

Optimización del tiempo de bombeo en la estación Bosconia mediante un modelo de algoritmos genéticos en cuasi-tiempo real en el sistema de distribución de agua potable del Acueducto

Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP.

Jefe Daniel Patiño Pedraza

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Recursos Hídricos y Saneamiento

Ambiental

Director

Andrés Almeyda

MSc. Recursos Hídricos y saneamiento Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Bucaramanga

2026

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
1. Introducción .....	11
2. Objetivos.....	14
2.1 Objetivo General.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3. Marco de Referencia .....	15
3.1 Marco conceptual.....	15
3.1.1 Sistema de distribución de agua potable.....	15
3.1.2 Estaciones y costos de Bombeo .....	16
3.1.3 Demanda de agua e incertidumbre en su estimación .....	17
3.1.4 Modelización hidráulica.....	18
3.1.5 Algoritmo de redes neuronales .....	20
3.1.6 Optimización mediante algoritmos genéticos.....	22
3.2 Marco institucional .....	24
3.3 Estado del arte.....	25
4. Caso de estudio .....	33
5. Metodología .....	34
5.1. Fase 1: Desarrollo del modelo de hidráulico calibrado con conexión en tiempo real del sistema matriz de distribución del amb S.A. E.S.P.....	36
5.1.1. Recolección de información .....	36
5.1.2. Modelo hidráulico preliminar calibrado .....	37
5.1.3. Integración de datos en tiempo real .....	42

5.1.4. Modelo predictivo de consumo y producción.....	43
5.2. Fase 2: Optimización del tiempo de bombeo de la estación Bosconia por medio de algoritmos genéticos en la operación de la red matriz de distribución. ....	49
5.2.1 Selección de variables de control.....	50
5.2.2 Restricciones operativas.....	53
5.2.3 Configuración del algoritmo genético .....	55
5.2.4 Ejecución iterativa y acoplamiento temporal.....	57
5.2.5 Prueba de sensibilidad y ajuste de parámetros.....	59
5.3. Fase 3: Evaluación de los costos de bombeo actuales y optimizados para un día de operación .....	60
5.3.1. Recopilación de datos de referencia .....	61
5.3.2. Estimación de los costos de bombeo .....	61
5.3.3. Comparación de escenarios.....	62
6. Resultados de discusión .....	63
6.1 Desarrollo del modelo hidráulico calibrado con conexión en tiempo real .....	63
6.1.1. Evaluación del modelo hidráulico calibrado.....	63
6.1.2. Integración de datos en tiempo real .....	67
6.1.3 Modelo predictivo de consumo y producción.....	69
6.2 Optimización del tiempo de bombeo mediante algoritmos genéticos .....	74
6.2.1 Desempeño del algoritmo genético.....	74
6.2.2 Comportamiento operativo de válvulas y bombas.....	76
6.2.3 Comportamiento hidráulico y resiliencia.....	79
6.2.4 Evaluación de sensibilidad de parámetros .....	82

6.2.5 Implicaciones operativas y aplicabilidad .....	87
6.3 Evaluación de los costos de bombeo actuales y optimizados .....	90
7. Conclusiones .....	93
8. Referencias Bibliográfica.....	97

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Tabla 1. Resumen de estudios sobre optimización de sistemas de bombeo incluidos en el estado del arte su metodología y principales contribuciones y limitantes. Nota. Elaboración propia. .....	29
Tabla 2. Muestra de datos históricos de caudal en el sistema SCADA. Nota. Elaboración propia .....	44
Tabla 3. Penalizaciones por violación hidráulica aplicadas en la función de aptitud. Nota. Elaboración propia. ....	54
Tabla 4. Resultados de calibración del modelo hidráulico – Indicadores estadísticos. Nota. Elaboración propia. ....	64
Tabla 5. Resultados estadísticos de desempeño de los modelos LSTM de predicción de caudal. Nota. Elaboración propia. ....	70
Tabla 6. Comparación entre escenarios operativo actual y optimizado – Estación Bosconia. Nota. Elaboración propia. ....	91

**Lista de Figuras**

Figura 1. Esquema general del sistema de distribución del amb S.A. ESP. Nota. Catastro amb S.A. E.S.P.....	33
Figura 2 Flujograma de las fases metodológicas. La fase 1 está demarcada por un rectángulo punteado de color rojo, la fase 2 está delimitada por un rectángulo punteado de color azul, y la fase 3 está delimitada por un rectángulo punteado de color amarillo. Nota. Elaboración propia. ....	35
Figura 3. Muestra de información recolectada del catastro del amb S.A. E.S.P . Nota. Tomado del catastro del amb S.A. E.S.P. ....	37
Figura 4. Configuración de los sistemas de control de nivel tipo “efecto flotador” en los tanques del modelo hidráulico en EPANET 2.0. Nota. Elaboración propia. ....	39
Figura 5. Modelo hidráulico de la red matriz de distribución del amb SA ESP en Epanet. Nota. Elaboración propia. ....	42
Figura 6. Modelo de integración de datos en tiempo real al modelo hidráulico. Nota. Elaboración propia. ....	43
Figura 7. Gráfico Q-Q e histograma para datos de caudal de una zona de consumo. Nota. Elaboración propia. ....	45
Figura 8. Análisis de autocorrelación parcial (PACF) para series horarias de caudal.....	47
Figura 9. Arquitectura del modelo de red neuronal para predicción de caudales. Nota. Elaboración propia. ....	48
Figura 10. Mapa de válvulas seleccionadas y zonas de abastecimiento en el sistema de distribución del acueducto metropolitano de Bucaramanga. Nota. Catastro del amb S.A. E.S.P. ....	51

Figura 11. Curva de operación para las válvulas reguladoras de caudal seleccionadas. Nota. Elaboración propia. ....	52
Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo de optimización. Nota. Elaboración propia.....	59
Figura 13. Comparación entre caudales medidos y simulados en puntos de calibración y de verificación cualitativa. Nota. Elaboración propia. ....	65
Figura 14. Comparativo de comportamiento de tanques del modelo y los niveles reales del sistema SCADA del amb S.A. E.S.P. para el día de análisis, Nota. Elaboración propia. ....	66
Figura 15. Comparación entre caudal medido y predicho por el modelo LSTM – Tanque Morro Alto. Nota. Elaboración propia. ....	71
Figura 16 .Distribución de los errores de predicción del modelo LSTM – Tanque Morro Alto. Nota. Elaboración propia. ....	72
Figura 17. Importancia relativa de las variables de entrada en la predicción de caudales. Nota. Elaboración propia. ....	73
Figura 18. Evolución del valor de la función de aptitud del algoritmo genético. Nota. Elaboración propia. ....	75
Figura 19. Configuración horaria óptima de bombas. Nota. Elaboración propia.....	77
Figura 20. Grado de apertura horario de válvulas de control durante la operación optimizada. Nota. Elaboración propia. ....	79
Figura 21. Mapa de calor de niveles de tanque por hora. ....	80
Figura 22. Relación entre bombeo (sombreado rosado; encendido =1) y nivel promedio de tanques. Nota. Elaboración propia .....	81
Figura 23. Matriz de correlación entre parámetros y resultados del algoritmo genético. Nota. Elaboración propia. ....	83

Figura 24. Frecuencia de ejecuciones óptimas según los valores de los parámetros evolutivos.

Nota. Elaboración propia. .... 84

Figura 25. Duración promedio en configuraciones óptimas según los parámetros evolutivos. Nota.

Elaboración propia. .... 85

Figura 26 . Compromiso entre frecuencia de éxito y duración promedio. Nota. Elaboración propia.

..... 86

Figura 27 .Comparación de costos horarios de bombeo – Escenario actual vs. Optimizado. Nota.

Elaboración propia. .... 91

## Resumen

**Título:** Optimización del tiempo de bombeo en la estación Bosconia mediante un modelo de algoritmos genéticos en cuasi-tiempo real en el sistema de distribución de agua potable del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP.<sup>i</sup>

**Autor:** Jefte Daniel Patiño Pedraza <sup>ii</sup>

**Palabras Clave:** Sistemas de distribución de agua potable, Optimización, Bombeo, Eficiencia energética, Algoritmos genéticos

La eficiencia energética en sistemas de bombeo constituye uno de los principales desafíos globales en la gestión del agua, dado que las bombas pueden representar hasta el 80 % del consumo eléctrico en la distribución de agua potable. Este elevado requerimiento energético genera altos costos operativos, que pueden alcanzar hasta un 75 % de los gastos totales en sistemas municipales. En el caso del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb S.A. E.S.P.), la estación de bombeo Bosconia evidenció un consumo anual de 23,33 GWh en 2021, equivalente a un costo de \$8.780 millones, con una operación continua de 7.092 horas anuales basada en criterios manuales y empíricos. Ante este panorama, la presente investigación propone un modelo de optimización basado en algoritmos genéticos (GA) aplicado al sistema de distribución del amb, con el objetivo de minimizar el tiempo de bombeo y los costos energéticos en la estación Bosconia. El trabajo se estructura en tres fases: (i) Desarrollo y calibración del modelo hidráulico del sistema matriz del amb, integrado con datos SCADA en tiempo real y modelos predictivos de consumo y producción mediante redes neuronales LSTM. (ii) Implementación del algoritmo genético para optimizar las horas de operación de bombas y válvulas durante un periodo de 24 horas en intervalos de 1 hora, considerando restricciones hidráulicas y de servicio. (iii) Evaluación comparativa de los costos de bombeo reales y optimizados, cuantificando los ahorros energéticos y económicos para un día específico de operación. Los resultados demostraron una reducción del 54,2 % en el costo diario de bombeo, pasando de 33,6 millones a 15,4 millones de COP, gracias a la disminución del tiempo operativo de 24 a 11 horas, sin comprometer las condiciones hidráulicas del sistema. Estos hallazgos validan la eficacia del modelo, evidenciando que la integración entre modelación hidráulica, inteligencia artificial y optimización evolutiva genera impactos significativos en eficiencia y sostenibilidad. Este proyecto constituye una herramienta de apoyo a la toma de decisiones operativas aplicable a otros sistemas de acueducto del país, contribuyendo al uso racional de la energía y al cumplimiento de las políticas nacionales de sostenibilidad en el sector de agua potable en Colombia.

---

<sup>i</sup> Trabajo de Grado

<sup>ii</sup> Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Director: Andrés Almeyda. MSc. Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental.

### Abstract

**Title:** Optimization of Pumping Time at the Bosconia Station Through a Genetic Algorithm Model in Quasi-Real Time in the Drinking Water Distribution System of the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga S.A. ESP.<sup>iii</sup>

**Author:** Jefte Daniel Patiño Pedraza<sup>iv</sup>

**Key Words:** Drinking water distribution systems, Optimization, Pumping, Energy efficiency, Genetic algorithms

Energy efficiency in pumping systems is one of the main global challenges in water management, as pumps can account for up to 80% of the electrical consumption in drinking water distribution. This high energy demand generates significant operational costs, which can reach up to 75% of total expenses in municipal systems. In the case of the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga (amb S.A. E.S.P.), the Bosconia pumping station recorded an annual consumption of 23.33 GWh in 2021, equivalent to a cost of \$8,780 million COP, with continuous operation of 7,092 annual hours based on manual and empirical operator criteria. Given this scenario, this research proposes the development of an optimization model based on genetic algorithms (GA) applied to the amb distribution system, aiming to minimize pumping time and energy costs at the Bosconia station. The work is structured in three phases: (i) Development and calibration of the hydraulic model of the amb main system, integrated with real-time SCADA data and predictive models for water consumption and production using LSTM neural networks. (ii) Implementation of the genetic algorithm to optimize pump and valve operation hours over a 24-hour period at 1-hour intervals, considering hydraulic and service constraints. (iii) Comparative evaluation of actual and optimized pumping costs, quantifying the energy and economic savings achieved for a specific day of operation. The results demonstrated a 54.2% reduction in daily pumping costs for the selected analysis day, decreasing from 33.6 million to 15.4 million COP, thanks to the reduction of pump operating time from 24 to 11 hours, without compromising the system's hydraulic conditions. These findings validate the effectiveness of the proposed model, demonstrating that the integration of hydraulic modeling, artificial intelligence, and evolutionary optimization can generate significant impacts on efficiency and sustainability.

---

<sup>iii</sup> Degree Work

<sup>iv</sup> Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Master's in Water Resources and Environmental Sanitation. Director: Andrés Almeyda. MSc. Water Resources and Environmental Sanitation.

## 1. Introducción

La mejora de la eficiencia energética en sistemas de bombeo es un tema de gran relevancia a nivel global, ya que el 20% de la energía mundial se consume en sistemas de bombeo (Egito et al., 2022). Se estima que aproximadamente el 4% de la demanda total de energía en los Estados Unidos está relacionada con el suministro de agua potable, y hasta un 75% de los costos operativos de sistemas de agua municipales y plantas de tratamiento están asociados con la demanda de energía (Sadatiyan Abkenar et al., 2015). Esto se debe en gran parte al consumo de energía en bombas, que representan aproximadamente el 80% de la energía utilizada para distribuir agua potable (Bin Mahmoud et al., 2023; Salomons, 2021). Por ejemplo, en Portugal, alrededor del 59% de los costos operativos se destinan a la energía, en su mayoría utilizada en el bombeo de agua (Luna et al., 2019). La situación es similar en Brasil, donde se consume una cantidad significativa de electricidad en empresas de servicios públicos de agua, y se estima que hasta el 65% del presupuesto operativo de una empresa de servicios públicos de agua se destina a los costos de electricidad (do Egito et al., 2023). Colombia también enfrenta desafíos similares, según un informe del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio la energía eléctrica puede representar entre un 10% y un 40% de los costos totales de operación de los sistemas de tratamiento de agua (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021).

Un caso específico es el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, donde se ha identificado una oportunidad de mejora en el consumo de energía de la estación de bombeo en Bosconia, lo que a su vez podría reducir los costos operativos. En 2021, esta estación operó durante 7,092 horas y consumió 23.33 GWh, lo que resultó en un pago total de \$8,780 millones (amb SA ESP, 2022). Para el año 2022, se observó un aumento significativo en los costos de energía relacionados con la estación Bosconia en comparación con 2021, donde los costos de energía

aumentaron en \$2,621.6 millones de pesos, lo que representa un incremento del 33.25%. Este aumento demuestra el impacto de los costos de bombeo en la operación del sistema (amb SA ESP, 2022). Se puede optimizar la operación actual del sistema de distribución, que actualmente se lleva a cabo de forma manual y se basa en criterios subjetivos de los operadores, en su mayoría predeterminados para proporcionar operaciones conservadoras y seguras. Esta mejora puede efectuarse debido a la nueva adquisición de equipos de medición de caudal y presión en el sistema, así como en el creciente análisis de datos en tiempo real (amb S.A ESP, 2022).

En este contexto, es de vital importancia implementar medidas de optimización en el tiempo de operación de la estación de bombeo. La optimización del costo de bombeo se alinea con normativas y metas tanto a nivel internacional como nacional. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, como el ODS 7 (energía asequible y no contaminante), el ODS 9 (infraestructura sostenible) y el ODS 13 (acción por el clima), respaldan la optimización de los sistemas de bombeo como un medio para reducir emisiones y mejorar la eficiencia energética. A nivel internacional, existen normas como la ISO 5199 que proporcionan pautas para maximizar la eficiencia de las bombas, lo que a su vez reduce el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. A nivel nacional es importante destacar que la optimización de sistemas de bombeo en sistemas de acueducto de complejidad medio-alto y alto se encuentra reglamentada en el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), en la Resolución 330 de 2017 y la resolución 799 de 2021. Estas regulaciones promueven activamente la eficiencia energética de las estaciones de bombeo en sistemas de acueducto, proporcionando el marco necesario para impulsar la optimización de forma sistemática y garantizar su aplicación.

Por otro lado, es importante destacar la política interna de gestión integral de Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP (amb S.A E.S.P.,2022), la cual se enfoca en abordar la

ineficiencia en los sistemas de bombeo. Esta política tiene objetivos clave, entre ellos mejorar la eficiencia de los procesos y controlar los riesgos, reconociendo que la continuidad y calidad del servicio de suministro de agua dependen de una gestión efectiva. El quinto objetivo refleja un sólido compromiso con la gestión ambiental y la sostenibilidad, a través de acciones concretas para preservar el medio ambiente y reducir el riesgo de contaminación. Además, el tercer objetivo se concentra en la satisfacción del cliente al identificar y atender sus necesidades, asegurando así la eficiencia de los servicios de suministro de agua y el cumplimiento de las expectativas de los usuarios.

Una forma de optimizar los sistemas de bombeo en redes de distribución de agua potable es a través de la aplicación de modelos matemáticos y algoritmos de inteligencia artificial lo que contribuye a la reducción de costos en la operación. La optimización en cuasi tiempo real utilizando un modelo basado en algoritmos genéticos se destaca como un enfoque altamente eficaz para garantizar un funcionamiento eficiente y resiliente frente a situaciones inciertas, como una alta demanda de agua, aprovechando la creciente disponibilidad de datos en tiempo real (Bin Mahmoud et al., 2023).

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Proponer un modelo mediante algoritmos genéticos aplicado en la operación del sistema de distribución del amb SA ESP para optimizar el tiempo de bombeo en la estación Bosconia.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo matemático y computacional que represente la operación de la Estación de Bombeo Bosconia y su interacción con el sistema de distribución de agua potable.

- Aplicar algoritmos genéticos en el modelo matemático y computacional del sistema de distribución que permita la optimización en la operación del sistema en cuasi-tiempo real.

- Evaluar la eficiencia de los resultados de optimización obtenidos en la simulación en términos de ahorro de costos energéticos de acuerdo con el tiempo del bombeo Bosconia frente a costos actuales en un periodo de 24 horas.

### **3. Marco de Referencia**

El presente capítulo, muestra una revisión general de conceptos descritos en relación con la generación de energía mediante centrales hidroeléctricas, su problemática ambiental y operativa frente a los sedimentos acumulados en su embalse; así como las características de los sedimentos de represa y parámetros a tener en cuenta para el análisis y gestión de estos, incluyendo una breve descripción de las posibles alternativas aplicadas en diferentes países para la gestión de sedimentos.

#### **3.1 Marco conceptual**

##### ***3.1.1 Sistema de distribución de agua potable***

Los Sistemas de Distribución de Agua potable (WDS, por sus siglas en inglés) constituyen una infraestructura crítica que engloba la red de distribución, compuesta por tuberías, accesorios y estructuras diseñadas para transportar el agua desde el tanque de almacenamiento o planta de tratamiento hasta los puntos de consumo (Lopez Cualla, 2000). La red matriz, esencial en esta distribución, conforma la malla principal de servicio en una población, facilitando el flujo del agua desde la conducción, planta de tratamiento o tanques de compensación hacia las redes secundarias o tanques locales dentro del sistema (Ministerio de Vivienda, 2003). Las operaciones WDS convencionales están controladas principalmente por configuraciones de sistema predefinidas que se desarrollan en base a datos anteriores o estándares prácticos. Aunque las prácticas operativas convencionales dependen de algunas condiciones del sistema, como los niveles de los tanques, en su mayoría están predeterminadas y tienen como objetivo proporcionar operaciones conservadoras y seguras. Por lo tanto, las estrategias operativas de WDS no cambian en tiempo real según las condiciones predominantes del sistema distintas de los niveles de los tanques (Bin Mahmoud et al., 2023). Los WDS ofrecen una flexibilidad inherente, permitiendo la entrega eficiente del agua

necesaria en distintas condiciones operativas. Este nivel de flexibilidad se logra mediante la manipulación de las estructuras de control del sistema, presentando así la oportunidad de optimizar su funcionamiento de manera continua (Mala-Jetmarova et al., 2017).

### ***3.1.2 Estaciones y costos de Bombeo***

La distribución del agua se puede llevar a cabo mediante tres métodos principales: gravedad, bombeo o una combinación de ambos conocida como distribución mixta. En el enfoque de distribución por gravedad, el agua es elevada desde la fuente hasta un tanque elevado, desde donde fluye por gravedad, asegurando así una presión constante y adecuada en la red (CONAGUA, 2016). Sin embargo, la necesidad de desarrollar una estación de bombeo surge cuando se requiere elevar la línea piezométrica para superar diferencias topográficas, pérdidas por fricción y pérdidas menores, especialmente cuando otras alternativas no son viables (CONAGUA, 2016).

El uso del bombeo en un sistema de acueducto puede adoptar dos modalidades: bombeo directo a la red sin almacenamiento y bombeo con excedentes dirigidos a tanques de regulación. En el primer caso, el bombeo directo sin almacenamiento presenta inconvenientes, como la interrupción total del servicio en caso de falla energética y las fluctuaciones de presión que generan pérdidas por fugas (Hernández Araque, 2019). En contraste, la segunda modalidad, bombeo con excedentes a tanques de regulación, resuelve estos problemas almacenando el exceso de agua bombeada en períodos de bajo consumo y liberándola durante picos de alta demanda, respaldando así el bombeo (CONAGUA, 2016).

La distribución mixta combina ambas metodologías, empleando bombeo directo a la red con excedentes dirigidos a un tanque, que luego distribuye el agua por gravedad (CONAGUA, 2016).

Las bombas juegan un papel crucial en este contexto al convertir la energía mecánica en hidráulica. Se clasifican en bombas de desplazamiento positivo y bombas dinámicas, siendo estas últimas las más comúnmente utilizadas en sistemas de distribución de agua potable (Hernández Araque, 2019). En particular, las bombas dinámicas se subdividen según la dirección de su flujo, ya sea radial (centrífugas), axial o mixto. La relación entre el caudal y la presión se refleja en la curva característica de la bomba, proporcionada por el fabricante. Aunque la eficiencia de la bomba no alcanza el 100%, varía con el caudal, y esta variación se presenta en la curva de rendimiento debido a las pérdidas energéticas inherentes al sistema (Saldarriaga, 2021). La selección adecuada del tipo de bomba y la comprensión de su rendimiento son esenciales para optimizar el sistema de distribución y reducir costos operativos.

### ***3.1.3 Demanda de agua e incertidumbre en su estimación***

La demanda de agua se define como el volumen de agua, en cantidad y calidad, que los ciudadanos o usuarios están dispuestos a adquirir o desean recibir de la entidad suministradora para satisfacer un objetivo específico de producción o consumo (RAE, 2023). El cálculo de la demanda de agua sigue un procedimiento que prioriza la proyección utilizando datos existentes de demanda en la zona, suscriptores del servicio, y en última instancia, la proyección de la población cuando no hay información previa confiable (Ministerio de Vivienda, 2003). La proyección de la demanda se basa en factores clave que inciden en el consumo de una población. La temperatura, la calidad del agua, las características socioeconómicas, la disponibilidad de servicios de alcantarillado, la presión en la red de distribución y la eficiencia de la administración son elementos determinantes (Lopez Cualla, 2000). La temperatura, por ejemplo, afecta el consumo debido a la mayor necesidad de hidratación y otros usos relacionados con el clima. La calidad del agua también juega un papel, ya que la confianza en la calidad impulsa un mayor consumo.

El patrón de consumo representa el comportamiento típico del uso de agua potable en una red de distribución, dependiendo del lugar, día y hora específica de consumo (Ministerio de Vivienda, 2003). Variaciones como la temperatura ambiente, actividades diarias, y el nivel de conciencia sobre la conservación del agua influyen en estos patrones. Por ejemplo, en días cálidos se observa un aumento en la frecuencia del aseo personal, el uso de sistemas de aire acondicionado y el riego de jardines (CONAGUA, 2016).

Estos patrones, sin embargo, no son estáticos y están sujetos a incertidumbres. Factores como cambios imprevistos en la temperatura, eventos socioeconómicos, y problemas en la infraestructura pueden generar variaciones impredecibles en el consumo (CONAGUA, 2016). La gestión efectiva de la incertidumbre en el consumo de agua permite no solo mejorar la confiabilidad del sistema, sino también integrar la flexibilidad necesaria para adaptarse a variaciones imprevistas (Boukas et al., 2023).

#### ***3.1.4 Modelización hidráulica***

La simulación hidráulica, mediante el uso de herramientas computacionales avanzadas, se ha convertido en una estrategia eficiente para reproducir el comportamiento de sistemas reales de distribución de agua (do Egito et al., 2023). Los datos necesarios para generar el modelo hidráulico incluyen información del catastro de la red existente, diámetros internos reales de tuberías, coeficientes de fricción, pérdidas menores de accesorios, ecuaciones y coeficientes de válvulas, asignación de caudales y factores de consumo (Ministerio de Vivienda, 2003). Un modelo hidráulico de redes de distribución de agua proporciona datos cruciales para comprender y gestionar eficientemente el sistema (CONAGUA, 2016). A través de simulaciones computacionales, este modelo ofrece información detallada sobre presiones en nodos, flujos en tuberías, niveles de agua en tanques, patrones de demanda y consumo, pérdidas y ganancias de

agua, calidad del agua, y eficiencia del sistema. Estos datos son fundamentales para evaluar la operación actual, prever posibles problemas, y optimizar el diseño y la planificación de la red (MINISTERIO DE AMBIENTE, 2003).

