

Calibración de parámetros en redes de riego mediante algoritmos genéticos

Ruiz-Hermo, A.^{a,*}, Neto, F.M.^a, Orihuela, L.^a

^aCentro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad, Universidad de Huelva, 21819, Huelva, España.

To cite this article: Ruiz-Hermo, A., Neto, F.M., Orihuela, L., 2025. Parameter calibration of agricultural irrigation networks using genetic algorithms. XX Simposio CEA de Control Inteligente, Huelva (Spain), 2025.

Resumen

Este trabajo presenta una metodología de calibración para el ajuste de parámetros de una red de riego. El objetivo es ajustar el modelo hidráulico para reflejar con mayor precisión las condiciones reales de operación. Para ello, se hace uso de datos de sensores de presión y caudal. Las variables de decisión son las rugosidades de las tuberías, que tienen un rol clave porque afectan a las pérdidas de carga en la distribución. Se aborda este problema mediante el uso de algoritmos genéticos, ya que el número de variables de decisión es muy grande y el modelo hidráulico es no lineal. El trabajo analiza el impacto que tiene en los resultados de la calibración el hecho de considerar las rugosidades por tipo de material o por tubería independiente. La metodología se aplica a una red real de riego de una finca de 125ha de cítricos en Huelva, mostrando una mejoría en la capacidad de predicción del modelo calibrado, del 10,8 % en el índice de Willmott para las presiones, frente al modelo inicial diseñado con los datos del productor.

Palabras clave: Sistemas de Riego, Optimización Heurística, Calibración Basada en Datos, Algoritmos Genéticos, Modelado Hidráulico

Parameter calibration of agricultural irrigation distribution networks using genetic algorithms

Abstract

This paper presents a calibration methodology for adjusting the parameters of an irrigation network. The objective is to adjust the hydraulic model to reflect more accurately the real operating conditions. For this purpose, data from pressure and flow sensors are used. The decision variables are pipe roughness, which plays a key role because it affects distribution head losses. This problem is addressed by using genetic algorithms, since the number of decision variables is very large and the hydraulic model is nonlinear. The work analyzes the impact on the calibration results of considering roughness by material type or by independent pipe. The methodology is applied to a real irrigation network of a 125ha citrus farm in Huelva, showing an improvement in the prediction capacity of the calibrated model of 10.8 % in the Willmott index for pressures, compared to the initial model designed with the producer's data.

Keywords: Irrigation Systems, Heuristic Optimization, Data-driven Calibration, Genetic Algorithms, Hydraulic Modeling.

1. Introducción

La agricultura es, con diferencia, la principal actividad de consumo de agua en todo el mundo. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, la actividad agrícola representa en promedio el 70 % del uso del agua potable (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017). Se estima que la disponibilidad del agua disminuirá hasta un 40 % (European Environment Agency, 2021) en algunas regiones. Así, en zonas vulnerables de clima seco,

como es el caso de la península ibérica, se presenta un reto sustancial en el presente y de cara al futuro. La optimización del uso de este recurso es, por tanto, primordial.

Muchos sistemas de distribución de agua se encuentran desactualizados, diseñados con estándares que no optimizan el uso de este recurso, lo que, junto al uso de técnicas obsoletas, da lugar a que se produzca un malgasto del agua. Actualizar o reemplazar estas conexiones masivamente, requeriría un desembolso financiero y tiempos de inactividad significativos, encontrar

una metodología con la que conocer, detectar y localizar estas pérdidas o fugas, es, por tanto, una necesidad.

Los métodos de detección de fugas que pueden llegar a plantearse, deben estar fundamentados en el conocimiento acertado de los sistemas de riego; de lo contrario, estos modelos llegarán a conclusiones desacertadas. La problemática para encontrar buenos modelos radica en la naturaleza multivariable de este problema. Conocer estos parámetros de manera simultánea y sus relaciones no es tarea sencilla. Será necesario ajustar una gran cantidad de parámetros cuyas relaciones no son lineales.

Para llevar a cabo el ajuste de estos parámetros es necesario abordar el problema de la calibración de estos modelos. En general, se busca minimizar las diferencias del modelo hidráulico con respecto a la realidad, por lo que estamos ante un problema de optimización desde el punto de vista matemático. Este problema puede abordarse mediante la implementación de diversos métodos deterministas o heurísticos. En el caso de las redes agrícolas, a causa de las dimensiones que éstas presentan comúnmente, nos vemos obligados a hacer uso de los segundos.

A pesar de que en redes de distribución de agua potable, el problema de la calibración de modelos es ampliamente tratado, en redes agrícolas no encontramos una amplia bibliografía que aborde este problema. Profundizar en este problema, permitirá hacer estudios más precisos sobre cuestiones como la localización óptima de sensores, el impacto de modificaciones puntuales en la red, etc.

