y ambientales, y en la complejidad del modelo de IA. Por su parte, Wéber & Hos (2020) señalan el uso de sistemas artificiales de distribución de aguas, por ejemplo, las redes conformadas por tuberías, sensores y nodos, que son estructuras funcionales que manejan y emiten la información para ejecutar cálculos estadísticos y la generación de datos comparativos, con el objetivo de elevar la sensibilidad y confiabilidad de los procesos.

Ladino et al. (2022) exponen los principios de las redes neuronales como modelos matemáticos asociados a la inteligencia artificial (IA). Con estos, describen la composición del sistema de agua potable, cuya relación de variables se encuentra configurada mediante ecuaciones no lineales, las cuales otorgan un nivel de complejidad mayor con respecto a los problemas de fugas y su medición de los sistemas de acueductos.

Por su parte Hao et al. (2013) hacen mención del método Simplex. Este se emplea comúnmente para solucionar problemas mediante la programación lineal (LP). De igual forma, incluyen el método escalonado (STEM) propuesto de Benayoun, que se usa para solventar problemas de optimización multiobjetivo a través de un sistema interactivo para el procedimiento entre quien toma las decisiones y el modelo.

En conclusión, se precisó que los modelos matemáticos asociados a la etapa de diseño van desde la expresión matemática extendida de Bernoulli con el término de fricción de Darcy-Weisbach, la ecuación de Hazen-Williams, la simulación mediante el *software* Epanet y el modelo Hidráulico, hasta las redes inteligentes de distribución o Smart Water Networks. En la simulación destacan el algoritmo seudogenético (PGA), el modelo Epanet, modelos (CPBM), modelos matemáticos basados en series temporales (Arma, Arima, Sarima), el modelo hidráulico, el modelo del Gradiente y el SIG para la optimización del tiempo de diseño de redes de distribución, mientras que para el control se distinguen la modelación Epanet y Matlab, la modelación de pulsos rectangulares de Poisson (PRP), la Instrumentación, Control y Automatización (ICA), los modos de control CM, CF, TBC, RC y el IC, los modelos MARS, GEP y de IA, los algoritmos de detección de fugas y las redes neuronales.

Se destaca el abordaje del sistema de redes neuronales como modelos matemáticos representativos de la IA para el control de variables. Esta funge como un recurso cuantitativo de gran utilidad para localizar, cuantificar y establecer el nivel de presión de una posible fuga para un sistema de tubería principal sin ramificaciones, a partir del consolidado de datos de entrenamiento calculados con base en el algoritmo. También se toma en cuenta la relación del modelo de infraestructura hídrica y su relación con la IA.

De igual forma, se determinó el uso de la modelación matemática para un sistema hidráulico. Así, se analizó el funcionamiento de la red de abastecimiento de agua potable y se resaltó la aplicación de la varianza, comparación de medias y varias pruebas de rango sobre las variables presión hidráulica y la velocidad del fluido.

Se detectó el uso de ecuaciones lineales usadas en los modelos matemáticos como son la expresión matemática extendida de Bernoulli con el término de fricción de Darcy-Weisbach y la ecuación de Hazen-Williams, para minimizar el coeficiente de rugosidad en las tuberías.

Esta abarca resoluciones de problemas con respecto a la velocidad del agua en las tuberías; no obstante, resulta complicado aplicarla debido a su carácter no lineal. De esta forma, los modelos predictivos se presentan como una opción viable en la elaboración y posterior gestión para los sistemas hidráulicos a nivel de rendimiento y detección de fallas, debido al registro de estas por medio de simulaciones que reproducen las condiciones bajo las cuales opera el sistema.

El *software* de simulación Epanet permite la adquisición de datos de forma rápida y sin pérdidas materiales ni riesgo de un posible deterioro de las tuberías. Sin embargo, al ser comparado con otros modelos, resaltan Epanet MSX, Synergy Water y H2ONET, debido a que, entre otras cosas, abarcan diferentes plataformas, desde AutoCAD hasta ArcGIS y la web, que resaltan por su autonomía e independencia. Finalmente, los modelos GBT, en comparación con el GLM, GAM, RF y modelos mixtos lineales generalizados (GLMM) en tuberías divididas por una red de carreteras, tienen una mejor funcionalidad, puesto que arrojan la puntuación Briers más baja, que es una medida más precisa para predicciones probabilísticas de la presión.

Todo lo antes expuesto permite puntualizar que, en la actualidad, se dispone de diversos modelos matemáticos que son funcionales en el diseño y simulación de redes de abastecimiento de agua potable, entre los cuales destacan los predictivos, que se pueden concebir mediante simulación y, por tanto, se vislumbran como una opción viable en el desarrollo y posterior gestión de redes de abastecimiento, a nivel de rendimiento y detección de fallos.

Declaración de los autores: El autor aprueba la versión final del artículo.

Declaración de conflicto de interés: El autor declara no tener conflicto de interés.