En este contexto, el simulador hidráulico EPANET, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, emerge como una herramienta de código abierto ampliamente adoptada en la investigación y toma de decisiones técnicas en suministro de agua (Cimorelli et al., 2020; Luna et al., 2019). EPANET utiliza un enfoque híbrido de nodos y bucles para equilibrar hidráulicamente el sistema, resolviendo ecuaciones de continuidad y pérdida de carga (do Egito et al., 2023). Su facilidad de uso y compatibilidad con diferentes lenguajes de programación lo convierten en una elección destacada para investigadores y compañías de investigación en suministro de agua. Para mejorar la aplicación de este modelo computacional, se han desarrollado herramientas auxiliares mediante el uso de Python. Python se destaca como un lenguaje de programación poderoso y sofisticado, reconocido por su facilidad de lectura y comprensión, además de presentar la mayoría de las funcionalidades compartidas por numerosos otros lenguajes. Un aspecto fundamental que destacar es que Python es un software de código abierto, lo que lo hace accesible para todos (Simon Yuill & Harry Halpin, 2006). Estas integraciones permiten la colaboración entre EPANET y algoritmos de optimización, ofreciendo flexibilidad en la simulación y análisis de la resiliencia de sistemas de distribución de agua (Bin Mahmoud et al., 2023).

Para validar que el modelo hidráulico simule fielmente la realidad del sistema se lleva a cabo un proceso iterativo y sistemático para ajustar los parámetros del modelo a fin de lograr una correspondencia más precisa entre los resultados simulados y el comportamiento real del sistema hidráulico (Kara et al., 2016). La calibración implica modificar parámetros clave, como la

rugosidad de las tuberías y los coeficientes de pérdida menores, mediante comparaciones entre los datos observados del sistema real y las predicciones del modelo (IBAI ALDAZ ARMENDARIZ, 2020). Durante el proceso de calibración, se ajustan estos parámetros, realizando sucesivas simulaciones y comparando los resultados obtenidos con datos reales de presión, caudal, niveles de agua, entre otros, a través de métodos estadísticos y herramientas de optimización (Kara et al., 2016).

Para validar el modelo calibrado, se utilizan diferentes métodos, siendo uno de ellos el Error Estándar (ES) (Khedr et al., 2015). El Error Estándar evalúa la dispersión de los errores residuales entre los valores observados y los valores predichos por el modelo (Khedr et al., 2015). Un bajo valor de Error Estándar indica una mayor precisión y ajuste del modelo a los datos reales del sistema hidráulico (Khedr et al., 2015). La Ecuación 1 muestra la fórmula que describe el cálculo del Error Estándar (ES),  $P_i$  es el valor predicho por el modelo para el dato  $i$ ,  $Y_i$  es el valor real u observado correspondiente al dato  $i$  y  $n$  es el número total de datos u observaciones.

$$ES = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Y_i)^2}{n}}$$

**Ecuación 1**

### ***3.1.5 Algoritmo de redes neuronales***

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son un tipo de algoritmo de aprendizaje automático que se inspira en el funcionamiento del cerebro humano (Chollet, 2017). Están compuestas por un conjunto de neuronas interconectadas que aprenden a identificar patrones en los datos (Haykin, 1999). Cada neurona artificial es una unidad simple que recibe entradas, realiza un cálculo y produce una salida. Estas neuronas se conectan entre sí para formar una red, y las

conexiones entre ellas tienen pesos que determinan la influencia de una neurona en otra (Haykin, 1999).

El proceso de entrenamiento de una RNA implica alimentar la red con un conjunto de datos que incluye etiquetas. Estas etiquetas indican el valor correcto que la red debe generar para cada entrada. La red ajusta los pesos de sus conexiones de manera iterativa para minimizar el error entre sus predicciones y las etiquetas, lo que le permite aprender a identificar patrones y relaciones en los datos (Theobald, 2022).

Las RNA tienen aplicaciones en una amplia variedad de tareas, entre las cuales se incluye la predicción de caudales (Rivera Salazar & Matta Lagos, 2012). En este contexto, las RNA se alimentan con datos históricos que abarcan información sobre caudales, precipitación, temperatura, y otros factores relevantes, la red aprende a identificar las complejas relaciones entre estas variables y a utilizarlas para predecir los caudales futuros de manera eficaz (Rivera Salazar & Matta Lagos, 2012). En el ámbito de las redes neuronales, existen diferentes tipos que se adaptan a diversos problemas y estructuras de datos. Entre ellos se destacan las Redes Neuronales Convolutivas (CNN) diseñadas principalmente para datos con estructura espacial, como imágenes, al aplicar filtros convolucionales para extraer características (Ramirez Villacorta et al., 2023). Por otro lado, las Redes Neuronales Recurrentes (RNN) son ideales para modelar secuencias temporales, como series de tiempo, al capturar dependencias temporales (Ramirez Villacorta et al., 2023). Dentro de los métodos de aprendizaje, el supervisado implica entrenar el modelo con pares de entrada-salida etiquetados, mientras que el no supervisado busca patrones o estructuras intrínsecas en los datos no etiquetados (Ramirez Villacorta et al., 2023). Para predecir caudales, dada la naturaleza secuencial de los datos temporales, el tipo de red neuronal más apropiado sería una Red Neuronal Recurrente (RNN) (Rodríguez Aedo & Natalia Carolina, 2016), preferiblemente

con variantes como Long Short-Term Memory (LSTM) o Gated Recurrent Unit (GRU), ya que estas están diseñadas para modelar series temporales y pueden capturar eficazmente las dependencias a largo plazo presentes en los datos de caudal (Rodríguez Aedo & Natalia Carolina, 2016). Estos modelos permiten aprender de secuencias pasadas para predecir valores futuros con mayor precisión en este contexto específico de predicción de caudales. Para la evaluación de la eficiencia del modelo, se puede emplear el cálculo del Error Cuadrático Medio (MSE) entre el conjunto de datos reales y las predicciones generadas por la red (Rodríguez Aedo & Natalia Carolina, 2016). Este parámetro es comúnmente utilizado en la literatura y en numerosos trabajos que involucran predicciones mediante redes neuronales, ya que se considera un estimador adecuado para valorar los resultados obtenidos (Rodríguez Aedo & Natalia Carolina, 2016). La Ecuación 2 muestra la fórmula que describe el cálculo del Error Cuadrático Medio, donde  $Y_i$  representa el vector que contiene  $n$  valores correspondientes a datos reales, mientras que  $P_i$  es el vector que contiene  $n$  predicciones generadas por el modelo.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - Y_i)^2$$

**Ecuación 2**

### ***3.1.6 Optimización mediante algoritmos genéticos***

Un algoritmo genético (GA) busca la mejor solución a través de la evaluación sistemática de un conjunto aleatorio de soluciones, conocido como población inicial. Inspirado en la teoría de la evolución natural de Darwin, el GA emula el proceso de selección natural, donde los individuos más aptos son elegidos para la reproducción, generando descendencia para la siguiente generación (do Egito et al., 2023). La analogía radica en mantener y desarrollar soluciones cercanas al óptimo,

utilizando la diversidad de la población para explorar nuevas soluciones. Similar a la genética, las soluciones se representan como cromosomas que contienen genes correspondientes a los controles (encendido y apagado) de una bomba durante el período de operación, como, por ejemplo, 24 horas (Sadatiyan Abkenar et al., 2015). Una vez ensamblados los cromosomas de todas las bombas en la red, se forma una solución. La optimización del GA comienza con un grupo de soluciones aleatorias (generación inicial - padres). Para actualizar la población, el algoritmo selecciona un cromosoma padre basándose en su función de aptitud y, mediante operadores de cruce y mutación, genera cromosomas descendientes que formarán la población de la siguiente generación con soluciones mejoradas. Tras varias iteraciones, el GA converge hacia una solución óptima hasta alcanzar el criterio de detención, resultando en la última generación que contiene un conjunto de soluciones óptimas (Goldberg, 1989).

Los parámetros del GA, como el tamaño de la población, la tasa de mutación, la tasa de reproducción y el número de iteraciones, son críticos y afectan directamente la optimización (Sadatiyan Abkenar et al., 2015). Aumentar el tamaño de la población expande el espacio de búsqueda, incrementando la probabilidad de encontrar soluciones óptimas, pero conlleva un mayor tiempo y gasto computacional para procesar los datos (do Egito et al., 2023). El GA es ampliamente adoptado en la comunidad científica debido a su versatilidad y facilidad de adaptación a problemas de optimización, como aquellos presentes en redes de distribución de agua, donde cada estudio contribuye a mejorar los resultados obtenidos (Bin Mahmoud et al., 2023).

### **3.2 Marco institucional**

La propuesta de eficiencia operativa y energética en sistemas de bombeo se integra de manera coherente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, 13 y 9. El ODS 7, centrado en garantizar acceso a una energía asequible, sostenible y moderna, se refleja en la optimización del consumo energético en estaciones de bombeo. Al alinearse con el ODS 13, que busca combatir el cambio climático, la propuesta contribuye a reducir las emisiones asociadas con la operación de sistemas de bombeo. Asimismo, el ODS 9, orientado a construir infraestructuras resilientes y sostenibles, se materializa en la mejora de la eficiencia y gestión de sistemas de distribución de agua, asegurando su adaptabilidad y sostenibilidad a largo plazo.

El marco institucional que respalda esta propuesta se apoya en políticas y normativas clave, destacando el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). Este reglamento establece disposiciones específicas para la eficiencia operativa y energética en sistemas de bombeo, asegurando un manejo eficiente de los recursos en acueductos. La Resolución 330 de 2017 complementa este marco, proporcionando directrices para impulsar la eficiencia energética en estaciones de bombeo y redes de distribución de agua, fortaleciendo el compromiso con prácticas sostenibles y la reducción de costos.

La norma ISO 5199 desempeña un papel clave al establecer estándares internacionales para el diseño eficiente de bombas centrífugas, contribuyendo a la reducción del consumo de energía en sistemas de bombeo.

A nivel local, la política de gestión integral del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP refuerza la implementación de prácticas eficientes en el suministro de agua, asegurando la alineación con estándares internacionales, regulaciones nacionales y gestión local.

### 3.3 Estado del arte

La optimización en sistemas de bombeo, particularmente en el contexto de las estaciones de agua potable, ha emergido como un tema de investigación crítico debido a su relevancia para la eficiencia en el suministro de agua y la reducción de costos operativos. A lo largo de los años, varios enfoques y algoritmos han sido propuestos para abordar esta problemática. En el estudio de Sadatiyan Abkenar et al. (2015), se abordó la optimización de la entrega de agua potable municipal con un enfoque en la reducción de costos asociados con el consumo de energía y las emisiones ambientales. Lograron programar estratégicamente los ciclos de bombeo, un desafío complejo debido a la naturaleza no lineal y las numerosas restricciones involucradas, mediante el uso de algoritmos genéticos. Sus resultados destacan la necesidad de desarrollar métodos de codificación que eviten soluciones inviables para algoritmos genéticos (Sadatiyan Abkenar et al., 2015).

Por otro lado, el estudio de Tavakoli et al. (2023) ofrece una solución perspicaz al desafío de la programación de bombas en redes de distribución de agua. Su objetivo principal es minimizar los costos eléctricos asociados con el funcionamiento de bombas en la red. Para lograrlo, presentan una formulación matemática que considera la red de distribución de agua como un grafo dirigido, dividiéndola en intervalos de tiempo y utilizando un modelo de programación lineal mixta (MILP) para activar o desactivar bombas y tuberías en cada intervalo. Reconocen la posible carga computacional del preprocesamiento y sugieren la aplicación de enfoques heurísticos o de aprendizaje automático para optimizar la selección de elementos críticos y momentos temporales (Tavakoli et al., 2023). Bouach & Benmamar (2023) presentaron un modelo de optimización novedoso llamado Algoritmo de Modificación Genética Híbrida (HGMA), que se centra en la optimización multiobjetivo. Su objetivo es reducir el consumo de energía y los costos asociados al bombeo, teniendo en cuenta las restricciones relacionadas con los límites del tanque de

distribución. Compararon el rendimiento del HGMA con otros modelos ampliamente utilizados y demostraron su eficacia al lograr una mejora del 14.94% en la calidad de las soluciones en comparación con el GA, un 28.56% en comparación con la optimización de colonias de hormigas (ACO) y un 36.21% en comparación con la optimización por enjambre de partículas (PSO) (Bouach & Benmamar, 2023).

La Optimización Robusta (RO), como describe Ben-Tal y Nemirovski (2002), se presenta como una metodología usada en la optimización de sistemas de bombeo, particularmente en situaciones donde la incertidumbre en los datos es un desafío central. RO combina modelado y herramientas computacionales para proporcionar soluciones confiables en entornos donde los datos, como la demanda de agua, pueden variar dentro de ciertos conjuntos de incertidumbre. Esta capacidad de abordar la incertidumbre permite diseñar sistemas de bombeo que sean capaces de funcionar de manera eficiente y confiable, incluso en condiciones cambiantes o frente a perturbaciones en los datos de entrada (Ben-Tal & Nemirovski, 2002).

Posteriormente se implementó el uso de modelos hidráulicos en algoritmos de optimización con resultados satisfactorios. El estudio de do Egito et al. (2023) ofrece una contribución destacada en la mejora de las estrategias operativas para la activación de bombas en sistemas de distribución de agua, con un enfoque particular en la reducción de costos eléctricos y la garantía de la continuidad en el suministro de agua. Su enfoque innovador combina algoritmos genéticos y un simulador hidráulico, como EPANET, para encontrar las reglas operativas más eficientes. Destacan la importancia de mantener las presiones en la red dentro de límites específicos y los niveles de tanques de almacenamiento por encima de márgenes seguros. Lograron una notable reducción del 21.58% en los costos diarios de electricidad en comparación con configuraciones no optimizadas (do Egito et al., 2023). El estudio de Goryashko & Nemirovski (2014) se enfocó en

abordar los desafíos de optimización de los costos energéticos y el rendimiento hidráulico en sistemas de distribución de agua. Utilizaron una política de Optimización Lineal Robusta (LRO) y evaluaron su aplicabilidad y confiabilidad bajo diversos niveles de incertidumbre utilizando un modelo hidráulico, pero con ciertas simplificaciones (Goryashko & Nemirovski, 2014). En el estudio de De Paola et al. (2016), se abordó la optimización de la operación de bombeo en un sistema hidráulico utilizando un enfoque de búsqueda de armonía multiobjetivo (HSMO) en combinación con el software EPANET 2.0. Este enfoque demostró ser altamente eficaz, reduciendo los costos de operación en un 60% aproximadamente, con un total de 14 conmutaciones de bombas por día (De Paola et al., 2016). En el estudio de Luna et al. (2019), se realizó una optimización de la programación de bombeo en una red de suministro de agua con el propósito de minimizar el consumo de energía y los costos operativos. Utilizando un algoritmo desarrollado en Python y conectado a EPANET 2.0, evaluaron diferentes enfoques de programación de bombas en términos de eficiencia del sistema. Los resultados demostraron una mejora significativa en la eficiencia energética, con una reducción del 10% en costos operativos y emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con las reglas operativas existentes. Se identificó un potencial de mejora de hasta el 25% en la eficiencia energética, dependiendo de las condiciones específicas (Luna et al., 2019).

La incorporación de datos en tiempo real y pronósticos de la demanda ha revolucionado la optimización de sistemas de bombeo. Estos datos permiten ajustar de manera dinámica la operación de las redes de distribución de agua, maximizando la eficiencia. Recientemente se han realizado múltiples aplicaciones de estos aspectos en la optimización de sistemas de bombeo para redes de distribución de agua potable.

El estudio de Bin Mahmoud et al. (2023) muestra un avance significativo en la gestión de sistemas de distribución de agua. Se enfoca en la implementación de un marco de programación

en tiempo real para optimizar la operación y el control de estos sistemas, minimizando el consumo de energía sin comprometer los niveles de presión y agua en tanques. Su implementación de un algoritmo de optimización evolutiva basado en datos en tiempo real para controlar las válvulas reductoras de presión y bombas arroja resultados notables. La reducción de los costos operativos del sistema de distribución de agua subraya la importancia de la gestión en tiempo real (Bin Mahmoud et al., 2023). Salomons (2021) aborda la operación de Sistemas de Distribución de Agua Inteligentes con el objetivo de lograr operaciones que ahorren energía y sean respetuosas con el medio ambiente. Se desarrolla un algoritmo de pronóstico de demanda que requiere una cantidad limitada de datos históricos, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en tiempo real. Este estudio contribuye al sector del agua al desarrollar métodos prácticos para la operación óptima de WDSs, con un enfoque en un esquema de control en "modo cerrado" con retroalimentación en tiempo real (Salomons, 2021). El estudio de Subha & Kowsigan (2022) aplicado en la optimización de sistemas de distribución de agua en el contexto de ciudades inteligentes, haciendo uso de la Internet de las Cosas (IoT) y algoritmos bioinspirados. Los resultados revelan la importancia de programar el suministro de agua de acuerdo con las predicciones de la demanda del cliente para aumentar la eficiencia en los sistemas de distribución de agua (Subha & Kowsigan, 2022).

El estudio de Perelman et al. (2023) se centró en abordar la optimización de sistemas de distribución de agua, considerando la incertidumbre en las demandas de los consumidores y los costos operativos, mediante la aplicación de la teoría de la optimización robusta. A pesar de algunas limitaciones en la suposición de distribuciones y conjuntos de incertidumbre, este enfoque robusto muestra utilidad en la toma de decisiones para mejorar la eficiencia de sistemas de distribución de agua, enfatizando la necesidad de modelar correlaciones temporales y espaciales en problemas de optimización bajo incertidumbre (Perelman et al., 2023).

Finalmente, recientemente se ha trabajado en la aplicación de todos estos métodos de optimización en sistemas de distribución y costos de bombeo en redes reales y complejas. Como lo muestra el estudio de Boukas et al. (2023) donde se presenta un proyecto piloto llevado a cabo en la estación de tratamiento de agua de Stembert, Bélgica, que se centró en la optimización de la operación de la estación para aprovechar su flexibilidad en respuesta a las fluctuaciones de los precios de la electricidad. Utilizando la plataforma AMEO (Advance Management of Energy Operations) de Haulogy, se desarrolló un modelo de optimización en tiempo real que consideró diversos parámetros, como pronósticos de precios de electricidad, flujos de agua y eficiencias en la operación de los embalses. Se establecieron estrategias operativas convencionales basadas en niveles de agua y se logró una reducción significativa de los costos, incluyendo un 11% en los costos de operación de bombas de alta presión, un 6,7% en los costos totales de bombeo y un 3,6% en los costos totales de consumo (Boukas et al., 2023).

En la tabla 1 se presenta una clasificación de los estudios anteriormente mencionados, organizándolos según los métodos utilizados en sus investigaciones. Cada estudio se ha categorizado, junto con sus principales contribuciones y limitaciones en la optimización de estos sistemas.

**Tabla 1.**

*Resumen de estudios sobre optimización de sistemas de bombeo incluidos en el estado del arte su metodología y principales contribuciones y limitantes.*

<b>Título del Artículo</b>	<b>Autores</b>	<b>Año</b>	<b>Método</b>	<b>Principales Resultados</b>
<b>Robust Optimization - Methodology and Applications</b>	Ben-Tal, A., & Nemirovski, A.	2002	Optimización Robusta (RO)	Resalta la eficacia de la Optimización Robusta (RO) en problemas de optimización con datos inciertos, aunque se enfoca en problemas predominantemente lineales.

<b>Robust Energy Cost Optimization of Water Distribution System with Uncertain Demand</b>	Goryashko & Nemirovski	2014	Optimización de operaciones diarias de estaciones de bombeo en sistemas de distribución de agua mediante optimización robusta (RO)	Propone un enfoque computacionalmente viable para resolver problemas de optimización bajo incertidumbre en sistemas de distribución de agua, aunque destaca su limitante para redes reales que sean muy complejas y no puedan asumir simplificaciones
<b>Evaluation of Genetic Algorithms using Discrete and Continuous Methods for Pump Optimization of Water Distribution Systems</b>	Sadatiyan Abkenar, S. M., Stanley, S. D., Miller, C. J., Chase, D. V, & McElmurry, S. P.	2015	Programación de ciclos de bombeo por medio de algoritmos genéticos en un modelo hidráulico	Los algoritmos genéticos y otros métodos de programación evolutiva son ideales para mejorar la sostenibilidad de los Sistemas de Distribución de Agua a través de la optimización de las bombas. Combinar modelos hidráulicos precisos con optimización de parámetros permite identificar resultados precisos y factibles rápidamente.
<b>An Application of the Harmony-Search Multi-Objective (HSMO) Optimization Algorithm for the Solution of Pump Scheduling Problem</b>	De Paola et al	2016	Adaptación de un enfoque de optimización multiobjetivo basado en la búsqueda armónica (HSMO) integrando el modelado con el software EPANET 2.0	Demuestra la eficacia de algoritmos como HSMO en sistemas complejos donde encontrar la mejor solución mediante métodos analíticos es difícil.
<b>Optimal and Practical Real-Time Operation of Water Distribution Systems</b>	Salomons	2021	Formulación práctica de Programación Lineal Mixta Entera (MILP) para Optimización Práctica en Tiempo Real de Sistemas de Distribución de Agua	Introduce un método simple para predecir la demanda y simplifica la fórmula tradicional de optimización, facilitando la toma de decisiones y reduciendo el tiempo computacional. Sin embargo, su formulación y simplificación puede ser compleja para redes reales y requiere de un estudio más detallado

<b>Optimal Water Supply Scheduling Mechanisms using Bio-Inspired Algorithms for IoT-based Smart Water Distribution Network</b>	de Subha & Kowsigan	2022	Implementación de sensores en la red y algoritmos bioinspirados para programación del suministro de agua según predicciones de demanda	Destaca la importancia de la programación del suministro de agua según predicciones de demanda para mejorar la eficiencia del sistema de distribución de agua.
<b>Strengthening Mathematical Formulation for Global Optimization of the Operational Water Network Distribution</b>	Amirhossein Tavakoli, Sophie Demasse, Valentina Sessa	2023	Programación de bombas en redes de distribución de agua por medio de un modelo de programación lineal mixta (MILP) resuelto con un software comercial	Reconocen la posible carga computacional del preprocesamiento y sugieren enfoques heurísticos o de aprendizaje automático para optimizar la selección de elementos críticos y momentos temporales. La relajación de intervalos de tiempo y la focalización en elementos cruciales podrían generalizarse para redes mucho más grandes.
<b>Management of a Water Pumping Schedule by an HGMA Optimization Algorithm</b>	Ahcene Bouach, Saadia Benmamar	2023	Optimización multiobjetivo de los horarios de bombeo mediante el algoritmo de modificación genética híbrida (HGMA)	El modelo HGMA destaca por su rendimiento superior en la optimización de sistemas de bombeo en comparación con otros modelos. Requiere mejoras como la exploración de intervalos de tiempo más cortos, integración con modelos de pronóstico y la dificultad de definir los parámetros del modelo para redes complejas.
<b>Optimization of the Operation of Water Distribution Systems with Emphasis on the Joint Optimization of Pumps and Reservoirs</b>	do Egito, T. B., de Azevedo, J. R. G., & de Tarso Marques Bezerra, S	2023	Modelo de optimización basado en algoritmos genéticos junto con un modelo hidráulico que combina el uso eficiente de los embalses con la mejor regla operativa para activar los	Los resultados indican la posibilidad de reducir los costos de electricidad al mejorar el uso de la infraestructura de almacenamiento de agua. El modelo se puede aplicar en redes reales y destaca por su facilidad de implementación.

sistemas de bombeo				
<b>Optimal Near Real-Time Control of Water Distribution System Operations</b>	Bin Mahmoud et al	2023	Algoritmo genético integrado a modelo hidráulico en tiempo cuasi-real para determinar horarios óptimos de bombas y válvulas	Presenta un enfoque innovador para controlar sistemas de distribución de agua en tiempo real, minimizando costos operativos y manteniendo niveles mínimos de presión y tanques. Destacan la facilidad del método para adaptarse a redes reales y complejas.
<b>Robust Optimal Operation of Water Distribution Systems</b>	Perelman et al	2023	Método basado en RO para optimizar la programación de bombas bajo incertidumbres de demandas y costos de bombeo	Destaca la aplicación de la optimización robusta para la operación eficiente de sistemas de distribución de agua bajo condiciones inciertas, equilibrando costos y confiabilidad, aunque requiere mejoras y validaciones adicionales para su aplicación en redes reales.
<b>Exploiting the Flexibility Potential of Water Distribution Networks: A Pilot Project in Belgium</b>	Boukas et al	2023	Uso de la plataforma AMEO para recopilar datos, procesar información y ejecutar algoritmos inteligentes de pronóstico y toma de decisiones	Ofrece un patrón operativo para bombas, reduciendo costos en una red de distribución de agua real mediante la predicción del consumo de agua y precios eléctricos con técnicas de aprendizaje automático. Sin embargo, hace parte de un software comercial con un equipo técnico especializado

Nota. Elaboración propia.

#### 4. Caso de estudio

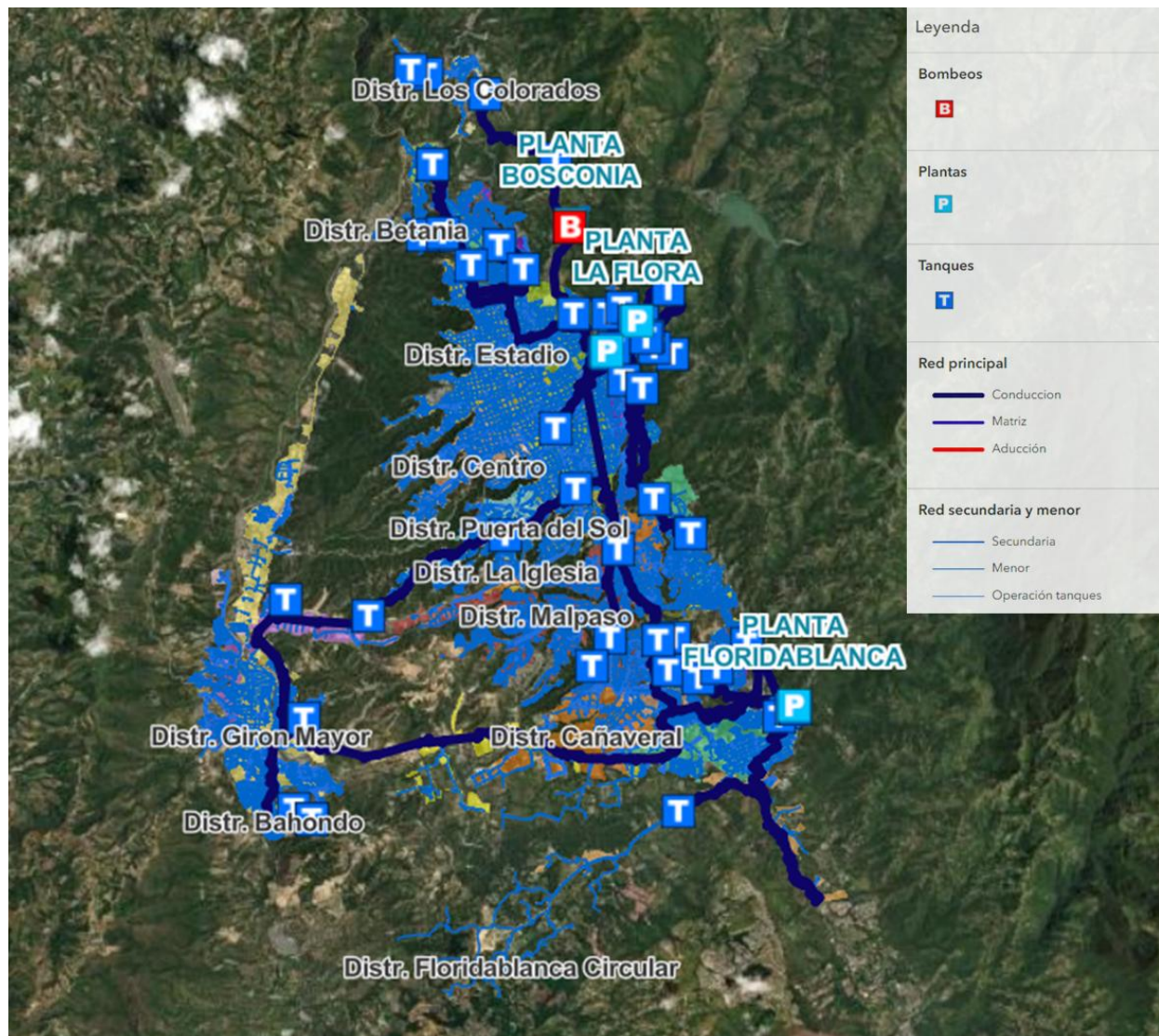
El sistema de distribución de AMB se compone de aproximadamente 1512 km de red que suministra agua potable a alrededor de 316,000 usuarios en los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón (amb SA ESP, 2022). Durante el año 2022, el caudal captado para satisfacer la demanda fue de 2,339 l/s. Los aportes de los sistemas Tona, Río Frío y Suratá fueron de 1,295.9 l/s, 414.3 l/s y 628.8 l/s respectivamente (amb SA ESP, 2022).

El Sistema de Potabilización está conformado por las Plantas La Flora, Morrорico, Florida y Bosconia. En el 2022, se produjo un volumen de agua suministrada a la red de 72,179,404 m<sup>3</sup> (amb SA ESP, 2022). Dentro del sistema, hay un total de 48 tanques, de los cuales 30 se alimentan de las plantas y están interconectados mediante las tuberías de conducción, que abarcan un total de 300 km de extensión (amb SA ESP, 2022). Estos 30 tanques suministran agua a las zonas de consumo, lo que da lugar a 44 distritos de consumo.

El sistema cuenta con un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) que almacena los datos de sensores de caudal, presión y nivel dentro de la red. Los 30 tanques que abastecen las zonas de consumo están instrumentados con sensores de nivel y caudal (amb SA ESP, 2022). Destaca en el sistema la estación de bombeo Bosconia, encargada de inyectar agua al sistema matriz de conducciones desde la planta de tratamiento Bosconia. La Figura 1 representa el esquema general del sistema de distribución del amb S.A. ESP.

#### **Figura 1.**

*Esquema general del sistema de distribución del amb S.A. ESP.*



Nota. Tomado de Catastro amb S.A. E.S.P.

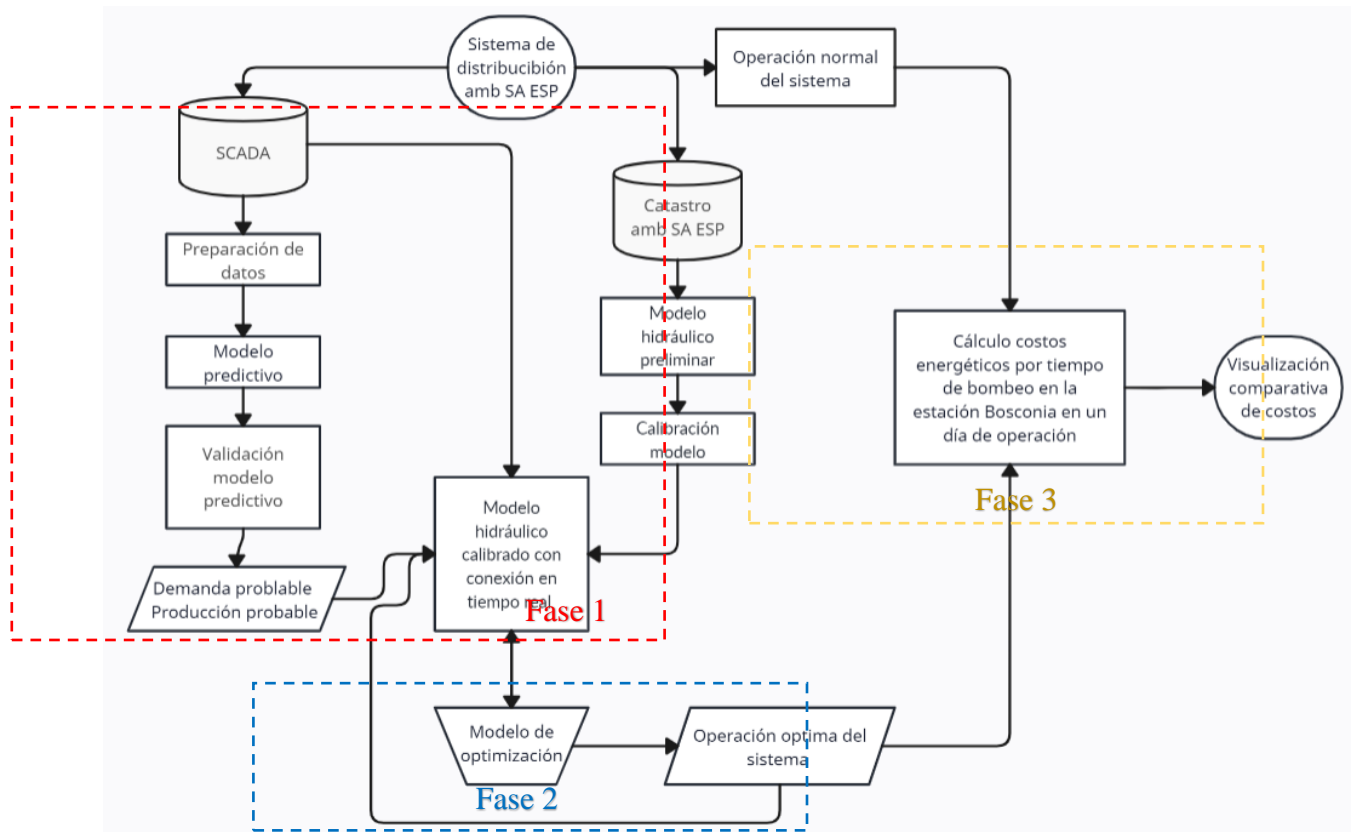
## 5. Metodología

Este proyecto se desarrolló en tres fases: i) fase 1, desarrollo del modelo hidráulico calibrado con conexión tiempo real del sistema matriz de distribución del amb S.A E.S. P; ii) Fase 2, optimización en intervalos de tiempo de la operación del sistema de distribución buscando optimizar el tiempo de bombeo de la estación Bosconia; iii) Fase 3, evaluación de los resultados obtenidos en cuanto a costos energéticos de bombeo por medio del método de optimización para un periodo de operación de 24 horas. En la Figura 2 se muestra el flujograma metodológico para

el desarrollo del proyecto integrando las fases mencionadas anteriormente. A continuación, se describen cada una de las fases.

## Figura 2.

*Flujograma de las fases metodológicas.*



Nota. La fase 1 está demarcada por un rectángulo punteado de color rojo, la fase 2 está delimitada por un rectángulo punteado de color azul, y la fase 3 está delimitada por un rectángulo punteado de color amarillo. Elaboración propia.

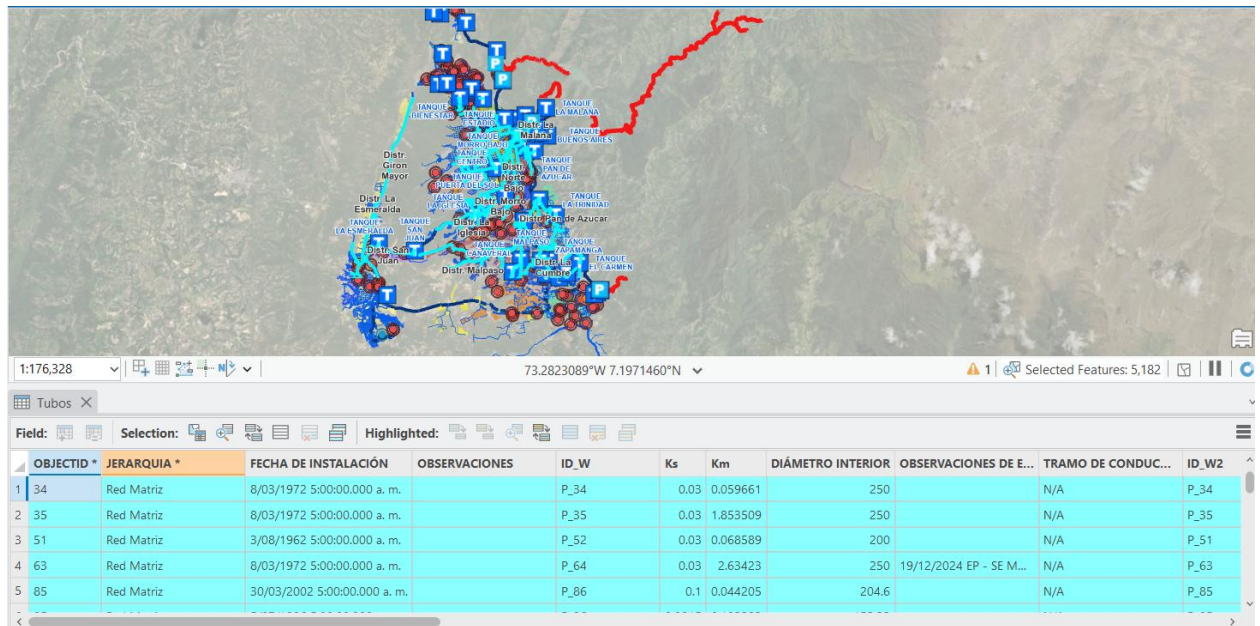
## **5.1. Fase 1: Desarrollo del modelo de hidráulico calibrado con conexión en tiempo real del sistema matriz de distribución del amb S.A. E.S.P.**

### ***5.1.1. Recolección de información***

En esta etapa inicial, se llevó a cabo la recopilación de información relevante relacionada con los aspectos físicos y topológicos de la red matriz de distribución de agua de amb S.A. E.S.P. Los aspectos físicos abarcaron características como la disposición geográfica de nodos y tuberías, diámetros y materiales de las tuberías, ubicación y capacidad de tanques de almacenamiento, así como presiones y elevaciones en puntos específicos. Por otro lado, los aspectos topológicos involucraron la estructura de la red, direccionalidad del flujo de agua, conectividad y relaciones entre los componentes para comprender mejor la organización y funcionalidad de la red. Esta red comprende las tuberías matrices que conectan las salidas de las plantas de tratamiento de agua con los tanques de almacenamiento que abastecen a cada zona de consumo directo. Para ello, se consultó el catastro técnico-operativo suministrado por amb S.A. E.S.P., donde se encontraron detalles importantes, tales como la ubicación de las tuberías, activos y estructuras de abastecimiento dentro de la red, diámetro de las tuberías, material de las tuberías, elevación de las tuberías, así como información sobre los activos y las estructuras de abastecimiento, incluyendo sistemas de bombeo con sus respectivas curvas de eficiencia, válvulas reguladoras y de corte, tal como se muestra en la Figura 3.

### **Figura 3.**

*Muestra de información recolectada del catastro del amb S.A. E.S.P .*



Nota. Tomado del catastro del amb S.A. E.S.P.

### 5.1.2. Modelo hidráulico preliminar calibrado

El desarrollo del modelo hidráulico preliminar constituye una etapa fundamental para comprender el comportamiento hidráulico general del sistema bajo condiciones normales de operación, antes de integrarlo con datos en tiempo real. Una vez completada la recolección de información detallada, se construyó un modelo hidráulico de la red matriz de distribución utilizando el software EPANET 2 (Rossman, 2000). Este modelo integró todos los aspectos físicos y topológicos del sistema obtenidos en la etapa anterior, asegurando que representara con precisión la infraestructura, la configuración y la direccionalidad hidráulica de la red matriz del amb S.A. E.S.P.

Para representar adecuadamente el intercambio de caudales entre los tanques de almacenamiento, las plantas de tratamiento y las zonas de consumo, se configuró en el modelo una asignación hidráulica diferenciada de demandas e ingresos. Las demandas horarias de los sectores de consumo se asignaron directamente a los tubos conectados a la salida de cada tanque, de modo que el flujo saliente reflejara el comportamiento de consumo agregado de las zonas abastecidas

por cada depósito. Estas demandas horarias fueron obtenidas a partir de los datos históricos registrados en el sistema SCADA del amb S.A. E.S.P., utilizando específicamente los caudalímetros instalados en las líneas de salida de los tanques hacia las zonas de consumo. Estos sensores proporcionan mediciones continuas y confiables del caudal extraído por cada zona, lo que permitió construir series horarias representativas para su incorporación en el modelo hidráulico. Esta configuración permitió modelar con mayor realismo la extracción de agua del tanque, reproduciendo las condiciones de descarga hacia la red secundaria y mitigando errores asociados a la asignación de demandas puntuales en nodos individuales (Walski et al., 2003).

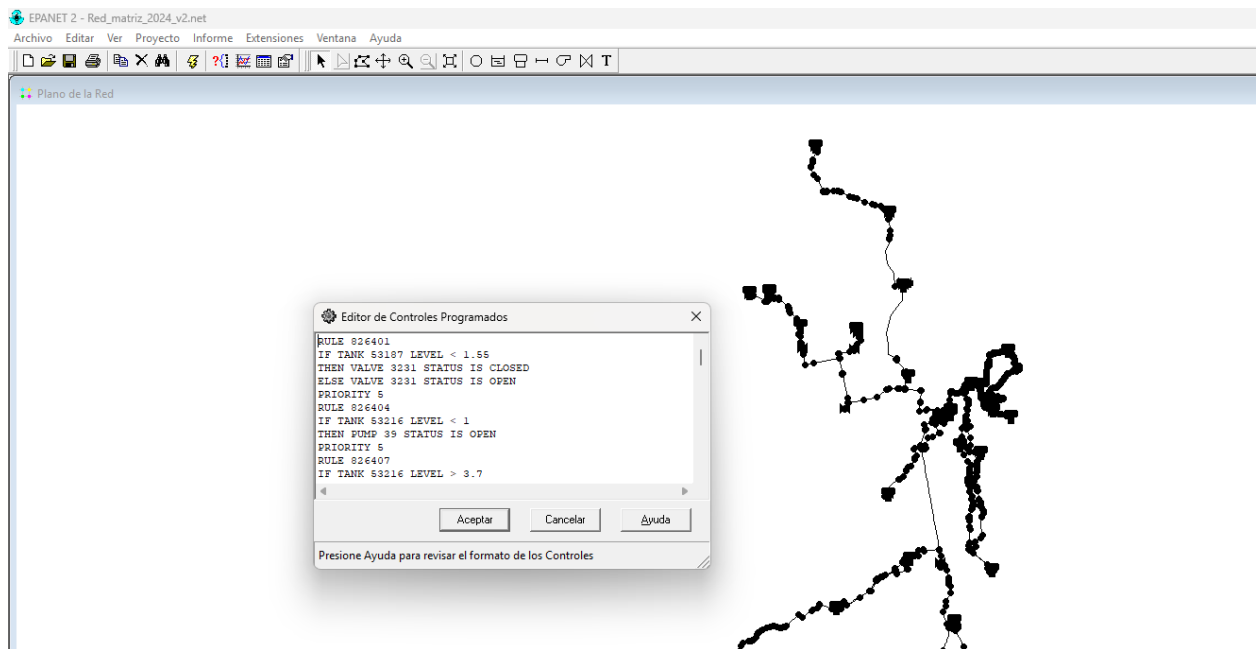
Por otro lado, el ingreso de agua desde las plantas de tratamiento se representó mediante nodos con demanda negativa, equivalentes a puntos de inyección de caudal. Estos nodos se conectaron directamente a los tanques de cabecera que reciben suministro por gravedad o por bombeo desde las plantas, permitiendo que el modelo reprodujera los regímenes de entrada observados en la operación real. Esta metodología es ampliamente aceptada en la simulación de redes matrices, dado que facilita la integración de condiciones de producción controladas y permite el acople con datos medidos de caudal de planta (Ezio & A, 2013).

Para lograr una representación realista del comportamiento operativo de los tanques de almacenamiento, se configuraron sistemas de control dentro del modelo, los cuales emularon el efecto flotador característico de la operación automática de estos depósitos. Este tipo de control consiste en permitir que los tanques se llenen hasta un nivel máximo predefinido y, una vez alcanzado dicho umbral, se cierren las válvulas de entrada o se apaguen las bombas de impulsión. Posteriormente, cuando el nivel desciende hasta el punto mínimo operativo, se reactivan automáticamente los elementos de bombeo o se abren nuevamente las válvulas de suministro.

Esta lógica de control fue implementada mediante condiciones lógicas “If-Then” en EPANET, como muestra la Figura 4, asociando la elevación del nivel del tanque con los estados de válvulas y bombas conectadas, lo que permitió reproducir de forma precisa el ciclo dinámico de llenado y vaciado. De esta manera, se logró capturar el comportamiento real de los tanques bajo el principio de operación flotante, simulando la operación real realizada en el sistema por los operadores, garantizando que los volúmenes almacenados oscilaran dentro de los límites definidos por las condiciones hidráulicas y la demanda horaria del sistema.

#### Figura 4.

*Configuración de los sistemas de control de nivel tipo “efecto flotador” en los tanques del modelo hidráulico en EPANET 2.0*



Nota. Elaboración propia.

Posteriormente, se realizó la calibración del modelo hidráulico utilizando datos medidos en campo por sensores en tiempo real, extraídos de la base de datos del sistema SCADA del amb

S.A. E.S.P., el cual cuenta con un total de 31 sensores activos distribuidos estratégicamente en la red matriz. De estos, 3 corresponden a medición de presión ubicados en nodos de control y 28 a medición de caudal, localizados en conducciones principales y en las líneas de entrada o salida de los tanques de almacenamiento.

De los sensores disponibles, 20 fueron empleados en el proceso de calibración directa (17 de caudal y 3 de presión), mientras que 11 sensores adicionales, principalmente caudalímetros instalados en entradas y salidas de tanques operados manualmente, se utilizaron exclusivamente para verificación cualitativa. Estos últimos presentaban registros intermitentes o inconsistentes debido a maniobras de válvulas sin automatización, lo que impedía su uso en el ajuste estadístico. No obstante, fueron empleados para verificar que los rangos máximos y mínimos observados pudieran reproducirse en el modelo bajo el esquema de control automático configurado en EPANET.

La calibración se realizó para el día seleccionado de análisis (23 de octubre de 2024), garantizando la coherencia temporal entre los registros del sistema y la simulación. Esta validación complementaria permitió asegurar que las condiciones extremas de operación, como los máximos de llenado o descarga de los tanques, estuvieran adecuadamente representadas en el modelo calibrado, preservando su representatividad hidráulica sin comprometer la estabilidad global de la simulación.

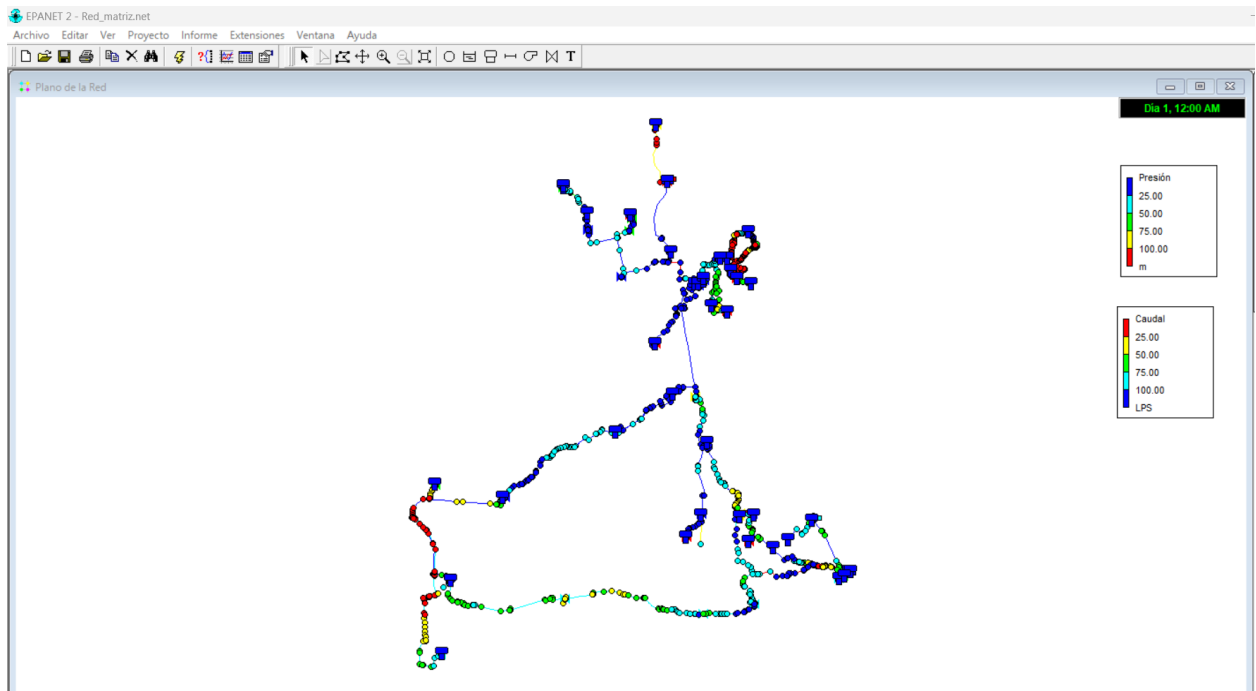
Durante el proceso de calibración se ajustaron parámetros como la rugosidad de las tuberías (coeficiente de Darcy- Weisbach) y los coeficientes de pérdida de carga en válvulas, uniones y accesorios. Estos ajustes se realizaron con el propósito de minimizar la diferencia entre los valores

simulados y los valores medidos en campo. La calibración se llevó a cabo siguiendo el enfoque iterativo propuesto por T. M. Walski et al. (2003), mediante el cual se evalúa progresivamente el impacto de cada parámetro en la respuesta hidráulica hasta alcanzar la convergencia entre el modelo y la realidad operativa.

La calidad de la calibración se evaluó utilizando el Error Estándar (ES) y el porcentaje de desviación media (PDM) entre los valores medidos y simulados de presión y caudal, de acuerdo con las recomendaciones de la American Water Works Association ((AWWA), 2017) y la norma ISO 24516-4:2019 (International Organization for Standardization (ISO), 2019). Estos indicadores permitieron cuantificar la precisión del modelo ajustado y validar su capacidad para reproducir el comportamiento hidráulico del sistema en condiciones normales de operación. La Figura 5 presenta la representación gráfica del modelo hidráulico preliminar desarrollado en EPANET 2.0, incluyendo los principales nodos, enlaces y estructuras del sistema matriz.

**Figura 5.**

*Modelo hidráulico de la red matriz de distribución del amb S.A. E.S.P. en Epanet.*



Nota. Elaboración propia.