Financiamiento: Este trabajo ha sido autofinanciado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Mahfouz, A., Hamam, Y., Page, P., Adedeji, K., Anele, A. & Todini, E. (2019). Real-Time Dynamic Hydraulic Model of Water Distribution Networks, *Water*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030470>
- Adedoja, O. S., Hamam, Y., Khalaf, B. & Sadiku, R. (2018). Towards Development of an Optimization Model to Identify Contamination Source in a Water Distribution Network. *Water*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/w10050579>
- Amiri-Ardakani, Y. & Najafzadeh, M. (2021). Pipe Break Rate Assessment While Considering Physical and Operational Factors: A Methodology based on Global Positioning System and Data-Driven Techniques. *Water Resources Management*, 35, 3703–3720. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02911-6>
- Barton, N., Farrewel, T., Hallett, S. & Aclant, T. (2019). Improving pipe failure predictions: Factors affecting pipe failure in drinking water networks. *Water*, 164(1). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114926>
- Beker, B. A. & Kansal, M. L. (2024). Complexities of the urban drinking water systems in Ethiopia and possible interventions for sustainability. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 4629–4659. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02901-7>
- Benavides, J., Ochoa, J. y Riofrio, G. (2018). Modelado matemático vía simulación para determinar la calidad de agua del sistema de abastecimiento de la Universidad Nacional de Loja. *Matemática. FCNM-ESPOL Journal*, 16(1), 51-56. <http://www.revistas.espol.edu.ec/index.php/matematica/article/view/427>
- Bianchotti, J., Denardi, M., Castro-Gama, M. & Puccini, G. (2021). Sectorization for Water Distribution Systems with Multiple Sources: A Performance Indices Comparison, *Water*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/w13020131>
- Caballero, J. & Ravagnani, M. (2019). Water distribution networks optimization considering unknown flow directions and pipe diameters. *Computers & Chemical Engineering*, 127(4), 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.05.017>

- Chuquín, N., Chuquín, D., Niño, G., Chuquín, J. & Soriano, J. (2018). Modelación matemática del sistema hidráulico de la red de agua potable de la ciudad de Riobamba. *Perfiles*, 19(1), 37-49. http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/9382/1/per_n19_v1_05.pdf
- Daniel, D., Prawira, J., Al Djono, T., Subandriyo, S., Rezagama, A. & Purwanto, A. (2021). A System Dynamics Model of the Community-Based Rural Drinking Water Supply Program (PAMSIMAS) in Indonesia, *Water*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/w13040507>
- Dawood, T., Elwakil, E., Mayol, H. & Gárate, J. (2020). Artificial intelligence for the modeling of water pipes deterioration mechanisms. *Automation in Construction*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103398>
- Doghri, M., Duchesne, S., Poulin, A. & Villeneuve, J. (2020). Comparative Study of Pressure Control Modes Impact on Water Distribution System Performance. *Water Resources Management*, 34(1), 231-244. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02436-z>
- Escobar, M., Buñay, J., Pozo, E. & Aquino, S. (2022). Modelación matemática y simulación computacional para el diseño de un mecanismo agitador de pintura. *Polo del Conocimiento*, 7(7), 1945-1970. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9043012>
- González, E. y Bejarano, E. (2019). Sistemas de información geográfica y modelado hidráulico de redes de abastecimiento de agua potable: estudios de caso en la provincia de Guanacaste, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(63), 247-272. <https://doi.org/10.15359/rgac.63-2.11>
- Gormaz, D., Quiñones, C., Arenas, F. y Díaz, F. (2022). Modeling Frictional Head Loss in the Redesign of City-Scale Water Networks through Multiobjective Optimization: Strategies to Deal with Nonlinear Terms. *Industrial y Engineering Chemistry Research*, 61(25), 8918-8931. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00225>
- Gutiérrez, J., Mora, D., Iglesias, P., Martínez, F. & Salgueiro, Y. (2021). Pumping Station Design in Water Distribution Networks Considering the Optimal Flow Distribution between Sources and Capital and Operating Costs. *Water*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/w13213098>
- Hechavarría, J. (2017). Formulación matemática del diseño de redes de abastecimiento. *Revista Científica ECOCIENCIA*, 4(3), 113-134. <https://doi.org/10.21855/ecociencia.43.35>
- Hernández, Y., Rivas, R. y Feliu, V. (2020). Control automático de la distribución de agua en sistemas de riego: revisión y retos. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 41(2), 80-97. <http://ref.scielo.org/6p7gjj>
- Hao, C., Chen, S., & Yoshimura, T. (2013). *Network Simplex Method Based Multiple Voltage Scheduling in Power-Efficient High-Level Synthesis*. In Design Automation Conference (ASP-DAC), 18th Asia and South Pacific, 237-242. <https://doi.org/10.1109/ASPDAC.2013.6509602>
- Jiménez-Banzo, A., Campos, A., Bevide, A. y Malfeito, J. (2018). El Proyecto Smartwater4Europe y su aplicación en la ciudad de Burgos: descubriendo el potencial de las redes inteligentes de distribución de agua. *Ingeniería Civil*, 190, 25-30. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6561735>
- Ladino, E., García, C. y García, M. (2022). Estimación de fugas en tuberías a presión para sistemas de agua potable mediante redes neuronales artificiales y Epanet. *Revista Científica*, 43(1), 2-19. <https://doi.org/10.14483/23448350.18275>
- Lizcano, J., Bolaños, S. y Medina, R. (2019). Metamodelo del sistema de regulación de la demanda de agua potable en horizontes de largo plazo. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 361-374. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000300361>
- Mabrok, M., Saad, A., Ahmed, T. & Alsayab, H. (2022). Modeling and simulations of Water Network Distribution to Assess Water Quality: Kuwait as case study. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), 11859-11877. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.05.038>
- Mala-Jetmarova, H., Sultanova, N. & Savic, D. (2018). Lost in Optimisation of Water Distribution Systems? A Literature Review of System Design. *Water*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/w10030307>