### 5.1.3. Integración de datos en tiempo real

El objetivo de esta fase fue mejorar la representatividad del modelo hidráulico mediante la incorporación de condiciones operativas reales, facilitando simulaciones más precisas y actualizadas del comportamiento del sistema. Para ello, se integraron datos en tiempo real provenientes del sistema SCADA operado por amb S.A. E.S.P. directamente dentro del modelo hidráulico previamente calibrado.

La conexión con la base de datos SCADA se realizó mediante consultas estructuradas en SQL, las cuales permitieron acceder a variables operativas relevantes como niveles de tanques, estados de válvulas, presiones y caudales en diferentes puntos de la red matriz de distribución.

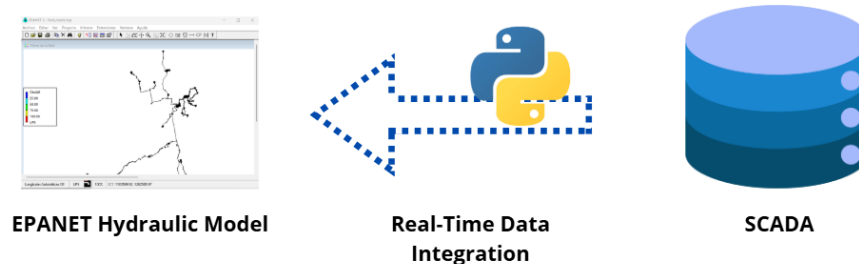
Una vez obtenidos, los datos fueron procesados con scripts desarrollados en Python, donde se empleó la librería *epynet* para interactuar directamente con el modelo hidráulico. Esta librería permitió modificar los archivos de entrada del modelo. *inp*, actualizar condiciones iniciales como niveles de tanque y aperturas de válvulas, y ejecutar simulaciones automáticamente. De esta forma,

el modelo hidráulico se actualizaba dinámicamente según los datos extraídos del sistema SCADA, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de operación.

La Figura 6 presenta el esquema general del proceso de integración entre el sistema SCADA, el script de Python y el modelo hidráulico, mostrando el flujo de datos desde la consulta en SQL hasta la simulación hidráulica.

### Figura 6.

*Modelo de integración de datos en tiempo real al modelo hidráulico*



Nota. Elaboración propia.

#### 5.1.4. Modelo predictivo de consumo y producción

El desarrollo de modelos predictivos de caudal constituyó un componente esencial para la estimación anticipada de la demanda y la producción de agua en el sistema matriz operado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb S.A. E.S.P.).

Para este propósito, se implementaron modelos de RNN con arquitectura Long Short-Term Memory (LSTM), reconocida por su capacidad para modelar dependencias temporales prolongadas en series históricas no lineales (Atashi et al., 2022; Kühnert et al., 2021a; Salem & Abokifa, 2024a)

En total, se desarrollaron treinta (30) modelos predictivos de consumo, correspondientes a los principales tanques de la red matriz, y cuatro (4) modelos adicionales de producción, asociados a los tanques conectados directamente con las plantas de tratamiento de La Flora, Bosconia, Floridablanca y Morro Alto.

Cada modelo fue entrenado individualmente con sus respectivas series históricas de caudal, garantizando la captura de los patrones particulares de comportamiento hidráulico en cada zona de abastecimiento.

La implementación se realizó en Python utilizando la biblioteca TensorFlow, enfocándose en la estimación horaria del caudal de salida desde los tanques hacia los sectores de consumo. El modelo fue entrenado con datos históricos de caudal en litros por segundo extraídos del sistema SCADA del amb S.A. E.S.P., los cuales abarcan un periodo de dos años. Estos registros incluían marcas temporales en formato de fecha y hora con una resolución de cinco minutos, como se muestra en la Tabla 2. Posteriormente, los datos fueron agregados a una escala horaria, con el fin de ajustarse al horizonte de predicción de una hora, requerido por el sistema de optimización desarrollado. Este enfoque coincide con lo planteado por Xu (2024), quien implementó modelos LSTM en TensorFlow para el pronóstico de demanda de agua, demostrando la eficacia de esta biblioteca para manejar series temporales no lineales.

**Tabla 2.**

*Muestra de datos históricos de caudal en el sistema SCADA.*

---

<b>Time_Stamp</b>	<b>Morro_Alto_Caudal_salida_1</b>	<b>P_La_Flora_Caudal_TOT_OUT</b>
-------------------	-----------------------------------	----------------------------------

---

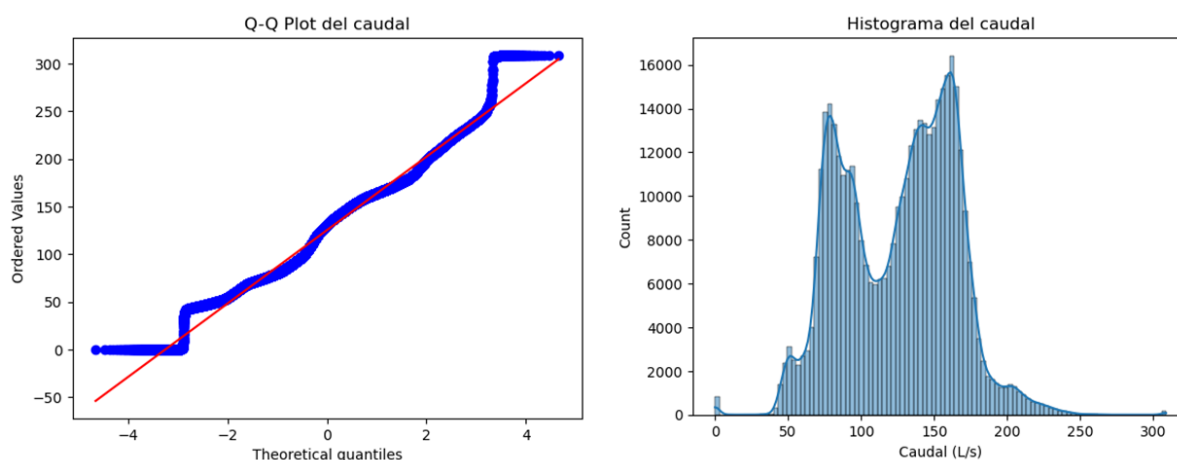
29/06/2023 16:04	150.27	519.13
29/06/2023 16:05	150.27	516.59
29/06/2023 16:06	150.27	512.97
29/06/2023 16:07	150.84	513.06
29/06/2023 16:08	150.84	499.96
29/06/2023 16:09	150.84	623.38
29/06/2023 16:10	150.41	516.04

Nota. Elaboración propia.

Se llevó a cabo un proceso riguroso de limpieza de datos con el fin de garantizar la calidad y confiabilidad de las series temporales de caudal. En primer lugar, se evaluó la normalidad de las series mediante histogramas, curvas de densidad y gráficos Q-Q. La prueba de D'Agostino y Pearson ( $\alpha = 0.05$ ) confirmó la no normalidad de los datos de caudal como se muestra en la Figura 7, en concordancia con lo reportado por Kossieris & Makropoulos (2018).

### Figura 7.

Gráfico Q-Q e histograma para datos de caudal de una zona de consumo.



Nota. Elaboración propia.

Con base en estos resultados, se aplicó el método del rango intercuartílico (IQR) con un coeficiente conservador de 1.0 para identificar outliers por cada combinación de hora del día y tipo de día (0–6). Adicionalmente, se incorporó una variable indicadora de días festivos, asignando el valor de tipo de día 7 a aquellas fechas que correspondían a días festivos oficiales en Colombia. La identificación de los días festivos se basó en el calendario oficial. Estas variables permitieron capturar la influencia de los hábitos sociales y laborales sobre la dinámica de consumo (Romano & Kapelan, 2014)

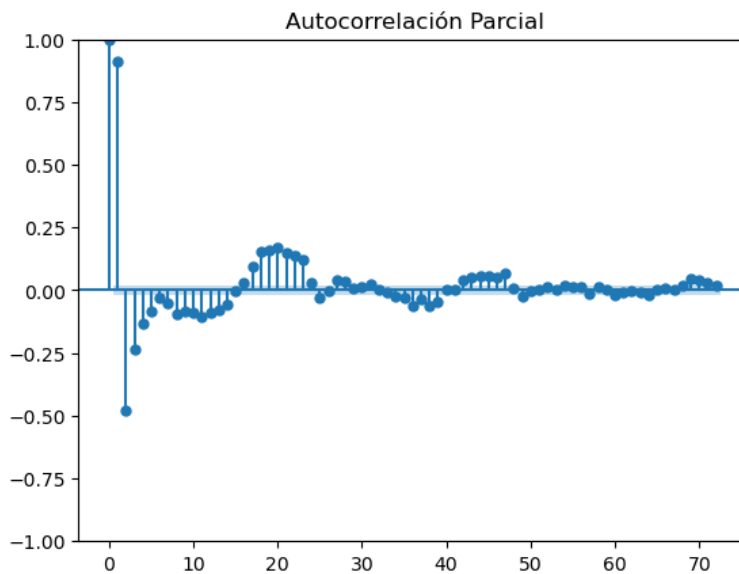
Por otro lado, los registros faltantes fueron tratados mediante una estrategia de imputación basada en la media móvil condicional, calculada a partir de los valores disponibles de los últimos siete días correspondientes a la misma hora y tipo de día (incluyendo la clasificación de festivos). Esta aproximación permitió preservar los patrones cíclicos diarios y semanales característicos del comportamiento del caudal (Flores et al., 2024). En los casos donde no se contaba con suficientes datos históricos para aplicar este criterio, los registros fueron descartados. Esta decisión aseguró que los datos utilizados para el entrenamiento del modelo mantuvieran su coherencia temporal y calidad.

Para la definición de la ventana de entrenamiento, se aplicó un análisis de autocorrelación parcial (PACF) con el fin de identificar el número óptimo de rezagos significativos que influyen en los valores actuales del caudal. Dicho procedimiento se fundamentó en la metodología propuesta por J. Chen & Boccelli (2018) quienes demostraron la utilidad del PACF para capturar dependencias temporales en series de demanda horaria de agua y definir horizontes de predicción adecuados. En este estudio, el análisis evidenció una dependencia temporal importante de hasta 24 horas anteriores, lo que refleja la naturaleza cíclica diaria del sistema, como muestra la Figura 8. Esta información justificó la utilización de los 24 registros previos como entrada del modelo de

predicción, permitiendo capturar de forma adecuada la dinámica horaria sin introducir ruido o redundancia.

### Figura 8.

*Análisis de autocorrelación parcial (PACF) para series horarias de caudal.*



Nota. Elaboración propia

Adicionalmente, se definió una ventana de entrenamiento de 30 días (720 horas) sobre los datos históricos disponibles. Esta longitud permite incorporar tanto los patrones diarios como los semanales del consumo, manteniendo un equilibrio entre la representatividad temporal y la eficiencia computacional del modelo (Tanchangya et al., 2024).

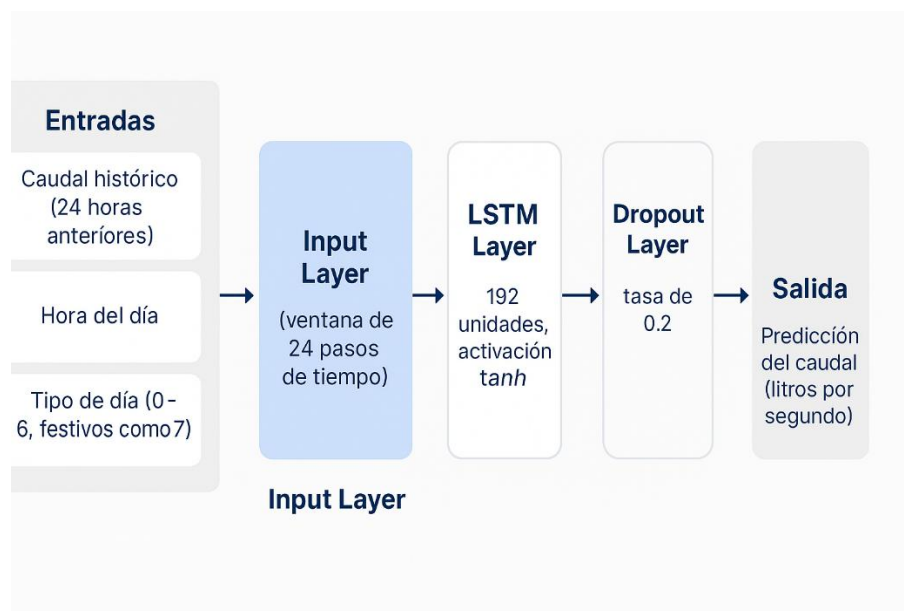
Posteriormente, se normalizaron los datos con la técnica MinMaxScaler para facilitar el aprendizaje de la red neuronal (Pranolo et al., 2024).

La arquitectura del modelo consistió en varias capas como se muestra en la Figura 9. La capa de entrada utilizó una ventana deslizante de 24 pasos de tiempo (look-back), lo que equivalía a las 24 horas previas. Cada paso de tiempo contenía las características escaladas del caudal, la

hora y el día de la semana. La capa LSTM, con 64 unidades y función de activación tangente hiperbólica ( $\tanh$ ), fue encargada de aprender patrones de dependencia temporal a lo largo de la secuencia. Para regularizar el modelo y evitar el sobreajuste, se incluyó una capa Dropout con una tasa de 0.1. Finalmente, la capa Dense consistió en una sola neurona con activación lineal, cuya salida representó la estimación del caudal en la hora requerida.

### Figura 9.

*Arquitectura del modelo de red neuronal para predicción de caudales*



Nota. Elaboración propia.

El modelo fue entrenado utilizando el optimizador Adam y la función de pérdida de error cuadrático medio (MSE). Los datos fueron divididos en un 80% para el entrenamiento y un 20% para la prueba.

Para optimizar la configuración del modelo, se implementó un procedimiento de búsqueda de hiperparámetros mediante un grid search. Este proceso exploró diferentes combinaciones de parámetros como el número de unidades en la capa LSTM (64, 128, 192), la cantidad de épocas de entrenamiento (50, 300, 400), la tasa de Dropout (0.1, 0.2, 0.3) y el tamaño del batch (16, 32,

64). Para cada combinación, el modelo fue entrenado y evaluado utilizando el MSE en el conjunto de prueba. De todas las combinaciones, la configuración que mostró el mejor desempeño consistió en 64 unidades en la capa LSTM, 400 épocas, una tasa de Dropout de 0.1 y un tamaño de batch de 64. Este planteamiento es coherente con trabajos recientes que aplican LSTM en demanda horaria de agua y exploran hiper-parámetros similares (Wang et al., 2024).

## **5.2. Fase 2: Optimización del tiempo de bombeo de la estación Bosconia por medio de algoritmos genéticos en la operación de la red matriz de distribución.**

La Fase 2 de la investigación se enfocó en la optimización del tiempo de bombeo de la estación Bosconia, mediante la aplicación de algoritmos genéticos (GA) integrados con el modelo hidráulico calibrado del sistema matriz de distribución del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb S.A. E.S.P.).

Los algoritmos genéticos fueron seleccionados por su eficacia en la resolución de problemas de optimización no lineales, con múltiples variables y restricciones hidráulicas, características típicas de los sistemas de distribución de agua (Farmani et al., 2005; Savic & Walters, 1997).

El modelo fue implementado en lenguaje Python, aprovechando su interoperabilidad con el simulador hidráulico EPANET a través de la librería epynet. Esta integración permitió ejecutar simulaciones hidráulicas automáticas en cuasi-tiempo real, ajustando los parámetros de operación según las condiciones dinámicas del sistema y los resultados de las generaciones evolutivas.

El modelo genético fue configurado considerando las condiciones operativas reales, las restricciones hidráulicas y la necesidad de evaluar el desempeño del sistema en cuasi-tiempo real.

En esta etapa se definieron como variables críticas de decisión:

- El estado horario de las bombas (encendidas o apagadas).
- El grado de apertura de válvulas estratégicas del sistema de abastecimiento.

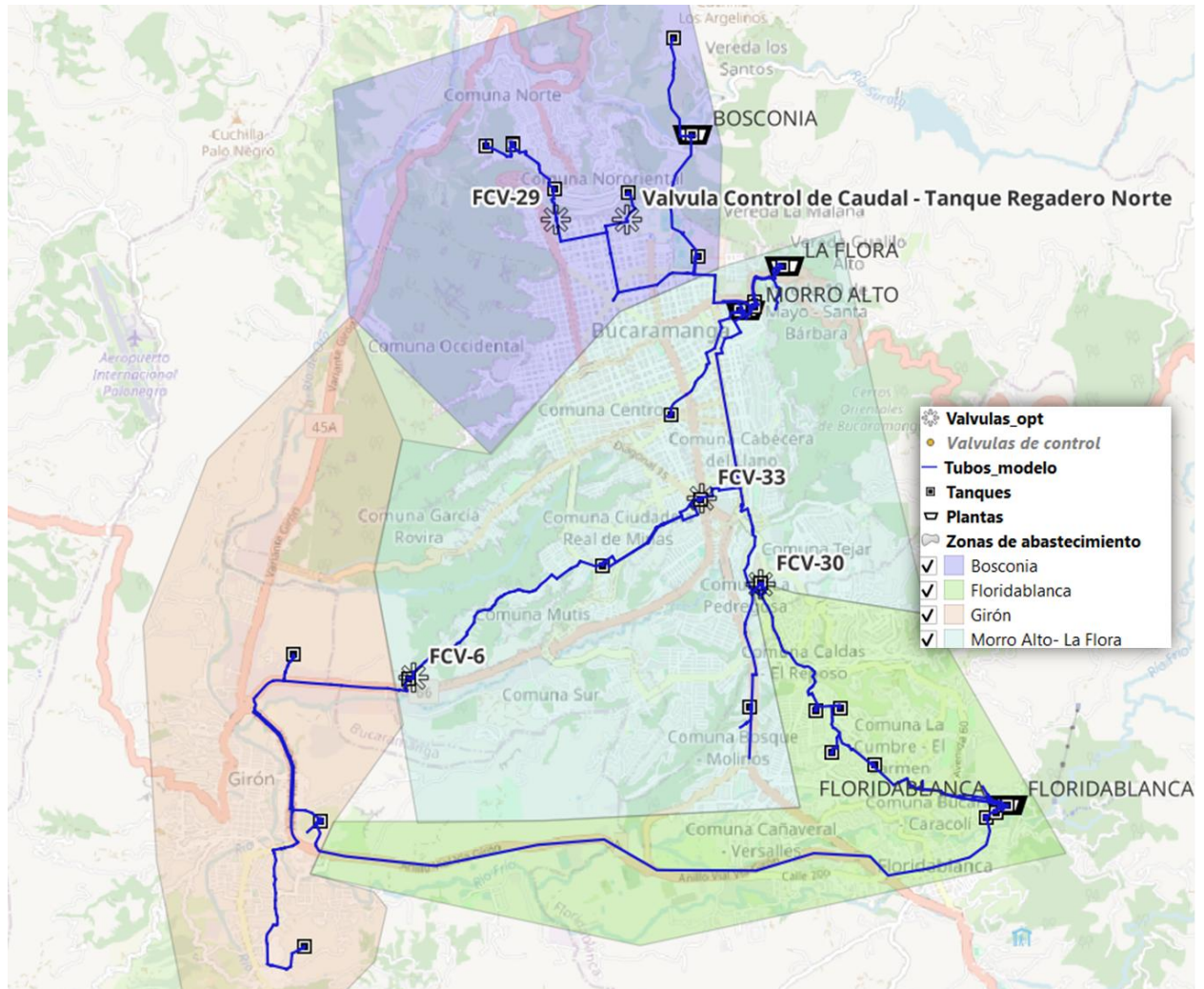
### ***5.2.1 Selección de variables de control***

Con base en entrevistas técnicas sostenidas con los operadores del sistema y el análisis de la topología hidráulica, se identificaron cinco válvulas como elementos críticos para la operación. Estas válvulas están ubicadas en los puntos de conexión entre las zonas de abastecimiento de cada una de las plantas de tratamiento del amb S.A. E.S.P., actuando como interfaces de control entre sectores hidráulicamente semi-independientes como se muestra en la Figura 10. Las válvulas seleccionadas fueron:

- FCV-6: Entrada a la zona de San Juan.
- FCV-30: Entrada desde Morro hacia malpaso.
- FCV-33: Entrada a Puerta del Sol.
- FCV-29: Conexión hacia Bienestar.
- Válvula de Control de Caudal - Tanque Regadero Norte.

**Figura 10.**

*Mapa de válvulas seleccionadas y zonas de abastecimiento en el sistema de distribución del acueducto metropolitano de Bucaramanga.*

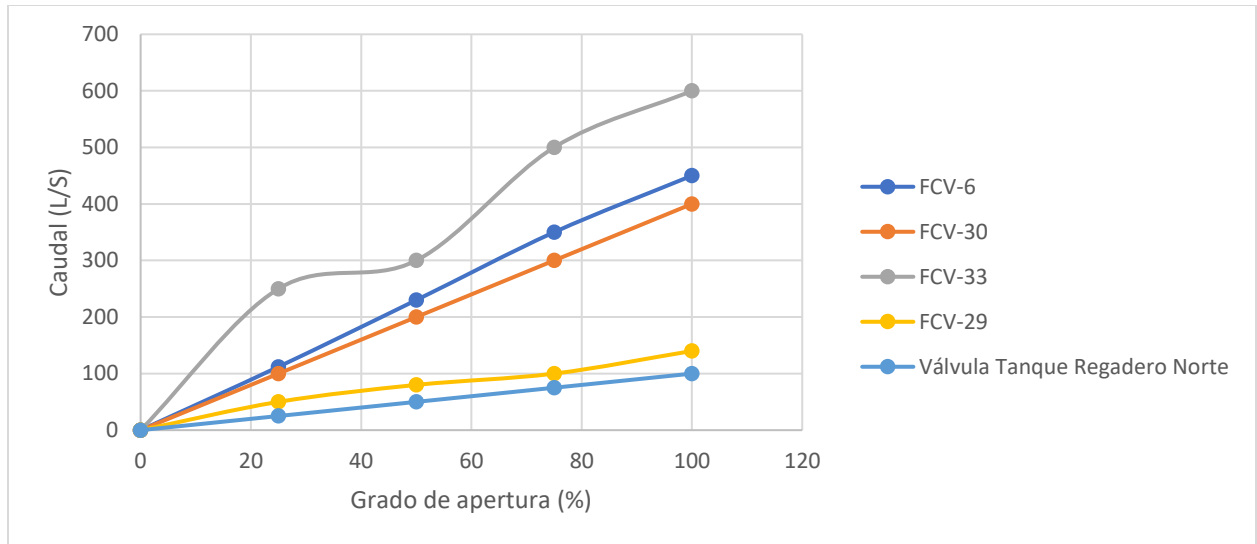


Nota. Catastro del amb S.A. E.S.P.

Cada una de estas válvulas fue modelada con cinco posibles grados de apertura discretos: 0%, 25%, 50%, 75% y 100%, equivalentes a los siguientes caudales característicos según la curva de operación calibrada como se muestra en la Figura 11.

**Figura 11.**

*Curva de operación para las válvulas reguladoras de caudal seleccionadas.*



Nota. Elaboración propia.

Esta discretización permitió reducir la dimensionalidad del problema, facilitando la codificación de las soluciones dentro del algoritmo genético mediante una representación entera del vector de decisión, como muestra la Ecuación 3.

$$x = [Sv1, Sv2, Sv3, Sv4, Sv5, b1, b2]$$

### Ecuación 3

donde  $Svi \in \{0,1,2,3,4\}$  corresponde al grado de apertura de la válvula  $i$ , y  $bj \in \{0,1\}$  representa el estado de la bomba  $j$  (apagada o encendida).

### 5.2.2 Restricciones operativas

De acuerdo con el personal técnico de las áreas de distribución y mantenimiento del amb S.A. E.S.P, se definieron las siguientes restricciones operativas, incorporadas en la función objetivo como condiciones de penalización:

1. Las bombas deben operar por períodos continuos mínimos de una hora para evitar ciclos de arranque/parada que comprometan su vida útil.
2. No pueden operar más de dos bombas simultáneamente, debido a limitaciones eléctricas y de capacidad hidráulica.
3. En todo momento, los tanques deben mantener niveles superiores a los mínimos operativos, asegurando la continuidad del suministro y evitando el vaciado total, así como la pérdida de presión en la red.

Las violaciones a estas condiciones fueron penalizadas dentro de la función objetivo, asignando penalizaciones proporcionales a la severidad de la infracción, en concordancia con las prácticas recomendadas para optimización con restricciones (Deb, 2001).

A partir de la codificación del vector de decisión definida en la Sección 5.2.1 (Ecuación 3), ciertas restricciones operativas fueron garantizadas estructuralmente durante la generación de individuos del algoritmo genético, de modo que no requieren penalizaciones explícitas. En particular:

- Tiempo mínimo de operación (1 h): la discretización temporal y la generación de cromosomas se hicieron en pasos horarios; por tanto, el estado de cada bomba sólo puede cambiar una vez por hora. Esto impide el encendido/apagado dentro del mismo intervalo horario y garantiza el período mínimo de operación.

- Máximo de bombas simultáneas ( $\leq 2$ ): la representación del vector de decisión incluye únicamente las variables binarias  $b_1$  y  $b_2$  que representan el estado de las bombas disponibles. Dado que no existen más variables binarias de bomba en el cromosoma, la activación de más de dos bombas está estructuralmente prevenida.