- Martínez-Bahena, B., Cruz-Chávez, M., Ávila-Melgar, E., Cruz-Rosales, M. & Rivera-Lopez, R. (2018). Using a Genetic Algorithm with a Mathematical Programming Solver to Optimize a Real Water Distribution System, *Water*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/w10101318>
- Mazumder, R., Salman, A., Li, Y. & Yu, X. (2018). Performance Evaluation of Water Distribution Systems and Asset Management. *Journal of Infrastructure Systems*, 24(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000426](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000426)
- Momeni, A. & Piratla, K. (2021). A Proof-of-Concept Study for Hydraulic Model-Based Leakage Detection in Water Pipelines Using Pressure Monitoring Data. *Frontiers in Water* 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.648622>
- Morelos, R. y Ramírez, J. (2017). Modelación hidráulica de la red de distribución de agua potable en una ciudad Mexicana EPANET. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 4(2), 120-132. <http://www.reibci.org/publicados/2017/abr/2200106.pdf>
- Pérez-Vidal, A., Escobar-Rivera, J. & Torres-Lozada, P. (2020). Development and implementation of a water-safety plan for drinking-water supply system of Cali, Colombia. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.113422>
- Quintana, G., Molinos-Senante, M. & Chamorro, A. (2020). Resilience of critical infrastructure to natural hazards: A review focused on drinking water systems. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101575>
- Ramli, I., Jayanti, D. & Hidayat, A. (2019). Analysis of domestic and smallholder farm water demand in Kaajhu Village Baitussalam Sub-district Aceh Besar District, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 355. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/355/1/012084>
- Reina, D. M. y La Serna, N. B. (2020). Revisión sistemática sobre el estado del arte de las metodologías para M-learning. *Revista Espacios*, 41(06). <https://www.revistaespacios.com/a20v41n06/a20v41n06p11.pdf>
- Rokstad, M. & Van Laarhoven, K. (2022). Technical note: Graph-theory-based heuristics to aid in the implementation of optimized drinking water network sectorization. *Drinking Water Engineering and Science*, 15. <https://doi.org/10.5194/dwes-15-1-2022>
- Sánchez, D. y Mendoza, M. (2021). SIG aplicado a la optimización del tiempo de diseño en redes de distribución de agua potable. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(1), 68-80. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382021000100068
- Sarisen, D.; Koukoravas, V., Farmani, R., Kapelan, Z. & Memon, F. (2022). Review of hydraulic modelling approaches for intermittent water supply systems. *AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 71(12), 1291-1310. <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.028>
- Serrano, R., Ruíz, A. y Tandazo, R. (2019). Enfoque estocástico y determinístico para modelar la red de agua potable: sector Zamora Huayco, Loja, Ecuador. *Revista Tzhoeoen*, 10(3), 495-508. <https://doi.org/10.26495/rtzh1810.328135>
- Teichmann, M., Dagmar, K., Endel, S. & Szeligova, N. (2020). Modeling and Optimization of the Drinking Water Supply Network—A System Case Study from the Czech Republic, *Sustainability*, 12(23). <https://doi.org/10.3390/su12239984>
- Wang, F., Xu, J., Liu, L., Yin, G., Wang, J. & Yan, J. (2021). Optimal design and operation of hybrid renewable energy system for drinking water treatment, *Energy*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119673>
- Wannapop, R., Jearsiripongkul, T. & Jiamjiroch, K. (2019). Effect of nodal elevation revision in water distribution system: a case study of metropolitan waterworks authority, Thailand. *International Journal of Geomate*, 16(53), 184-189. <https://doi.org/10.21660/2019.53.67183>
- Yuan, Z., Olsson, G., Cardell, R., Van Schagen, K., Marchi, A., Deletic, A., Urich, C., Rauch, W., Liu, Y. & Jiang, G. (2019). Sweating the assets-The role of instrumentation, control and automation in urban water systems. *Water Research*, 155, 381-402. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.034>