Esta implementación “por diseño” reduce la necesidad de penalizaciones para esas dos restricciones y facilita la generación de soluciones factibles desde la etapa de montaje inicial de la población.

Las restricciones que dependen de la respuesta hidráulica del sistema (niveles mínimos de tanques y presiones en la red) no pueden garantizarse únicamente por la codificación del cromosoma y, por tanto, se evaluaron mediante la función de aptitud. Para cada individuo candidato, la simulación hidráulica calcula caudales, niveles de tanque y presiones; si se detectan violaciones, se aplican penalizaciones que incrementan el valor de la función objetivo a minimizar. Se definieron las penalizaciones numéricas como muestra la Tabla 3.

**Tabla 3.**

*Penalizaciones por violación hidráulica aplicadas en la función de aptitud.*

<i>Tipo de infracción</i>	<i>Criterio de detección</i>	<i>Fórmula de penalización</i>	<i>Descripción</i>
<i>Presión fuera de rango / desviación de caudal</i>	Nodo o válvula con presión o caudal fuera del rango operativo en cualquier paso de la simulación hidráulica	$Pq = 100 \times Nq, step$	Se aplica una penalización de <b>100 unidades</b> por cada nodo o válvula que presente presión o caudal fuera del rango permisible en un paso de cálculo. El valor total de (Pq) corresponde a la suma de penalizaciones acumuladas en todos los pasos de simulación.
<i>Nivel de tanque inferior al mínimo operativo</i>	Tanque con nivel actual $H_t < H_{min}$ en cualquier paso de la simulación hidráulica	$Ph = 5000 \times Nh, step$	Se aplica una penalización de <b>5000 unidades</b> por cada tanque cuyo nivel se encuentre por debajo del mínimo operativo durante un paso de simulación.

El valor total de (Ph) se obtiene sumando las penalizaciones acumuladas en todos los pasos de simulación.

Nota. Elaboración propia.

### ***5.2.3 Configuración del algoritmo genético***

El algoritmo genético se formuló con el propósito de minimizar el tiempo de bombeo total, penalizando soluciones que no cumplieran las restricciones hidráulicas.

La estructura del modelo se describe a continuación:

Modelo base: Se utilizó el modelo hidráulico calibrado desarrollado en la Fase 1 como entorno de simulación, sobre el cual se aplicaron las configuraciones de válvulas y bombas propuestas por el algoritmo.

Condiciones iniciales:

- En cada intervalo horario, el modelo se actualizó con las condiciones hidráulicas resultantes de la iteración anterior.
- El nivel inicial de los tanques correspondió al valor medido en el sistema SCADA a la hora 0, y los niveles siguientes se obtuvieron a partir de los resultados aplicando la configuración óptima obtenida.
- La demanda y producción fueron actualizadas según las predicciones obtenidas con los modelos de redes neuronales recurrentes (RNN) implementados en la Fase 1.
- Simulación hidráulica: Cada evaluación del algoritmo se ejecutó en modo de período extendido con un horizonte de una hora y pasos de cálculo de 25 minutos, valor determinado tras pruebas de sensibilidad que equilibraron precisión y costo computacional.

Población inicial:

- Se generaron 50 individuos únicos utilizando una estrategia de generación diversificada, que garantiza variabilidad sin redundancias.
- Cada individuo representa una combinación factible de estados de válvulas y bombas.

Operadores genéticos:

- Selección: método de torneo estocástico con tamaño 3, que promueve la supervivencia de individuos con menor valor de fitness (Mitchell, 1996).
- Cruzamiento: uniforme, con probabilidad  $p_c = 0.9$  para favorecer la recombinación efectiva de genes.
- Mutación: adaptativa, decreciendo de acuerdo con la generación  $g$ , de acuerdo con la Ecuación 4.

$$P_m = 0.1 \left(1 - \frac{g}{2G}\right)$$

#### **Ecuación 4**

donde  $G=200$  es el número máximo de generaciones.

- Elitismo: se conservó el 4 % de los mejores individuos en cada generación.

Función objetivo:

La función de aptitud  $f(x)$  se definió como:

$$f(x) = 100Nb + 100 + Pq + Ph - 10R$$

#### **Ecuación 5**

Donde:

- $N_b$  es el número de bombas encendidas,
- $P_q$  la penalización por desviación de caudal en válvulas y presiones fuera de rango,
- $P_h$  la penalización por niveles bajo el mínimo,
- $R$  la resiliencia media de los tanques, calculada como la diferencia promedio entre el nivel real y el mínimo permitido (Todini, 2000).

En la Ecuación 5, los coeficientes asociados a cada término fueron definidos con base en criterios de escala y severidad de las infracciones dentro del contexto operativo del sistema. El

valor 100 asignado al número de bombas encendidas representa un peso relativo moderado, equivalente al costo energético y operativo asociado al encendido de una bomba por hora. El mismo coeficiente se emplea para las penalizaciones de desviación de caudal o presión, reflejando la magnitud de impacto de dichas desviaciones en la estabilidad hidráulica. Por otro lado, el coeficiente 5000 aplicado a los niveles de tanque inferiores al mínimo expresa la gravedad de una condición que podría comprometer la continuidad del servicio, asignándole una penalización significativamente mayor. Finalmente, se introduce un incentivo a la resiliencia hidráulica del sistema, promoviendo soluciones que mantengan niveles de tanque superiores al mínimo operativo.

Adicionalmente, se estableció un valor base de 100 unidades en la función de aptitud para evitar la obtención de valores negativos durante el proceso evolutivo, garantizando una correcta evaluación y comparación entre individuos. Estos coeficientes no fueron ajustados mediante pruebas de sensibilidad, sino definidos de forma empírica a partir de consideraciones técnicas y experiencia operativa, asegurando una diferenciación clara entre penalizaciones leves (presión y caudal fuera de rango) y penalizaciones críticas (nivel de tanque bajo el mínimo).

El proceso evolutivo se detuvo tras 200 generaciones o cuando no se observaron mejoras en la aptitud mínima durante 20 generaciones consecutivas, criterio ampliamente empleado en la literatura de optimización evolutiva (Farmani et al., 2005).

#### ***5.2.4 Ejecución iterativa y acoplamiento temporal***

Una vez completado el proceso evolutivo, se obtuvo la configuración óptima de operación, es decir, el conjunto de bombas encendidas y aperturas de válvulas correspondiente al intervalo horario analizado.

Los niveles finales de los tanques resultantes de la simulación hidráulica se utilizaron como condiciones iniciales para el siguiente intervalo, estableciendo así un proceso iterativo y encadenado que permite reproducir el comportamiento operativo del sistema a lo largo de un horizonte de 24 horas.

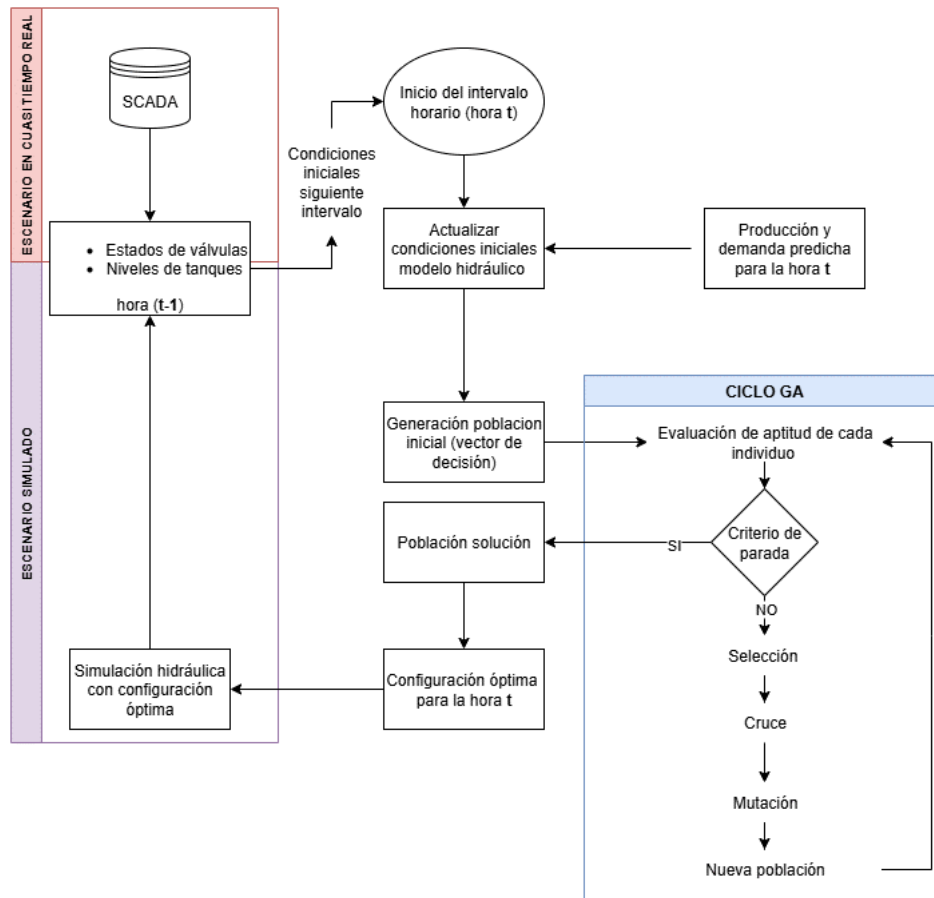
En este enfoque, cada intervalo horario depende directamente de los resultados hidráulicos del paso anterior, garantizando la coherencia temporal y la conservación de las condiciones físicas entre etapas consecutivas.

Este procedimiento fue implementado dentro del entorno simulado, donde las condiciones iniciales (niveles de tanque y estados de válvulas) se derivan de los resultados de la simulación previa. Sin embargo, en un escenario operativo en cuasi-tiempo real, estas condiciones iniciales provendrían directamente del sistema SCADA, el cual suministraría en cada hora los niveles medidos y los estados reales de las válvulas, sirviendo como punto de partida para la optimización del siguiente intervalo.

Este acoplamiento entre simulación y datos en tiempo real permitiría la aplicación práctica del esquema propuesto, manteniendo la consistencia hidráulica entre intervalos sucesivos y posibilitando una optimización continua de la operación del sistema, tal como se muestra en la Figura 12.

**Figura 12.**

*Diagrama de flujo del algoritmo de optimización.*



Nota. Elaboración propia.

### 5.2.5 Prueba de sensibilidad y ajuste de parámetros

Antes de la ejecución final, se realizó un análisis de sensibilidad sobre los principales parámetros del algoritmo genético (tamaño de población, número de generaciones, probabilidades de cruzamiento y mutación).

Se probaron combinaciones de:

- Tamaño de población: 30 a 100 individuos
- Criterio de parada (generaciones sin mejora): 10 a 30
- Probabilidad de cruzamiento: 0.6 a 0.9

- Probabilidad de mutación: 0.01 a 0.1

El conjunto final seleccionado correspondió a 50 individuos, un criterio de parada de 20 generaciones,  $p_c=0.9$  y una mutación adaptativa inicial de  $p_m= 0.05$ , al demostrar la mejor convergencia y estabilidad numérica.

Este proceso aseguró que el algoritmo mantuviera diversidad genética suficiente para explorar el espacio de soluciones sin converger prematuramente, manteniendo un equilibrio entre exploración y explotación (Deb, 2001).

### **5.3. Fase 3: Evaluación de los costos de bombeo actuales y optimizados para un día de operación**

La tercera fase de la investigación se enfocó en la evaluación comparativa de los costos energéticos de bombeo de la estación Bosconia bajo dos escenarios operativos:

- (i) la operación actual del sistema, basada en la programación manual de bombas, y
- (ii) la operación optimizada, derivada del modelo de algoritmos genéticos desarrollado en la Fase 2.

El propósito de esta fase fue cuantificar el impacto económico de la optimización del tiempo de bombeo, traduciendo los resultados hidráulicos obtenidos en indicadores de costo energético. El análisis se realizó para un ciclo operativo de 24 horas correspondiente al 23 de octubre de 2024, fecha seleccionada por presentar condiciones representativas de operación en la red matriz, tanto en términos de demanda, niveles de almacenamiento y régimen de bombeo.

Este día se escogió porque:

- No presentó eventos atípicos como mantenimientos, fallas de equipos, cambios operativos extraordinarios o interrupciones del servicio.

- Reflejó un comportamiento de consumo estable y típico de día hábil, sin variaciones propias de fines de semana o festivos.
- Los niveles de los tanques y los caudales de entrada/salida fueron consistentes con los promedios mensuales del periodo de análisis.
- Contó con un registro de datos SCADA completo y sin vacíos, lo que permitió construir una simulación confiable.

### ***5.3.1. Recopilación de datos de referencia***

El punto de partida del análisis fue la recopilación de la información horaria de niveles de tanques, estados de bombas y válvulas, y tiempos efectivos de operación durante la jornada seleccionada.

Estos datos se obtuvieron a partir del sistema SCADA del amb S.A. ESP, complementados con registros de consumo energético y reportes operativos suministrados por el área de mantenimiento.

El modelo hidráulico calibrado fue inicializado con los niveles de tanques medidos a la hora 00:00 del 23 de octubre de 2024, garantizando la coherencia entre los escenarios comparados.

A partir de esta condición inicial, se ejecutaron dos simulaciones paralelas:

- Escenario base: operación real del sistema durante el día analizado.
- Escenario optimizado: operación simulada resultante del algoritmo genético ejecutado en la Fase 2, con configuraciones horarias de bombas y válvulas determinadas automáticamente.

### ***5.3.2. Estimación de los costos de bombeo***

El cálculo de los costos de bombeo se basó en el tiempo total de operación horaria de las bombas.

De acuerdo con la información suministrada por el área de mantenimiento del amb S.A. ESP, el costo promedio de operación por bomba encendida se estimó en 1.400.000 COP/hora para el año 2024, valor que incluye el consumo eléctrico, mantenimiento asociado y depreciación operativa de los equipos, sin discriminar los valores individuales de cada componente.

De este modo, el costo total de bombeo  $C_t$  se calculó mediante la expresión:

$$C_t = \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^{nb} (E_{i,h} \times Chora)$$

**Ecuación 6**

Donde:

- $E_{i,h} = 1$  si la bomba  $i$  está encendida en la hora  $h$ , y  $E_{i,h} = 0$  en caso contrario.
- $Chora = 1.400.000 \frac{COP}{h}$
- $nb$  es el número total de bombas de la estación Bosconia (dos unidades).

El resultado de la simulación optimizada permitió conocer, para cada hora, el número de bombas en operación ( $Nbombas, h$ ), con lo cual el costo total diario de bombeo se determinó como:

$$Cdía = \sum_{h=1}^{24} Nbombas, h \times 1.400.000$$

**Ecuación 7**

En el caso del escenario base, los valores de  $Nbombas, h$  se tomaron de los registros reales del sistema SCADA correspondientes al mismo día de análisis.

### 5.3.3. Comparación de escenarios

Con los costos horarios calculados para ambos escenarios, se elaboró un análisis comparativo orientado a cuantificar el ahorro económico potencial derivado de la optimización.

El ahorro porcentual diario se calculó como:

$$A\% = \frac{C_{actual} - C_{opt}}{C_{actual}} \times 100$$

### **Ecuación 8**

Donde:

- *C<sub>actual</sub>*: costo total de bombeo bajo la operación convencional.
- *C<sub>opt</sub>*: costo total de bombeo bajo la simulación de operación optimizada.

El análisis permitió construir una serie temporal de costos horarios, a partir de la cual se elaboraron gráficos de comparación entre el consumo energético actual y el optimizado.

## **6. Resultados de discusión**

### **6.1 Desarrollo del modelo hidráulico calibrado con conexión en tiempo real**

La primera fase de la investigación constituyó el pilar técnico sobre el cual se estructuraron las etapas posteriores de optimización y evaluación económica. En esta fase se desarrolló un modelo hidráulico calibrado del sistema matriz de distribución del amb S.A. E.S.P., con capacidad de actualización en tiempo real mediante conexión con el sistema SCADA institucional. Los resultados obtenidos demostraron la factibilidad técnica de acoplar la modelación hidráulica tradicional con sistemas de adquisición y análisis de datos en tiempo real, integrando además modelos predictivos basados en inteligencia artificial para la estimación dinámica de consumo y producción.

#### **6.1.1. Evaluación del modelo hidráulico calibrado**

El modelo hidráulico calibrado permitió reproducir de manera satisfactoria el comportamiento hidráulico global de la red matriz del amb S.A. E.S.P., bajo condiciones reales de operación.

Los indicadores estadísticos de ajuste evidenciaron un Error Estándar (ES) promedio del 7.5 % para caudal y 7.7 % para presión, con un Porcentaje de Desviación Media (PDM) global del 7.6 % y coeficientes de determinación superiores a  $R^2 = 0.92$  (ver Tabla 4). Estos valores se encuentran dentro de los límites establecidos por la American Water Works Association ((AWWA), 2017) y la norma ISO 24516-4:2019 (International Organization for Standardization (ISO), 2019), que recomiendan márgenes de  $\pm 10\%$  como umbral aceptable para considerar un modelo hidráulico calibrado y representativo.

**Tabla 4.**

*Resultados de calibración del modelo hidráulico – Indicadores estadísticos.*

<i>Variable</i>	<i>N° de sensores usados</i>	<i>Rango medido</i>	<i>Error estándar (ES)</i>	<i>PDM (%)</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
<i>Presión (m.c.a.)</i>	3	35 – 58	3.4	7.7	0.93
<i>Caudal (L/s)</i>	17	145 – 620	22.8	7.5	0.92
<i>Global del modelo</i>	<b>20</b>	—	—	<b>7.6</b>	<b>0.92</b>

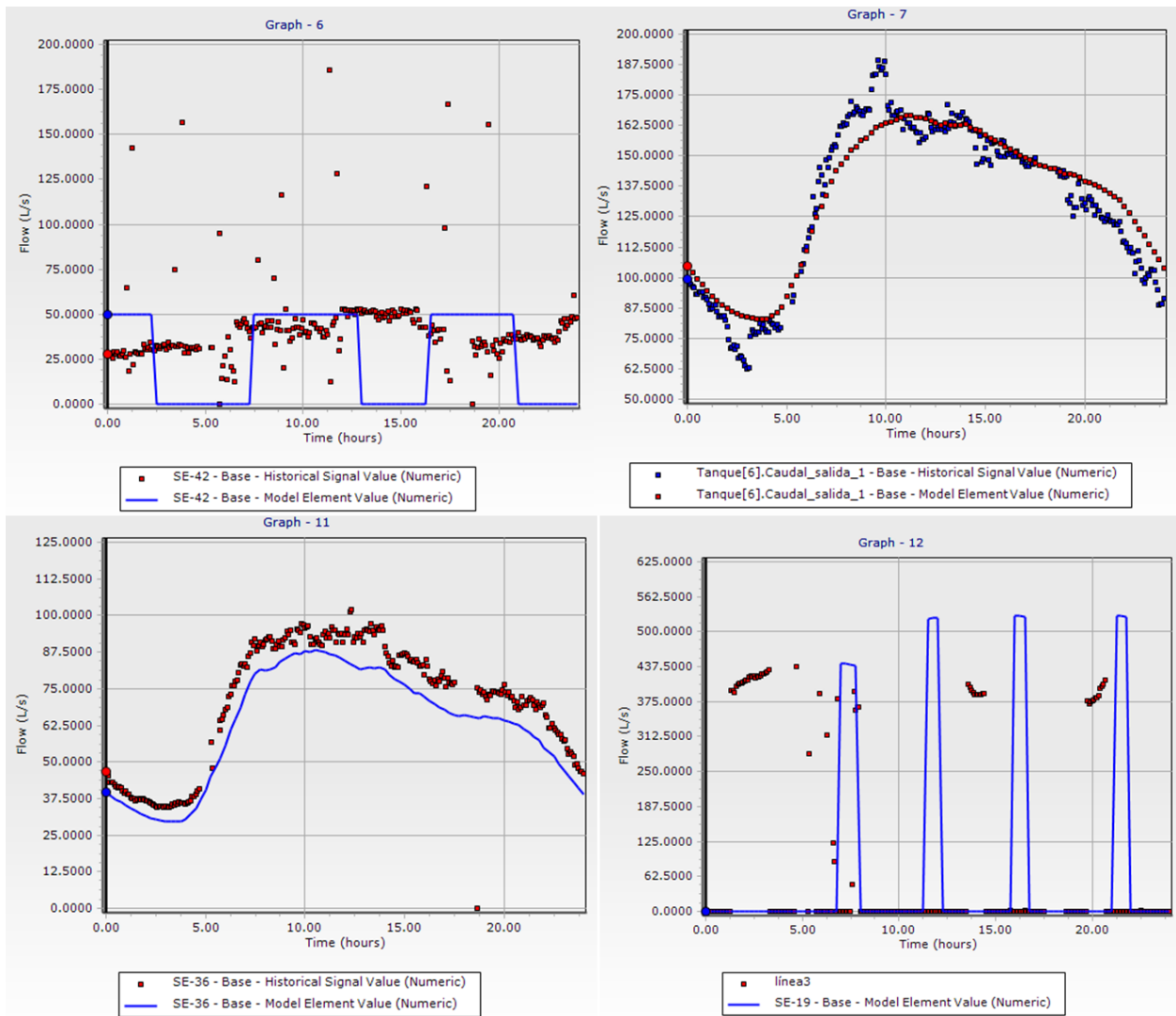
Nota. Elaboración propia.

Durante las simulaciones extendidas se observó que el modelo replicó con precisión los procesos de llenado y vaciado de tanques, la respuesta dinámica de válvulas reguladoras ante variaciones de presión, y la secuencia de encendido y apagado de bombas, evidenciando una estabilidad numérica adecuada y una consistencia física entre las variables dependientes (Ezio & A, 2013).

Estos comportamientos fueron contrastados con los registros históricos de SCADA, donde se verificó que las fluctuaciones de presión y caudal durante los periodos de alta y baja demanda presentaban una alta correlación con las curvas simuladas como muestra la Figura 13.

**Figura 13.**

*Comparación entre caudales medidos y simulados en puntos de calibración y de verificación cualitativa.*

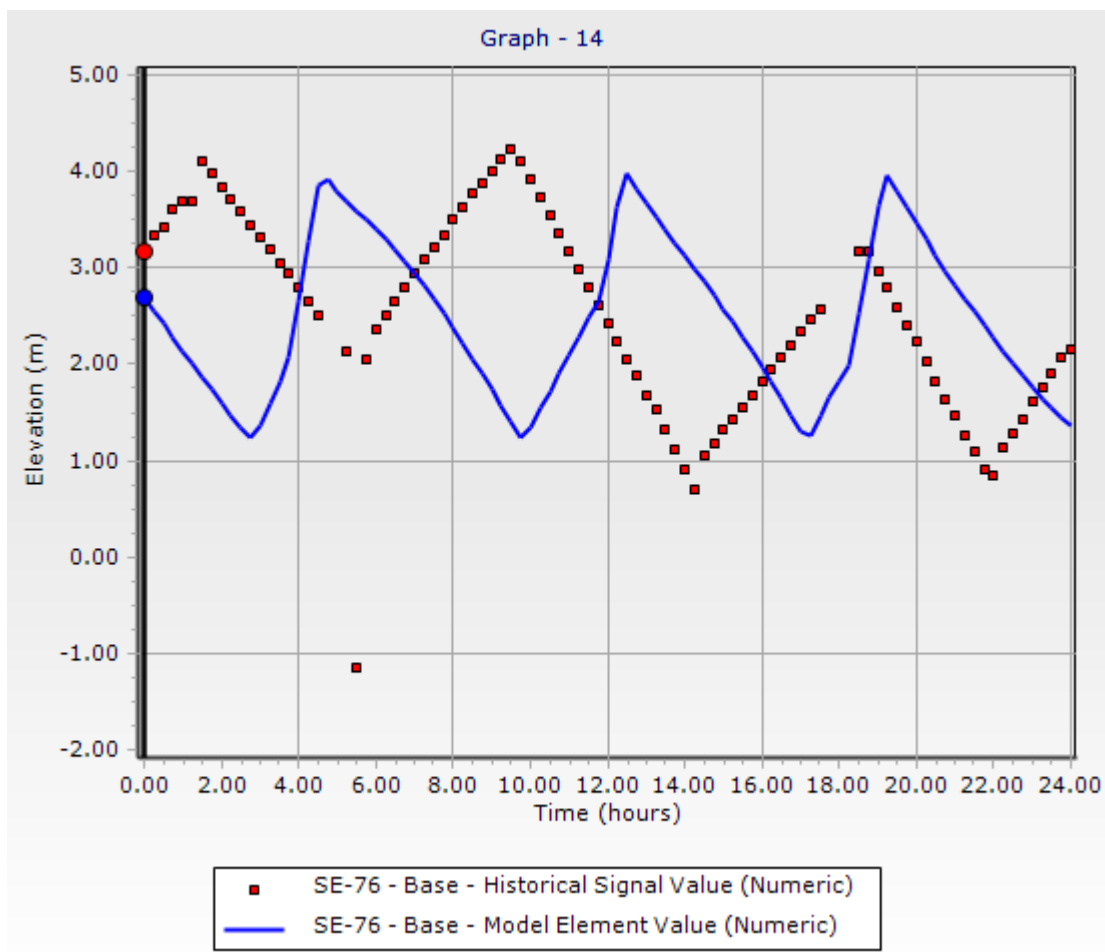


Nota. Elaboración propia.

La validación operativa se complementó verificando que los niveles simulados de los tanques se mantuvieran dentro de los rangos de oscilación reales reportados por los sensores SCADA como muestra la Figura 14. El modelo reprodujo fielmente los ciclos de llenado y vaciado controlados por flotadores virtuales, confirmando la correcta configuración de los controles hidráulicos en EPANET y la coherencia entre la simulación y la operación real del sistema (Eliades et al., 2017; T. M. Walski, 2017).

**Figura 14.**

*Comparativo de comportamiento de tanques del modelo y los niveles reales del sistema SCADA del amb S.A. E.S.P. para el día de análisis.*



Nota. Elaboración propia.

El modelo calibrado demostró alta confiabilidad, estabilidad numérica y representatividad física, consolidándose como una herramienta robusta para el análisis operativo del sistema matriz. Su precisión estadística y coherencia dinámica justifican su uso como base para el desarrollo del modelo de optimización mediante algoritmos genéticos implementado en la Fase 2.

### ***6.1.2. Integración de datos en tiempo real***

La integración de datos en tiempo real entre el modelo hidráulico y el sistema SCADA del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB S.A. E.S.P.) representó un avance significativo en la representación dinámica del comportamiento de la red matriz.

Este proceso permitió establecer un flujo de información bidireccional entre la base de datos operacional y el modelo hidráulico, garantizando que las simulaciones reprodujeran las condiciones reales de operación con una latencia mínima (inferior a 5 minutos).

Desde el punto de vista funcional, el sistema desarrollado en Python, basado en consultas SQL y la librería *epynet*, logró actualizar automáticamente las condiciones iniciales de los elementos del modelo (niveles de tanques, aperturas de válvulas, estados de bombas y presiones de referencia). De esta manera, el modelo calibrado dejó de ser una herramienta estática de simulación para convertirse en un gemelo digital operativo, capaz de replicar el estado hidráulico del sistema de distribución en tiempo casi real. Esta integración coincide con los lineamientos de digitalización propuestos por Zechman et al. (2023) y T. M. Walski (2017) quienes destacan que los modelos hidráulicos conectados con plataformas SCADA permiten reducir la incertidumbre operacional y mejorar la toma de decisiones mediante análisis predictivos.

Una de las principales ventajas de la actualización periódica de las condiciones de frontera es la reducción de la divergencia temporal entre el modelo y el sistema real, al incorporar continuamente los valores medidos de niveles, caudales y presiones (Shao et al., 2019). Según esta sincronización de estados permite mantener el modelo dentro de un rango de error aceptable durante largas ventanas de simulación, evitando la degradación progresiva de las condiciones iniciales que se observa en los modelos estáticos (Huang et al., 2022).

Asimismo, la disponibilidad de datos en tiempo real posibilita la detección temprana de desviaciones anómalas, como caídas abruptas de presión o sobrellenado de tanques, lo que constituye un insumo clave para la operación preventiva (Boulos et al., 2014). Al retroalimentar el modelo con mediciones actualizadas, se mejora la robustez del sistema frente a eventos transitorios y variaciones de demanda, favoreciendo la estabilidad hidráulica global (Bin Mahmoud et al., 2023)

Adicionalmente, la automatización de la conexión permitió ejecutar simulaciones programadas de 24 horas de duración sin intervención manual, validando el correcto desempeño del motor de simulación y la estabilidad numérica de los controles hidráulicos implementados (particularmente los controles de nivel tipo flotador y las válvulas reguladoras de caudal). Esta capacidad de simulación continua constituye un paso esencial hacia la operación basada en modelos (model-based operation), un enfoque que ha sido adoptado exitosamente por utilities en Europa y Asia como herramienta de optimización energética y gestión de resiliencia (Bin Mahmoud et al., 2023; Boulos et al., 2014).

### 6.1.3 Modelo predictivo de consumo y producción

El desarrollo de los modelos predictivos basados en redes neuronales LSTM permitió estimar el comportamiento horario del caudal de salida de los tanques del sistema matriz del amb S.A. E.S.P. con un alto grado de precisión y estabilidad temporal. Estos modelos fueron evaluados con datos de validación independientes, correspondientes a un periodo de un mes no incluido en el entrenamiento (octubre de 2024), con el fin de verificar su capacidad de generalización frente a condiciones operativas reales.

Durante la fase de validación, los modelos mostraron un comportamiento robusto en la predicción de los patrones diarios de consumo y producción. Los resultados cuantitativos se resumen en la Tabla 5, donde se presentan los principales indicadores estadísticos: el Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ). Los valores obtenidos evidencian una precisión adecuada para aplicaciones operativas, con errores promedio menores al 6 % y coeficientes de determinación superiores a 0.93, valores consistentes con los reportados en estudios similares de modelación de demanda urbana (Kühnert et al., 2021b; Salem & Abokifa, 2024b).

**Tabla 5.**

*Resultados estadísticos de desempeño de los modelos LSTM de predicción de caudal.*

<b>Tanque</b>	<b>RMSE (%)</b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>BAHONDO</b>	5.2	0.93
<b>BELLAVISTA</b>	6.1	0.92
<b>BETANIA</b>	4.8	0.94
<b>BIENESTAR</b>	7.4	0.91
<b>BOSCONIA</b>	6.7	0.93
<b>BUCARICA</b>	7.9	0.91
<b>CAMPO MADRID</b>	5.4	0.94
<b>CARACOLÍ</b>	6.3	0.92
<b>CAÑAVERAL</b>	7.8	0.91

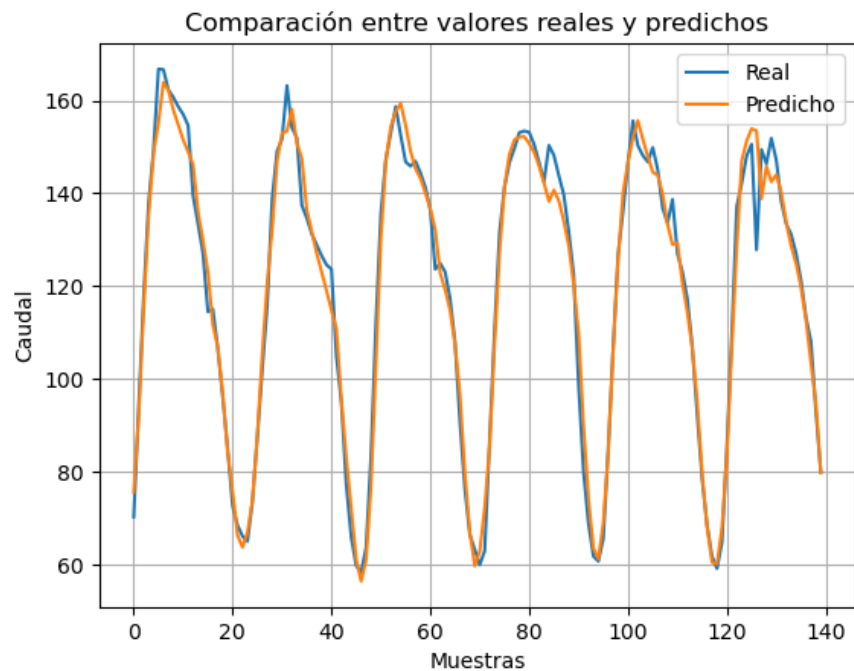
<b>CENTRO</b>	4.7	0.94
<b>ESTADIO</b>	5.1	0.94
<b>FERROVÍAS</b>	5.6	0.93
<b>FLORIDABLANCA</b>	6.9	0.92
<b>FLORIDABLANCA CIRCULAR</b>	6.0	0.93
<b>GIRÓN MAYOR</b>	6.4	0.92
<b>LA ESMERALDA</b>	4.9	0.94
<b>LA FLORA</b>	8.1	0.91
<b>LA IGLESIA</b>	6.0	0.93
<b>LOS ANGELINOS</b>	5.7	0.93
<b>MALPASO</b>	6.8	0.92
<b>MORRO ALTO</b>	5.5	0.94
<b>MORRO BAJO</b>	5.3	0.94
<b>NORTE ALTO</b>	4.6	0.95
<b>NORTE BAJO</b>	5.0	0.94
<b>PUERTA DEL SOL</b>	6.3	0.93
<b>REGADERO NORTE</b>	4.2	0.95
<b>SAN JUAN</b>	6.2	0.93
<b>VILLABEL ALTO</b>	5.4	0.94
<b>VILLABEL BAJO</b>	5.9	0.93
<b>ZAPAMANGA</b>	7.1	0.92
<b>Promedio general</b>	<b>5.9</b>	<b>0.93</b>

Nota. Elaboración propia.

En la Figura 15 se muestra la comparación temporal entre los caudales medidos y los estimados por el modelo para el tanque Morro Alto, representativo del comportamiento general del sistema. Se observa una coincidencia notable en los picos de demanda matutinos y vespertinos, así como en los periodos de bajo consumo nocturno.

**Figura 15.**

*Comparación entre caudal medido y predicho por el modelo LSTM – Tanque Morro Alto.*



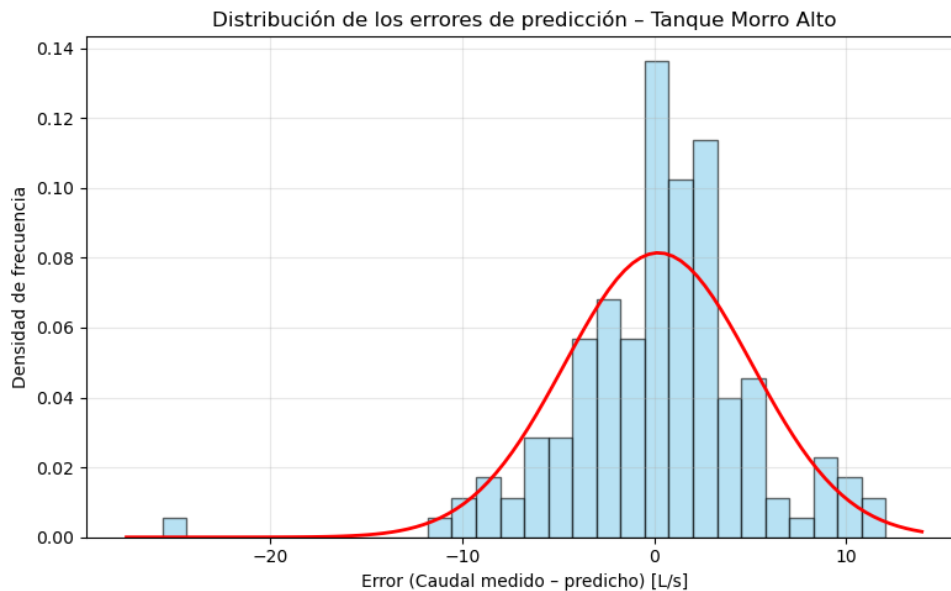
Nota. Elaboración propia.

Este resultado confirma la capacidad del modelo para capturar la dinámica diaria del consumo urbano, caracterizada por ciclos repetitivos influenciados por los hábitos de la población. Según Mu et al. (2020) las arquitecturas LSTM son particularmente efectivas en sistemas donde las variables dependen de secuencias temporales largas y presentan estacionalidad intradía, como en los sistemas de abastecimiento de agua potable.

El análisis de los residuos ( $\text{error} = \text{medido} - \text{predicho}$ ) mostró una distribución aproximadamente normal con ligera asimetría positiva, lo que indica que el modelo tiende a subestimar marginalmente los caudales en horas de máxima demanda (ver Figura 16). Sin embargo, el 95 % de los errores promedio se ubicó dentro del rango  $\pm 1.96\sigma$ , cumpliendo los criterios de calidad de predicción propuestos por Salem & Abokifa (2024a).

**Figura 16.**

*Distribución de los errores de predicción del modelo LSTM – Tanque Morro Alto.*



Nota. Elaboración propia.

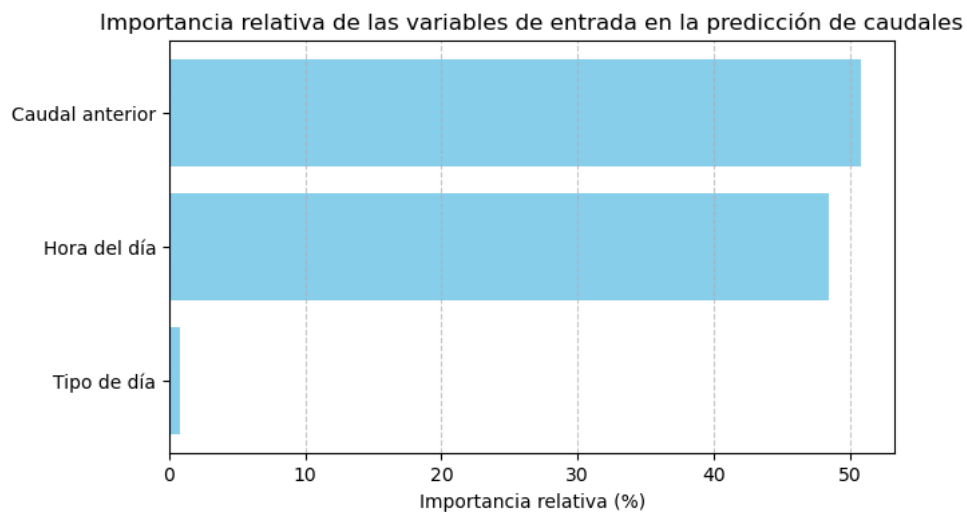
Esta estabilidad en los residuos refleja una adecuada capacidad de generalización del modelo frente a patrones de consumo no vistos, lo que permite su uso como predictor confiable en el marco del sistema de optimización energética. Además, el error relativo no se acumuló a lo largo del horizonte de simulación, lo que demuestra que la normalización y el diseño de la ventana deslizante fueron apropiados para evitar la deriva temporal (drift) del modelo (Liu et al., 2024)

La inclusión de variables exógenas como la hora del día y el tipo de día permitió mejorar significativamente la capacidad explicativa de los modelos predictivos. El análisis de sensibilidad realizado (ver Figura 17) evidenció que la variable “caudal anterior” fue la más influyente en la predicción del consumo, con una importancia relativa del 50,5 %, seguida por la “hora del día” con un 48,2 %, mientras que el “tipo de día” (laboral o fin de semana) tuvo una contribución

menor, del 1,3 %. Estos resultados confirman la fuerte dependencia temporal y autocorrelación del consumo de agua urbana, donde las condiciones horarias y los valores históricos inmediatos del caudal determinan la evolución futura de la demanda. Hallazgos similares han sido reportados por J. Kim et al. (2022) y Salem & Abokifa (2024b) quienes señalan que los patrones de consumo horario presentan alta estabilidad estadística y responden principalmente a rutinas sociales y domésticas.

**Figura 17.**

*Importancia relativa de las variables de entrada en la predicción de caudales.*



Nota. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos confirman que la combinación de modelos LSTM con datos SCADA de alta resolución ofrece un marco predictivo sólido para sistemas de distribución de agua. Este enfoque permite anticipar con precisión las demandas horarias en los tanques principales, facilitando la planificación del bombeo y la gestión del almacenamiento, aspectos críticos para la optimización energética y la reducción de costos operativos (Kühnert et al., 2021b).

Además, el uso de modelos neuronales enmarcados dentro de un esquema de actualización en tiempo real, como el implementado en esta investigación, habilita la transición hacia sistemas de control predictivo y gemelos digitales hidráulicos, los cuales son cada vez más adoptados por empresas de agua en Europa y América Latina (Anton et al., 2022).

## **6.2 Optimización del tiempo de bombeo mediante algoritmos genéticos**

La aplicación del algoritmo genético (GA) permitió identificar configuraciones óptimas de operación para la estación Bosconia, considerando simultáneamente las restricciones hidráulicas, los estados de válvulas y el tiempo total de bombeo.

El modelo optimizador se ejecutó durante un horizonte de 24 horas, con intervalos horarios y pasos de cálculo de 25 minutos, en acoplamiento directo con el modelo hidráulico calibrado. Este enfoque permitió evaluar el comportamiento dinámico del sistema en cuasi-tiempo real, garantizando consistencia entre periodos consecutivos de simulación.

### ***6.2.1 Desempeño del algoritmo genético***

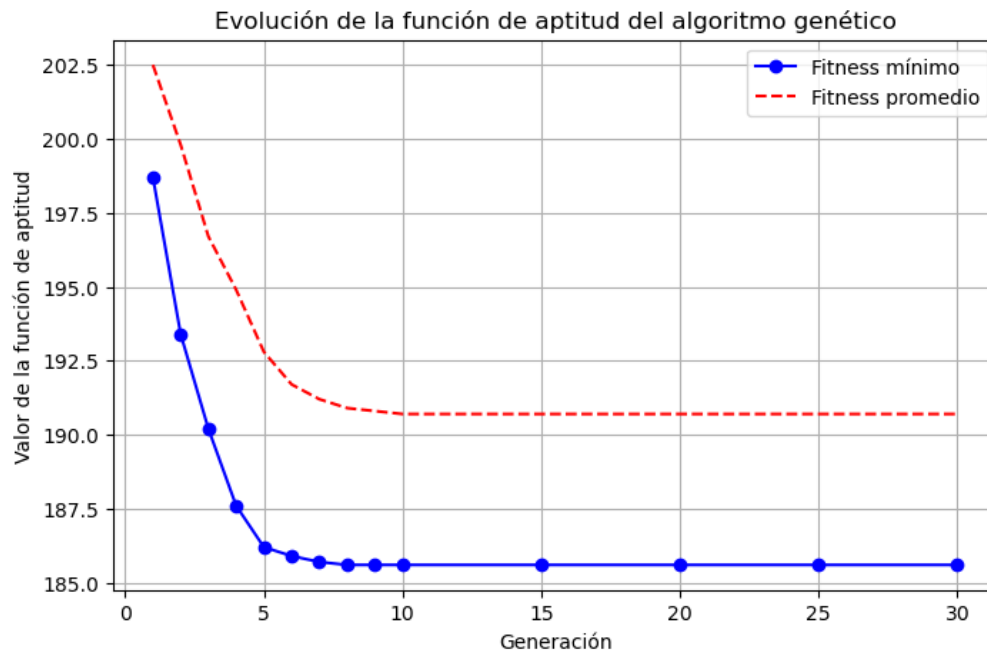
El proceso evolutivo del algoritmo genético mostró un comportamiento de convergencia eficiente y estable, alcanzando valores de aptitud cercanos al óptimo en las primeras generaciones y manteniendo posteriormente una meseta con variaciones mínimas.

Durante la optimización de cada intervalo horario, se ejecutaron poblaciones de 50 individuos durante un máximo de 200 generaciones, observándose que la mejora significativa del fitness se concentró entre las generaciones 1 y 10, mientras que a partir de la generación 15 el progreso fue inferior al 0.1 % por iteración, cumpliendo el criterio de estabilidad definido para la parada anticipada.

La Figura 18 muestra la evolución típica del proceso de optimización, en la que se aprecia la reducción progresiva del valor de aptitud hasta alcanzar la zona de convergencia.

**Figura 18.**

*Evolución del valor de la función de aptitud del algoritmo genético.*



Nota. Elaboración propia.

El tiempo medio de cómputo por intervalo horario fue de 10 minutos, considerando su ejecución en un entorno local (Intel Core i5, 8 GB RAM). Este rendimiento es adecuado para pruebas en cuasi-tiempo real; sin embargo, su implementación en una infraestructura de mayor capacidad permitiría reducir los tiempos de cálculo y habilitar su ejecución continua sobre ventanas deslizantes de simulación, en entornos operativos reales.

El comportamiento observado concuerda con los resultados reportados por Farmani et al. (2005) y Martínez-Bahena et al. (2018) quienes destacan que los algoritmos genéticos aplicados a problemas de optimización hidráulica tienden a estabilizarse en menos de 20 generaciones cuando el espacio de búsqueda es discreto y la función de penalización está correctamente ponderada.

La configuración de los operadores genéticos empleada, con una alta probabilidad de cruzamiento (0.9) y una tasa de mutación adaptativa decreciente, se considera adecuada para mantener un equilibrio entre la exploración del espacio de búsqueda y la explotación de soluciones prometedoras. Este enfoque ha demostrado mejorar la estabilidad evolutiva y reducir el riesgo de convergencia prematura en problemas de optimización complejos, tal como señalan Srinivas & Patnaik (1994). De acuerdo con Anderson-Cook (2005) el uso de un cruzamiento elevado favorece la recombinación de características óptimas, mientras que una mutación controlada preserva la diversidad genética necesaria para alcanzar soluciones globalmente óptimas.

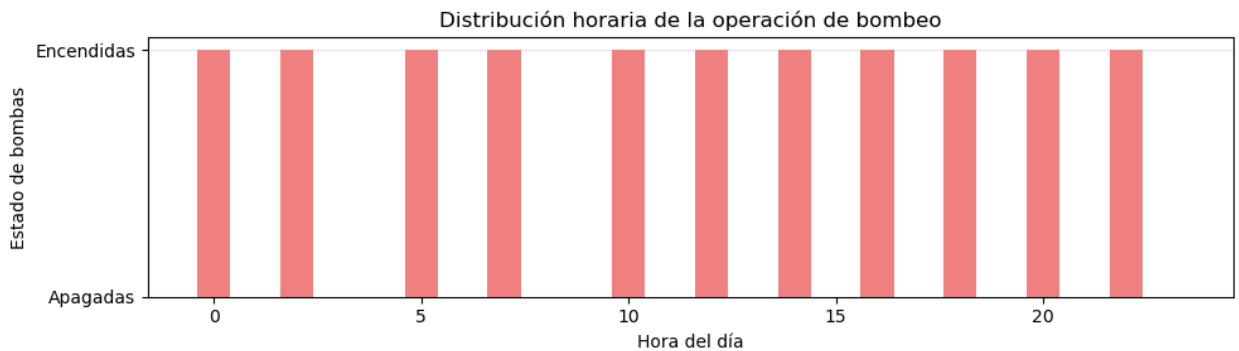
### ***6.2.2 Comportamiento operativo de válvulas y bombas***

El algoritmo genético permitió definir configuraciones horarias de operación hidráulicamente coherentes y físicamente factibles para la estación de bombeo Bosconia del AMB S.A. E.S.P.

De las veinticuatro iteraciones evaluadas (una por cada hora del horizonte de simulación), se observó la activación de las bombas en once periodos, con una sola bomba operando por intervalo, lo que evidencia una estrategia de impulsión eficiente y discontinua, como muestra la Figura 19.

**Figura 19.**

*Configuración horaria óptima de bombas.*



Nota. Elaboración propia.

En cuanto al comportamiento de las válvulas de control, se identificó una jerarquía funcional definida en la regulación de caudales a lo largo del sistema matriz:

FCV-33, ubicada en el nodo de conexión entre Morro Alto y Puerta del Sol, fue el elemento de control más activo, con 20 horas de apertura efectiva. Su posición estratégica la convierte en el principal punto de redistribución del caudal impulsado desde Bosconia hacia el sistema Morro Alto–La Flora y, posteriormente, hacia las zonas intermedias del sistema.

La válvula de control del Tanque Regadero Norte mostró actividad en 15 horas, regulando el flujo hacia el norte del sistema. Su función fue esencial para mantener niveles adecuados de almacenamiento y sostener el suministro en los sectores durante los periodos sin bombeo.

Las válvulas FCV-6 y FCV-29, que interconectan los sectores de San Juan y Bienestar respectivamente, presentaron una participación moderada (14 horas de apertura cada una). Estas válvulas desempeñaron un papel de redistribución local de caudal, equilibrando la transferencia de agua entre las zonas de influencia de Girón y el corredor occidental de Bucaramanga.

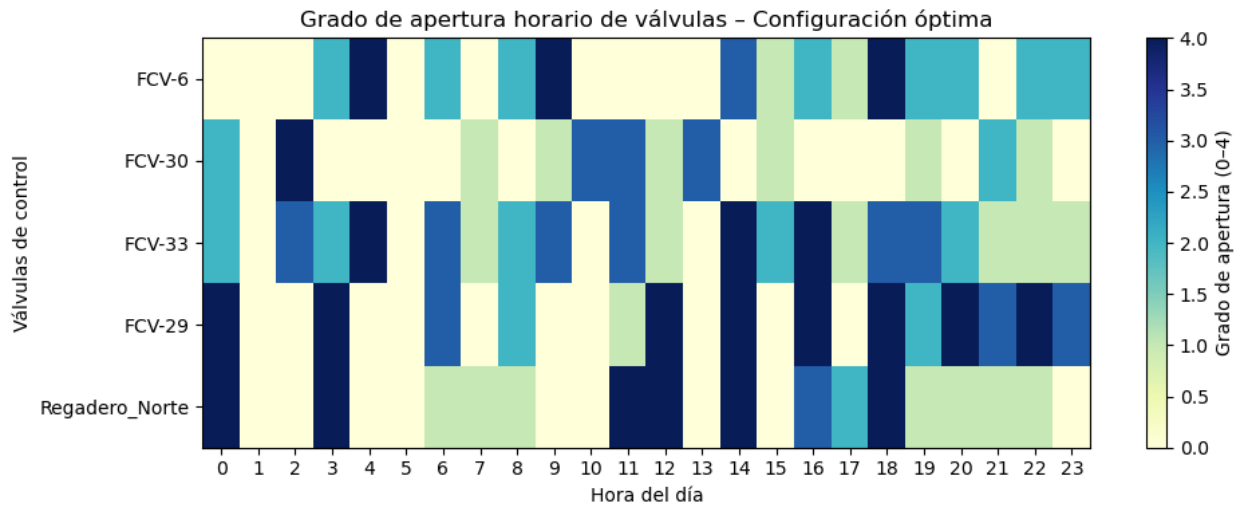
Finalmente, FCV-30, localizada en la conexión hacia el sector Malpaso, mostró la menor actividad relativa (12 horas de apertura). Esto sugiere que, en el escenario optimizado, la zona de Malpaso se abasteció principalmente desde la planta de Floridablanca, requiriendo un refuerzo mínimo desde el sistema Morro Alto–La Flora.

El comportamiento combinado de estas válvulas permitió una transferencia hidráulica eficiente entre zonas y tanques, maximizando el aprovechamiento del volumen almacenado y reduciendo la dependencia directa del bombeo. Este patrón operativo concuerda con los enfoques contemporáneos de control coordinado válvula–bomba, los cuales han demostrado reducir significativamente el consumo energético y la variabilidad de presiones en redes urbanas complejas (Xie et al., 2024).

La Figura 20 muestra la evolución temporal de las aperturas de válvulas durante la jornada optimizada. El esquema evidencia cómo el algoritmo priorizó el uso del almacenamiento distribuido y la regulación interzonal para optimizar simultáneamente la eficiencia hidráulica y energética del sistema Bosconia.

**Figura 20.**

*Grado de apertura horario de válvulas de control durante la operación optimizada.*



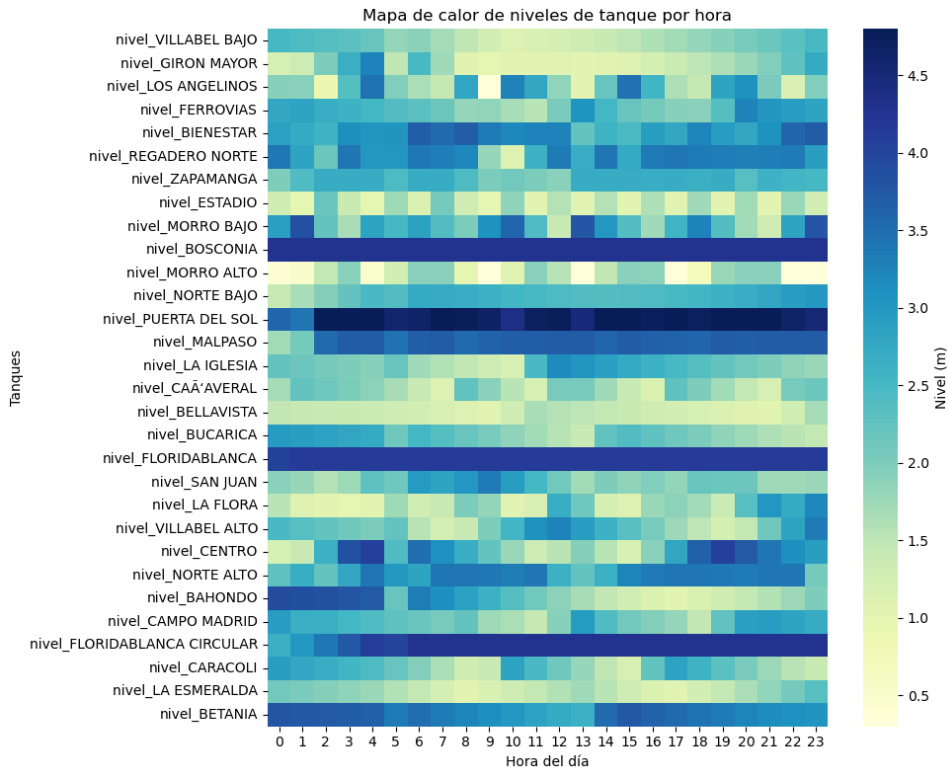
Nota. Elaboración propia.

### 6.2.3 Comportamiento hidráulico y resiliencia

El comportamiento hidráulico simulado durante las 24 horas optimizadas evidencia una operación estable, resiliente y energéticamente eficiente del sistema de distribución asociado a la estación Bosconia. La Figura 21 presenta la evolución horaria de los niveles en los principales tanques del sistema, donde se aprecia una dinámica coherente con el régimen de bombeo discontinuo determinado por el algoritmo genético.

**Figura 21.**

*Mapa de calor de niveles de tanque por hora.*

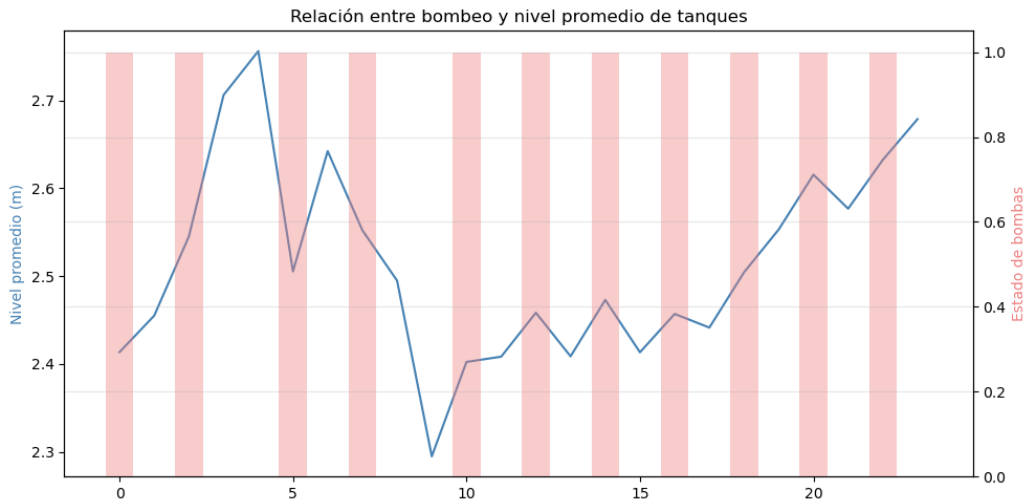


Nota. Elaboración propia.

Los niveles de almacenamiento se mantuvieron dentro de los límites operativos establecidos, garantizando la continuidad del servicio y evitando condiciones de vaciado total. En promedio, los tanques operaron con una reserva hidráulica efectiva de 2.3 a 2.8 m sobre el mínimo operativo como muestra la Figura 22.

**Figura 22.**

*Relación entre bombeo (sombreado rosado; encendido =1) y nivel promedio de tanques.*



Nota. Elaboración propia.

El régimen de bombeo discontinuo identificado no implicó la despresurización del sistema, sino una estrategia de operación cíclica basada en el llenado parcial desde Bosconia y la redistribución gravitacional desde los tanques ubicados en Morro Alto, La Flora y Floridablanca. Durante los periodos de bombeo, la estación Bosconia elevó caudal hacia los niveles superiores de la red, restaurando los volúmenes en los tanques troncales. Posteriormente, en los intervalos sin impulsión, el sistema operó en modo gravitacional, manteniendo el suministro continuo hacia los sectores dependientes, sin comprometer la presión ni la continuidad del flujo.

Esta estrategia permitió que Bosconia actuara como un punto de compensación hidráulica, optimizando el uso del almacenamiento disponible y la redistribución hidráulica por medio del control de válvulas en la red matriz. De esta forma, se logró optimizar el tiempo total de bombeo diario sin afectar los niveles de servicio.

#### ***6.2.4 Evaluación de sensibilidad de parámetros***

Con el fin de analizar la robustez y estabilidad del algoritmo genético empleado en la optimización del sistema, se realizó una evaluación de sensibilidad sobre los principales parámetros evolutivos: tamaño de población (Population Size), probabilidad de cruzamiento (Crossover Prob), probabilidad de mutación (Mutation Prob) y límite de generaciones sin mejora (No Improve Limit).

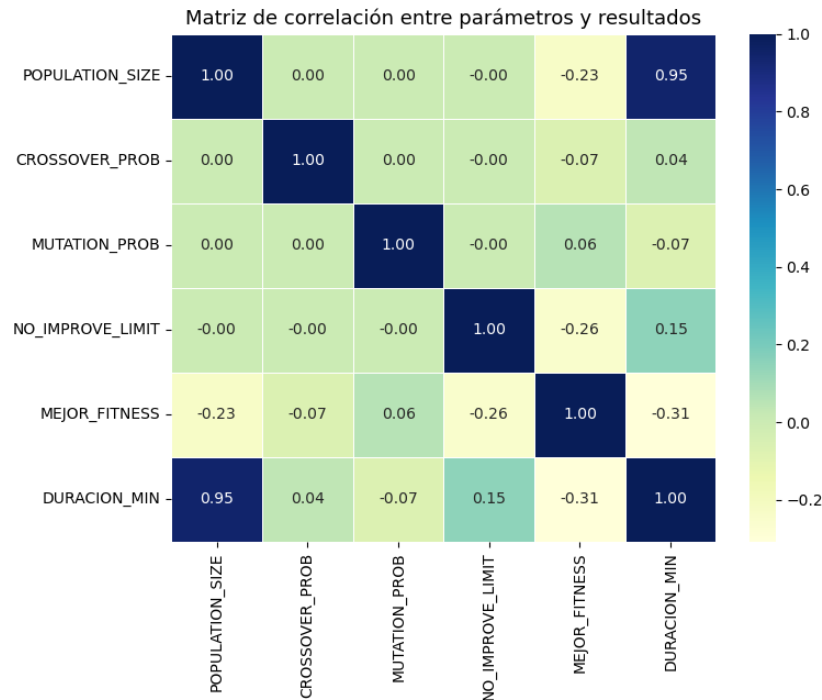
En total se efectuaron 80 combinaciones paramétricas, manteniendo la estructura base del modelo y registrando tanto los valores de fitness óptimo obtenidos como el tiempo medio de ejecución de cada iteración.

La matriz de correlación entre los parámetros y los resultados presentada en la Figura 23, muestra que el tamaño de población presenta una correlación muy alta con la duración media de ejecución ( $r = 0,95$ ) y una correlación negativa moderada con el mejor fitness ( $r = -0,23$ ). Esto indica que, al incrementar la población, el tiempo de cómputo aumenta significativamente, aunque existe una mejora en la calidad de la solución.

Por su parte, el parámetro No Improve Limit presenta una correlación negativa con el fitness ( $r = -0,26$ ) y positiva con la duración ( $r = 0,15$ ), lo que sugiere que valores demasiado altos prolongan innecesariamente la ejecución sin aportar beneficios sustanciales en la convergencia.

**Figura 23.**

*Matriz de correlación entre parámetros y resultados del algoritmo genético.*



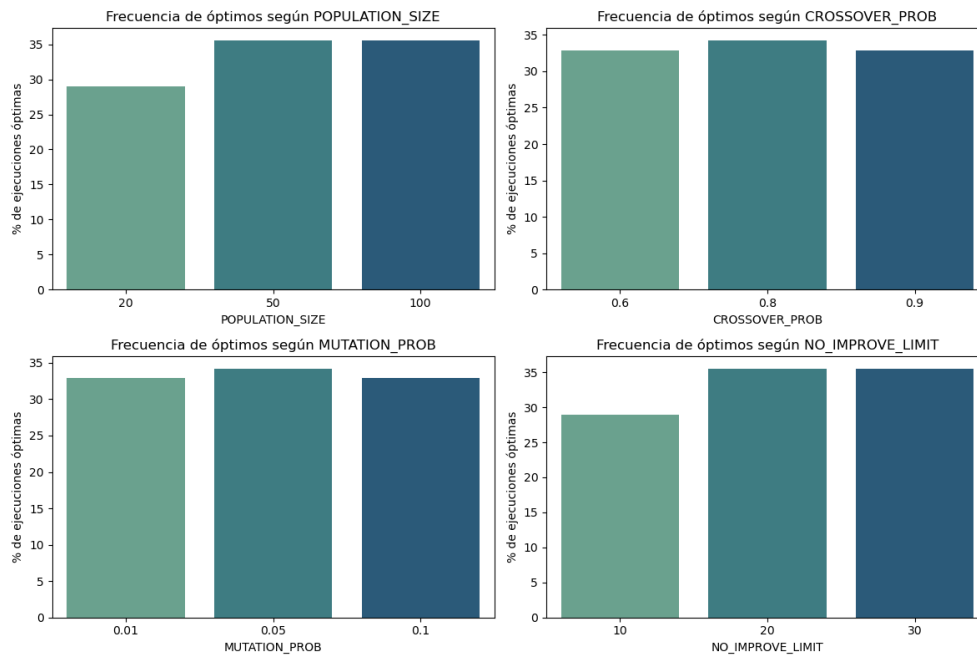
Nota. Elaboración propia.

En la Figura 24, se observa la frecuencia de ejecuciones que alcanzaron soluciones óptimas según cada parámetro. En general, las configuraciones con tamaños de población intermedios (50–100 individuos) mostraron una mayor proporción de ejecuciones óptimas ( $\approx 35\%$ ), en comparación con poblaciones pequeñas (20 individuos,  $\approx 29\%$ ).

Asimismo, una alta probabilidad de cruzamiento (0,9) favoreció la obtención de soluciones de mejor calidad sin incrementar significativamente el tiempo de ejecución. En cambio, las variaciones en la probabilidad de mutación y el límite de generaciones sin mejora no mostraron efectos marcados en la frecuencia de éxito.

**Figura 24.**

*Frecuencia de ejecuciones óptimas según los valores de los parámetros evolutivos.*



Nota. Elaboración propia.

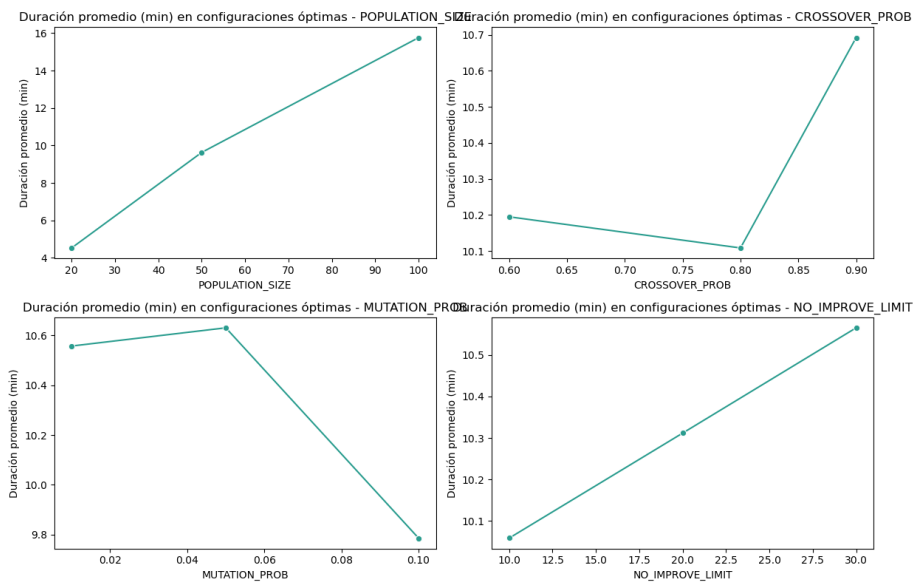
La

Figura 25 presenta la duración promedio (en minutos) de las ejecuciones óptimas para cada configuración. Se observa un incremento casi lineal del tiempo con el tamaño de población, pasando de aproximadamente 4,5 min (20 individuos) a 15,8 min (100 individuos). Por contraste, los parámetros Crossover Prob, Mutation Prob y No Improve Limit tienen efectos mucho más leves sobre la duración promedio (variaciones inferiores al 0,6 min).

Estos resultados evidencian que el tamaño de población es el principal determinante del costo computacional del algoritmo.

**Figura 25.**

*Duración promedio en configuraciones óptimas según los parámetros evolutivos.*

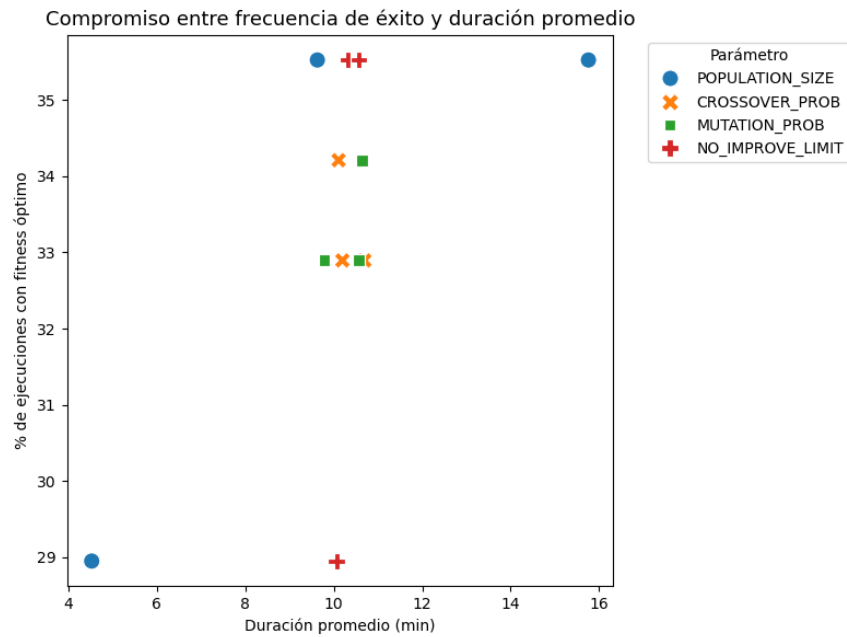


Nota. Elaboración propia.

La Figura 26 resume el compromiso entre la frecuencia de éxito y el tiempo medio de ejecución, mostrando que los tamaños de población mayores (100) alcanzan frecuencias de éxito cercanas al 36 %, pero con tiempos de cómputo más del triple respecto a poblaciones de 20 individuos. Esta relación confirma la existencia de un compromiso costo-beneficio donde tamaños de población moderados ( $\approx 50$ ) ofrecen una eficiencia más balanceada.

**Figura 26.**

*Compromiso entre frecuencia de éxito y duración promedio.*



Nota. Elaboración propia.

El análisis revela que el modelo presenta un comportamiento de saturación de rendimiento, en el que aumentos en la diversidad genética (mediante poblaciones grandes o tasas de mutación altas) no se traducen en mejoras significativas de exploración ni en un mejor fitness final. Este comportamiento ha sido documentado previamente en estudios sobre algoritmos genéticos aplicados a problemas hidráulicos discretos, donde se destaca que el desempeño depende más de una adecuada tasa de recombinación que del tamaño poblacional absoluto (Nicklow et al., 2010).

De acuerdo con Hassanat et al. (2019), las tasas de mutación elevadas pueden generar ruido en la búsqueda y reducir la eficiencia del proceso evolutivo, mientras que T. Chen et al. (2012) demostraron teóricamente que un tamaño de población excesivo puede ser incluso perjudicial en términos de convergencia y estabilidad. Los resultados de este estudio concuerdan con dichas observaciones, evidenciando que incrementos de población por encima de 100 individuos no aportan mejoras perceptibles en el fitness final, pero incrementan significativamente el tiempo de ejecución.

Por tanto, las configuraciones más equilibradas se encuentran en el rango de 50 individuos, probabilidad de cruzamiento alta (0,9) y probabilidad de mutación moderada (0,05–0,1), las cuales proporcionan un buen compromiso entre estabilidad, eficiencia y capacidad exploratoria.

Además, limitar el número de generaciones sin mejora a valores moderados ( $\approx 20$ ) contribuye a evitar prolongaciones innecesarias del cálculo.

### ***6.2.5 Implicaciones operativas y aplicabilidad***

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad técnica y computacional de los algoritmos genéticos (GA) como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la operación de sistemas de bombeo y distribución de agua. El modelo desarrollado permitió optimizar la operación de la estación Bosconia bajo un enfoque de simulación en cuasi-tiempo real, considerando simultáneamente restricciones hidráulicas, niveles de almacenamiento y la coordinación entre válvulas de control y bombas.

Si bien la optimización se realizó bajo un escenario de simulación, los resultados evidencian el potencial de incorporar este tipo de esquemas en la gestión operativa diaria mediante su integración a un sistema de gemelo digital. En este enfoque, las condiciones de borde (niveles,

configuraciones de elementos y demandas) podrían actualizarse de forma horaria utilizando información del sistema SCADA y las predicciones de los modelos de redes neuronales, permitiendo ejecutar procesos de optimización continua y adaptativa. Tal integración entre simulación hidráulica, optimización y análisis de datos en tiempo real se ha identificado como un componente clave para mejorar la eficiencia energética y la resiliencia operativa en redes urbanas (Ramos et al., 2023).

Los resultados obtenidos permiten identificar acciones concretas para su implementación operativa dentro del amb S.A. E.S.P. En primer lugar, el esquema desarrollado puede integrarse como un módulo de recomendación dentro del gemelo digital corporativo, alimentado con datos SCADA y con las predicciones de consumo y producción. Esto permitiría generar, cada hora, un conjunto de configuraciones óptimas de bombeo y de posición de válvulas, que podrían ser evaluadas y validadas por el operador en el Centro de Control. En segundo lugar, la metodología ofrece un lineamiento técnico para diseñar programas de operación energética eficiente, permitiendo estimar ahorros potenciales bajo distintos escenarios operativos. Esto puede incorporarse en la planeación diaria de bombeo, en la programación de horarios de operación de las estaciones y en la evaluación de alternativas de operación frente a restricciones de llenado de tanques. En tercer lugar, los resultados permiten establecer criterios operativos para la gestión preventiva de la infraestructura, ya que la simulación continua permitiría identificar rutas de operación que minimicen ciclos de arranque, sobrepresiones o vaciamientos críticos. De esta manera, el modelo puede convertirse en una herramienta de apoyo no solo para la operación diaria, sino para el mantenimiento preventivo y la gestión de activos. Finalmente, la adopción del enfoque de optimización requiere fortalecer la calidad y disponibilidad de datos en tiempo real, lo que implica avanzar en la ampliación de la red de sensores SCADA, la estandarización de la telemetría

y la actualización periódica del modelo hidráulico. Estas acciones permitirán que la empresa integre efectivamente la optimización como parte de su proceso operativo, garantizando decisiones más eficientes, seguras y alineadas con la demanda dinámica del sistema.

No obstante, el desempeño del modelo está condicionado por la calidad de la información y la incertidumbre asociada a los modelos predictivos de demanda y producción, que introducen un margen de error en la función objetivo. Además, las pruebas realizadas corresponden a un escenario controlado de simulación, por lo que no consideran perturbaciones dinámicas como variaciones de presión transitoria o fallas en los equipos.

Adicionalmente, la escalabilidad del modelo presenta limitaciones inherentes tanto a su naturaleza computacional como a la disponibilidad de datos en tiempo real. En redes más extensas, con múltiples estaciones de bombeo o un mayor número de válvulas de control, el espacio de búsqueda del algoritmo genético crece exponencialmente, lo que incrementa el costo computacional y el tiempo requerido para alcanzar soluciones óptimas. En este sentido, lo descrito en la Sección 5.2.1 representa un avance importante al reducir el espacio de búsqueda mediante simplificaciones basadas en análisis técnicos y en el conocimiento del comportamiento hidráulico del sistema.

Del mismo modo, en sistemas con baja instrumentación SCADA o con una frecuencia de muestreo limitada, la capacidad del modelo para operar en cuasi-tiempo real se ve comprometida, ya que depende de datos confiables y actualizados para alimentar tanto la simulación hidráulica como los modelos predictivos. Por ello, la aplicabilidad del enfoque propuesto es mayor en redes que cuenten con un nivel intermedio o alto de sensorización, infraestructura digital consolidada y

modelos hidráulicos calibrados, condiciones bajo las cuales el algoritmo puede desplegar su máximo potencial como herramienta de soporte a la operación.

De forma general, los resultados son consistentes con la literatura reciente, que reconoce la eficacia de los algoritmos genéticos en la optimización multiobjetivo de redes hidráulicas, destacando su capacidad para equilibrar el consumo energético, la confiabilidad y las restricciones hidráulicas (Parvaze et al., 2023).

Cabe señalar que, si bien los resultados son prometedores, la aplicación operacional del esquema de optimización mediante algoritmos genéticos debe considerarse con cautela. En escenarios de emergencia, como fallas de bombeo, roturas de tubería, variaciones súbitas de demanda o eventos de alta incertidumbre, el modelo desarrollado no necesariamente sería aplicable de manera directa sin ajustes. Además, cuando la red hidráulica cambia (nuevas tuberías, tanques, válvulas o configuración de bombeo) es necesario reconstruir y recalibrar el modelo hidráulico subyacente para mantener su validez. Por último, los modelos predictivos de demanda y producción deben actualizarse regularmente para asegurar que las predicciones sean precisas en el contexto operativo real. En ausencia de estas actualizaciones, el margen de error en la función objetivo puede aumentar y reducir la eficacia del esquema de soporte a la decisión.

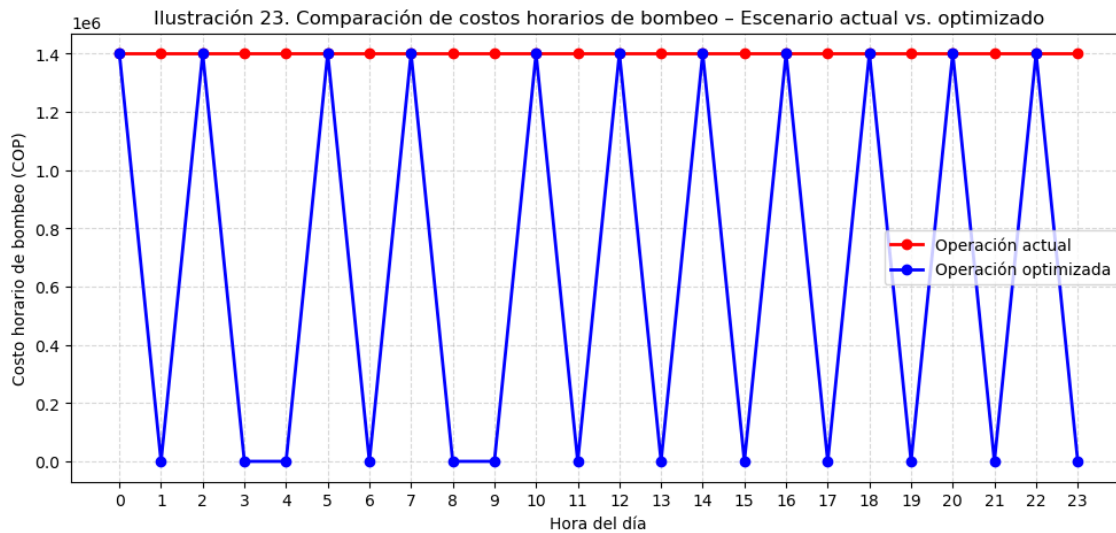
### **6.3 Evaluación de los costos de bombeo actuales y optimizados**

La evaluación comparativa de los costos de bombeo en la estación Bosconia permitió evidenciar el impacto económico de la optimización operativa basada en algoritmos genéticos. Tal como se observa en la Figura 27, el escenario real operativo realizado el día 23 de octubre de 2024 mantiene un costo horario constante de 1.400.000 COP, correspondiente a la operación continua

de al menos una bomba durante las 24 horas del día. En contraste, el escenario optimizado presenta una reducción significativa en los periodos de operación, reflejada en una curva discontinua con horas de parada programadas estratégicamente para aprovechar la inercia hidráulica de los tanques y la estabilidad del sistema.

### Figura 27.

*Comparación de costos horarios de bombeo – Escenario actual vs. Optimizado.*



Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados resumidos en la Tabla 6, el tiempo total de bombeo diario disminuyó de 24 a 11 horas, lo que representa una reducción del 54,2 % en el costo total diario de bombeo, pasando de 33.600.000 COP a 15.400.000 COP. Este comportamiento confirma la efectividad del modelo de optimización propuesto en la Fase 2, cuyo objetivo era minimizar los costos energéticos manteniendo las condiciones de servicio hidráulico dentro de los rangos operativos definidos.

**Tabla 6.**

*Comparación entre escenarios operativo actual y optimizado – Estación Bosconia.*

<i>Escenario</i>	<b>Horas totales de bombeo</b>	<b>Costo total diario (COP)</b>	<b>Ahorro (%)</b>
<i>Operación actual</i>	24	33.600.000	—
<i>Operación optimizada</i>	11	15.400.000	54,2 %

Nota. Elaboración propia.

Estos resultados son coherentes con hallazgos reportados en la literatura reciente. D.-H. Kim & Jang (2024) demostraron que la optimización de patrones de demanda mediante algoritmos genéticos puede generar reducciones de hasta un 9 % en los costos energéticos de bombeo en sistemas de distribución, al ajustar las horas de funcionamiento de las bombas. De manera similar, Makaremi et al. (2017) señalaron que los algoritmos evolutivos multiobjetivo, logran una gestión eficiente de los horarios de bombeo, reduciendo simultáneamente los costos energéticos.

Asimismo, investigaciones más amplias sobre redes de distribución confirman que el uso de GAs puede reducir los costos operativos y mejorar la eficiencia energética (Parvaze et al., 2023). Esta evidencia sustenta la pertinencia del enfoque adoptado en la presente investigación, que prioriza la reducción de las horas efectivas de bombeo como estrategia de eficiencia energética y sostenibilidad económica.

En el contexto operativo del amb S.A. ESP, la reducción del 54 % en el costo diario de bombeo constituye un resultado de alto impacto, considerando que estos gastos representan una proporción significativa del presupuesto energético institucional. Además, el modelo optimizado contribuye indirectamente a reducir las emisiones asociadas al consumo eléctrico, lo que se alinea con los objetivos de sostenibilidad energética del sector de acueducto en Colombia (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2023).

## 7. Conclusiones

El desarrollo de esta investigación demostró la viabilidad técnica y operativa de un modelo de optimización del tiempo de bombeo en la estación Bosconia mediante algoritmos genéticos (GA), integrados en un entorno de simulación hidráulica en cuasi-tiempo real. El modelo propuesto constituye una herramienta robusta para mejorar la eficiencia energética del sistema de distribución de agua potable del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. (amb S.A. E.S.P.), generando resultados cuantificables en la reducción de costos y una operación más inteligente y sostenible del sistema.

Se desarrolló un modelo matemático e hidráulico computacional que representa con alta precisión la operación de la estación Bosconia y su interacción con el sistema matriz de distribución. Este modelo, implementado en EPANET e integrado con información SCADA, alcanzó una calibración satisfactoria con errores medios inferiores al 8 % y un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) superior a 0.92, garantizando su validez física y estadística. La conexión dinámica con datos en tiempo real permitió conformar un gemelo digital hidráulico capaz de reproducir en cuasi-tiempo real las condiciones de presión, caudal y nivel del sistema.

Adicionalmente, los modelos predictivos LSTM de consumo y producción, con un error cuadrático medio (RMSE) promedio del 5,9 %, proporcionaron una base sólida para una operación anticipativa y más eficiente del sistema.

La aplicación de algoritmos genéticos permitió optimizar la operación del sistema en cuasi-tiempo real, identificando los regímenes más eficientes de encendido de bombas y apertura de válvulas. El modelo evolutivo diseñado alcanzó convergencias estables en menos de 20 generaciones, reduciendo significativamente las horas efectivas de bombeo sin comprometer las condiciones hidráulicas de servicio. Estos resultados confirman la efectividad del enfoque evolutivo adoptado, que logra equilibrar la exploración del espacio de soluciones con la estabilidad numérica, permitiendo encontrar configuraciones óptimas de operación con un consumo energético mínimo.

La evaluación comparativa de costos energéticos evidenció la eficiencia del modelo optimizado frente al esquema operativo actual. En el caso de estudio del 23 de octubre de 2024, el tiempo total de bombeo se redujo de 24 a 11 horas, generando un ahorro del 54,2 % en los costos diarios de bombeo, al pasar de 33,6 millones a 15,4 millones de COP. Estos resultados confirman que la aplicación de algoritmos genéticos en la operación del sistema no solo mejora la eficiencia energética, sino que también contribuye a la sostenibilidad económica y ambiental del servicio.

En conjunto, la investigación validó un modelo operativo de optimización basado en algoritmos genéticos, capaz de integrarse con modelos hidráulicos y fuentes de datos en tiempo real para optimizar la gestión del bombeo en la estación Bosconia. El modelo desarrollado

constituye un marco metodológico replicable que combina modelación hidráulica, inteligencia artificial y optimización evolutiva, ofreciendo una alternativa innovadora para la gestión energética inteligente en sistemas de distribución de agua.

Finalmente, los resultados obtenidos representan un aporte técnico y estratégico para el amb S.A. E.S.P., fortaleciendo su proceso de transformación digital y promoviendo una operación más eficiente, sostenible y resiliente. Cabe resaltar que los resultados presentados corresponden a un día representativo de operación (23 de octubre de 2024), por lo que las eficiencias obtenidas pueden variar según las condiciones hidráulicas y de demanda de cada jornada. No obstante, el desempeño observado demuestra la efectividad y aplicabilidad general del enfoque, sentando las bases para la transición de una operación reactiva hacia una gestión predictiva y optimizada, alineada con los principios de eficiencia energética, sostenibilidad ambiental y mejora continua del servicio público de acueducto en Colombia.

Como recomendación para futuros estudios y con el fin de avanzar hacia la operativización del sistema optimizado, el siguiente paso consiste en el desarrollo de un plan piloto en un entorno supervisado, en el cual las configuraciones recomendadas por el algoritmo, como tiempos de bombeo y posiciones de válvulas, puedan ser evaluadas y posteriormente ejecutadas en campo bajo la supervisión del Centro de Control. Este piloto permitiría validar el desempeño del modelo fuera del entorno de simulación, contrastar sus resultados con la operación tradicional y ajustar los parámetros del algoritmo según las condiciones reales del sistema. Paralelamente, se recomienda avanzar en la transición hacia un entorno operativo real mediante la integración del modelo dentro de un software de asistencia operacional, con una interfaz amigable que facilite a los operadores

interpretar, validar y aplicar las recomendaciones generadas. Finalmente, se sugiere complementar este proceso con estudios orientados a optimizaciones multiobjetivo, análisis de incertidumbre y la actualización periódica del modelo hidráulico y de la instrumentación SCADA, elementos necesarios para consolidar una herramienta de soporte a la decisión confiable, escalable y alineada con las necesidades operativas del amb S.A. E.S.P.

## 8. Referencias Bibliográfica

- amb SA ESP. (2022). *Informe gestión integral*.
- Anderson-Cook, C. (2005). Practical Genetic Algorithms (2nd ed.): Randy L. Haupt and Sue Ellen Haupt. *Journal of the American Statistical Association*, 100, 1099.
- Anton, P., Basson, H., Kruger, K., & Goosen, O. J. (2022). *A Digital Twin Architecture for a Water Distribution System*. <https://scholar.sun.ac.za>
- Atashi, V., Gorji, H. T., Shahabi, S. M., Kardan, R., & Lim, Y. H. (2022). Water Level Forecasting Using Deep Learning Time-Series Analysis: A Case Study of Red River of the North. *Water (Switzerland)*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/w14121971>
- (AWWA), A. W. W. A. (2017). M32: Computer Modeling of Water Distribution Systems. In *Manual of Water Supply Practices – M32, Fourth Edition*. American Water Works Association. <https://store.awwa.org/M32-Computer-Modeling-of-Water-Distribution-Systems-Fourth-Edition>
- Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (2002). Robust optimization - Methodology and applications. *Mathematical Programming, Series B*, 92(3), 453–480. <https://doi.org/10.1007/s101070100286>
- Bin Mahmoud, A. A., Momeni, A., & Piratla, K. R. (2023). Optimal Near Real-Time Control of Water Distribution System Operations. *Water (Switzerland)*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/w15071280>

- Bouach, A., & Benmamar, S. (2023). Management of a Water Pumping Schedule by an HGMA Optimization Algorithm. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01201-y>
- Boukas, I., Burtin, E., Sutura, A., Gemine, Q., Pevee, B., & Ernst, D. (2023). Exploiting the flexibility potential of water distribution networks: A pilot project in Belgium. *IEEE Transactions on Smart Grid*. <https://doi.org/10.1109/TSG.2023.3272469>
- Boulos, P., Jacobsen, L., Heath, J., & Kamojjala, S. (2014). Real-Time Modeling of Water Distribution Systems: A Case Study. *Journal - American Water Works Association*, 106, E391–E401. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2014.106.0076>
- Chen, J., & Boccelli, D. L. (2018). Forecasting Hourly Water Demands With Seasonal Autoregressive Models for Real-Time Application. *Water Resources Research*, 54(2), 879–894. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017WR022007>
- Chen, T., Tang, K., Chen, G., & Yao, X. (2012). A large population size can be unhelpful in evolutionary algorithms. *Theoretical Computer Science*, 436, 54–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tcs.2011.02.016>
- CONAGUA. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)
- De Paola, F., Fontana, N., Giugni, M., Marini, G., & Pugliese, F. (2016). An Application of the Harmony-Search Multi-Objective (HSMO) Optimization Algorithm for the Solution of Pump Scheduling Problem. *Procedia Engineering*, 162, 494–502. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.093>

- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons. <https://www.wiley-vch.de/en/areas-interest/mathematics-statistics/multi-objective-optimization-using-evolutionary-algorithms-978-0-471-87339-6>
- do Egito, T. B., de Azevedo, J. R. G., & de Tarso Marques Bezerra, S. (2023). Optimization of the operation of water distribution systems with emphasis on the joint optimization of pumps and reservoirs. *Water Supply*, 23(3), 1094–1105. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.065>
- Egito, T. B. do, Azevedo, J. R. G. de, & Bezerra, S. de T. M. (2022). OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF PUMPING SYSTEMS AND RESERVOIRS OF WATER DISTRIBUTION SYSTEMS WITH EMPHASIS IN ENERGY EFFICIENCY. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica*, 1337–1353. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.3.81282>
- Eliades, D. G., Kyriakou, M., Vrachimis, S., & Polycarpou, M. M. (2017). *EPANET-MATLAB Toolkit: An Open-Source Software for Interfacing EPANET with MATLAB*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.831493>
- Ezio, T., & A, R. L. (2013). Unified Framework for Deriving Simultaneous Equation Algorithms for Water Distribution Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5), 511–526. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000703](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000703)
- Farmani, R., Savic, D. A., & Walters, G. A. (2005). Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design. *Engineering Optimization*, 37(2), 167–183. <https://doi.org/10.1080/03052150512331303436>

- Flores, A., Tito-Chura, H., Cuentas-Toledo, O., Yana-Mamani, V., & Centty-Villafuerte, D. (2024). PM2.5 Time Series Imputation with Moving Averages, Smoothing, and Linear Interpolation. *Computers*, *13*(12). <https://doi.org/10.3390/computers13120312>
- Goryashko, A. P., & Nemirovski, A. S. (2014). Robust energy cost optimization of water distribution system with uncertain demand. *Automation and Remote Control*, *75*(10), 1754–1769. <https://doi.org/10.1134/S000511791410004X>
- Hassanat, A., Almohammadi, K., Alkafaween, E., Abunawas, E., Hammouri, A., & Prasath, V. B. S. (2019). Choosing Mutation and Crossover Ratios for Genetic Algorithms—A Review with a New Dynamic Approach. *Information*, *10*(12). <https://doi.org/10.3390/info10120390>
- Hernández Araque, M. F. (2019). Metodología para optimizar los costos operativos de las redes de distribución de agua potable a partir de los patrones de bombeo teniendo en cuenta la calidad del agua. *Instname:Universidad de Los Andes*. <http://hdl.handle.net/1992/44774>
- Huang, S., Xia, J., Wang, Y., Wang, W., Zeng, S., She, D., & Wang, G. (2022). Coupling Machine Learning Into Hydrodynamic Models to Improve River Modeling With Complex Boundary Conditions. *Water Resources Research*, *58*(10). <https://doi.org/10.1029/2022WR032183>
- IBAI ALDAZ ARMENDARIZ. (2020). *MODELADO HIDRÁULICO Y CALIBRADO DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA COMARCA DE PAMPLONA*.
- International Organization for Standardization (ISO). (2019). *Guidelines for the management of assets of water supply and wastewater systems — Part 4: Flood management assets*.

- Kara, S., Ethem Karadirek, I., Muhammetoglu, A., & Muhammetoglu, H. (2016). Hydraulic Modeling of a Water Distribution Network in a Tourism Area with Highly Varying Characteristics. *Procedia Engineering*, *162*, 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.096>
- Khedr, A., Tolson, B., & Ziemann, S. (2015). Water distribution system calibration: Manual versus optimization-based approach. *Procedia Engineering*, *119*(1), 725–733. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.926>
- Kim, D.-H., & Jang, D.-W. (2024). Optimization of Water Distribution Network Demand Patterns Using Real-Coded Genetic Algorithms. *Water*, *16*(20). <https://doi.org/10.3390/w16202971>
- Kim, J., Lee, H., Lee, M., Han, H., Kim, D., & Kim, H. S. (2022). Development of a Deep Learning-Based Prediction Model for Water Consumption at the Household Level. *Water*, *14*(9). <https://doi.org/10.3390/w14091512>
- Kossieris, P., & Makropoulos, C. (2018). Exploring the statistical and distributional properties of residential water demand at fine time scales. *Water (Switzerland)*, *10*(10). <https://doi.org/10.3390/w10101481>
- Kühnert, C., Gonuguntla, N. M., Krieg, H., Nowak, D., & Thomas, J. A. (2021a). Application of LSTM networks for water demand prediction in optimal pump control. *Water (Switzerland)*, *13*(5). <https://doi.org/10.3390/w13050644>
- Kühnert, C., Gonuguntla, N. M., Krieg, H., Nowak, D., & Thomas, J. A. (2021b). Application of LSTM Networks for Water Demand Prediction in Optimal Pump Control. *Water*, *13*(5). <https://doi.org/10.3390/w13050644>

- Liu, C., Liu, Z., Yuan, J., Wang, D., & Liu, X. (2024). Urban Water Demand Prediction Based on Attention Mechanism Graph Convolutional Network-Long Short-Term Memory. *Water*, *16*(6). <https://doi.org/10.3390/w16060831>
- Lopez Cualla, R. A. (2000). Ricardo A. Lopez Cualla - Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillado. *ALFAOMEGA*.
- Luna, T., Ribau, J., Figueiredo, D., & Alves, R. (2019). Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization. *Journal of Cleaner Production*, *213*, 342–356. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.190>
- Makaremi, Y., Haghghi, A., & Ghafouri, H. R. (2017). Optimization of Pump Scheduling Program in Water Supply Systems Using a Self-Adaptive NSGA-II; a Review of Theory to Real Application. *Water Resources Management*, *31*(4), 1283–1304. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1577-x>
- Malagón, J., Acero, J. L., Bahamón, H., Mujica, A. V., Maldonado, A., De Agua, V., & Básico, S. (n.d.). *Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio*.
- Mala-Jetmarova, H., Sultanova, N., & Savic, D. (2017). Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. *Environmental Modelling & Software*, *93*, 209–254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.009>
- Martínez-Bahena, B., Cruz-Chávez, M. A., Ávila-Melgar, E. Y., Cruz-Rosales, M. H., & 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>

- Ministerio de Vivienda, C. y T. (2003). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico Sistemas de Acueducto.*
- Mitchell, M. (1996). *An introduction to genetic algorithms.*  
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:25869059>
- Mu, L., Zheng, F., Tao, R., Zhang, Q., & Kapelan, Z. (2020). Hourly and Daily Urban Water Demand Predictions Using a Long Short-Term Memory Based Model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(9), 5020017.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001276](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001276)
- Nicklow, J., Reed, P., Savic, D., Dessalegne, T., Harrell, L., Chan-Hilton, A., Karamouz, M., Minsker, B., Ostfeld, A., Singh, A., Zechman, E., & null null. (2010). State of the Art for Genetic Algorithms and Beyond in Water Resources Planning and Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(4), 412–432.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000053](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000053)
- Parvaze, S., Kumar, R., Khan, J. N., Al-Ansari, N., Parvaze, S., Vishwakarma, D. K., Elbeltagi, A., & Kuriqi, A. (2023). Optimization of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms: A Review. In *Archives of Computational Methods in Engineering* (Vol. 30, Issue 7, pp. 4209–4244). Springer Science and Business Media B.V.  
<https://doi.org/10.1007/s11831-023-09944-7>
- Perelman, G., Ostfeld, A., & Fishbain, B. (2023). Robust Optimal Operation of Water Distribution Systems. *Water (Switzerland)*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/w15050963>
- Pranolo, A., Setyaputri, F. U., Paramarta, A. K. I., Triono, A. P. P., Fadhillah, A. F., Akbari, A. K. G., Utama, A. B. P., Wibawa, A. P., & Uriu, W. (2024). Enhanced Multivariate

- Time Series Analysis Using LSTM: A Comparative Study of Min-Max and Z-Score Normalization Techniques. *ILKOM Jurnal Ilmiah*, 16(2), 210–220. <https://doi.org/10.33096/ilkom.v16i2.2333.210-220>
- Ramirez Villacorta, J. M., Vilca Barbaran, R., Marthans Ruiz, A. A., Noronha Gomez, A., & Bardales Lozano, T. E. (2023). Tendencias de la aplicación de redes neuronales artificiales en el pronóstico del consumo de agua potable en la Amazonía Peruana. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), 7572–7589. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i2.5897](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5897)
- Ramos, H. M., Kuriqi, A., Besharat, M., Creaco, E., Tasca, E., Coronado-Hernández, O. E., Pienika, R., & Iglesias-Rey, P. (2023). Smart Water Grids and Digital Twin for the Management of System Efficiency in Water Distribution Networks. *Water*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/w15061129>
- Rodríguez Aedo, & Natalia Carolina. (2016). *PRONOSTICO DE DEMANDA DE AGUA POTABLE MEDIANTE REDES NEURONAL*. <http://hdl.handle.net/11673/13205>
- Romano, M., & Kapelan, Z. (2014). *ADAPTIVE WATER DEMAND FORECASTING FOR NEAR REAL-TIME MANAGEMENT OF SMART WATER DISTRIBUTION SYSTEMS*.
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 USERS MANUAL*.
- Sadatiyan Abkenar, S. M., Stanley, S. D., Miller, C. J., Chase, D. V., & McElmurry, S. P. (2015). Evaluation of genetic algorithms using discrete and continuous methods for pump optimization of water distribution systems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 8, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2014.09.003>
- Saldarriga, J. (2021). *Hidráulica de tuberías*. Marcombo.

- Salem, A. K., & Abokifa, A. A. (2024a). A Multivariate LSTM Model for Short-Term Water Demand Forecasting. *Engineering Proceedings*, 69(1).  
<https://doi.org/10.3390/engproc2024069167>
- Salem, A. K., & Abokifa, A. A. (2024b). A Multivariate LSTM Model for Short-Term Water Demand Forecasting. *Engineering Proceedings*, 69(1).  
<https://doi.org/10.3390/engproc2024069167>
- Salomons, E. (2021). *Optimal and Practical Real-Time Operation of Water Distribution Systems*.
- Savic, D., & Walters, G. (1997). Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water Distribution Networks. *JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT-ASCE*, 123, 67–77. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1997\)123:2\(67\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:2(67))
- Shao, Y., Chu, S., Zhang, T., Yang, Y. J., & Yu, T. (2019). Real-Time Water Distribution System Hydraulic Modeling Using Prior Demand Information by Formal Bayesian Approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(12).  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001137](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001137)
- Simon Yuill, & Harry Halpin. (2006). *Python*.
- Srinivas, M., & Patnaik, L. M. (1994). Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 24(4), 656–667. <https://doi.org/10.1109/21.286385>
- Subha, J., & Kowsigan, M. (2022). Optimal Water Supply Scheduling Mechanisms using Bio-Inspired Algorithms for IoT-based Smart Water Distribution Network. *Proceedings*

- *International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems, ICAISS 2022*, 1082–1087. <https://doi.org/10.1109/ICAISS55157.2022.10011121>
- Tanchangya, S., Raihan, G., Rahman, P., & Ridwan, T. (2024). A review of deep learning application in water resource management. *International Journal of Water Research*. [https://www.pubtexto.com/journals/international-journal-of-water-research/fulltext/a-review-of-deep-learning-application-in-water-resource-management?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.pubtexto.com/journals/international-journal-of-water-research/fulltext/a-review-of-deep-learning-application-in-water-resource-management?utm_source=chatgpt.com)
- Tavakoli, A., Demasse, S., & Sessa, V. (2023). *Aide à la Décision ROADEF 2023*. <https://minesparis-psl.hal.science/hal-03940479>
- Walski, T. M. (2017). Procedure for Hydraulic Model Calibration. *Journal (American Water Works Association)*, 109(6), 55–61. <https://www.jstor.org/stable/26653524>
- Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., Walski, T. M. ;, Chase, D. V. ;, Savic, D. A. ;, Grayman, W. ;, Beckwith, S. ;, Koelle, E., & Advanced, ". (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management eCommons Citation*. [http://ecommons.udayton.edu/cee\\_fac\\_pubhttp://ecommons.udayton.edu/cee\\_fac\\_pub/](http://ecommons.udayton.edu/cee_fac_pubhttp://ecommons.udayton.edu/cee_fac_pub/)  
18
- Wang, D., Li, Y., Hou, B., & Wu, S. (2024). Short-Term Water Demand Forecasting Based on LSTM Using Multi-Input Data †. *Engineering Proceedings*, 69(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2024069103>
- Xie, Y., Wu, Y., Jin, Y., Li, Y., Zhao, B., Li, X., Ba, Z., & Liu, S. (2024). Energy-efficient and reliable coordinated scheduling for water distribution systems: enhancing hydraulic conditions and water quality. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(11), 2229–2241. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.365>

- Xu, J. (2024). Forecasting Water Demand With the Long Short-Term Memory Deep Learning Mode. *International Journal of Information Technologies and Systems Approach*, 17(1), 1–18. <https://doi.org/10.4018/ijitsa.338910>
- Zechman, B. E., Ehsan, S. M., Lu, X., & Jason, W. (2023). Digital Twins for Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 149(3), 02523001. <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-5786>