En este texto, definimos el paradigma problema para un caso concreto de este tipo de redes, creando un modelo para su simulación, e implementamos una propuesta de calibración mediante algoritmos genéticos, que desarrolla el problema de optimización paso a paso.

2. Materiales

2.1. Características de redes de riego

El objetivo principal de una red de riego es distribuir el agua de manera eficiente y controlada a determinadas áreas de cultivo, utilizando una estructura unidireccional diseñada para dar servicio simultáneo a zonas específicas denominadas sectores de riego.

A diferencia de las redes de distribución de agua potable o industrial, las redes de riego tienen la necesidad de variar en función de las particularidades de la demanda hídrica de los cultivos, que varía a lo largo del tiempo. Por ello, es necesario generar distintos programas de riego que varíen las condiciones del modelo de manera dinámica para regular convenientemente la actividad en este tipo de redes, lo que incrementa su complejidad respecto a otros sistemas de distribución de agua.

En la Figura 1 se ilustra el proceso de distribución unidireccional del agua, así como los diferentes elementos partícipes en este proceso, a saber:

- **Cabezal de riego:** el agua entra a la red a partir de pozos, estanques u otros reservorios, o de la comunidad de regantes. Ésta se ve impulsada gracias a la acción de bombas que posibilitan su suministro a toda la finca, según las necesidades programadas o estimadas.
- **Línea principal:** El agua se distribuirá por la red, a través de la línea principal, común a cualquier red de riego, en

dirección a los hidrantes, que conectan con las líneas secundarias.

- **Hidrantes:** estos elementos incluyen, entre otros, válvulas para conectar y desconectar los sectores seleccionados. En muchas ocasiones, son válvulas reductoras de presión, para ajustar ésta a las necesidades del sistema de riego. La Figura 2 muestra un hidrante, con la válvula reductora, una ventosa de succión, y sensores de presión y caudal.
- **Sectores de riego:** representan las líneas de distribución, secundarias y terciarias, que alimentan los goteros/aspersores, que desembocan junto a los cultivos.

Un **programa de riego** no es más que una configuración de la red definida por unos sectores en riego y otros sin riego.



Figura 2: Hidrante con válvula reductora, ventosa y sensores de presión y caudal.

2.2. Modelado en redes de riego

Una red de riego, como una red de agua general, se modela como un conjunto de nodos que se interconectan mediante una serie de enlaces o tuberías. Además, se introducen elementos hidráulicos tales como bombas, depósitos, válvulas, etc. El objetivo del modelo es el de predecir el valor de presiones y caudales en todos los puntos de la red. En concreto, las variables a obtener serían:

- $P^{(j,k)}$: presión en el nodo j bajo el programa de riego k , donde $j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}$,
- $C^{(i,k)}$: presión en el tubería $i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K}$,

donde \mathcal{J}, \mathcal{I} representan, respectivamente, el conjunto de nodos y tuberías de la red, y \mathcal{K} representa el conjunto de programas de riego.

Estas variables se relacionan a través de las ecuaciones físicas que modelan el proceso hidráulico, y las ecuaciones que modelan cada uno de los elementos del sistema. Las principales ecuaciones del modelo son (White, 2011):

- **Ecuación de continuidad:** La ecuación de continuidad expresa la conservación de la masa en el sistema. Esta es,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0,$$

donde ρ es la densidad del fluido, $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ el vector velocidad del fluido, que cuya dirección será desde la estación de bombeo hasta los goteros, y t el tiempo. Para fluidos

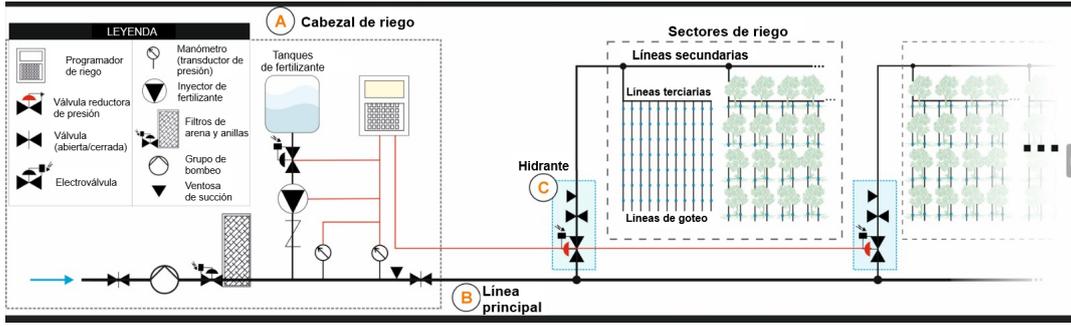


Figura 1: Diagrama de distribución de agua en redes de riego agrícolas.

incompresibles la ecuación de continuidad se simplifica al gradiente de la velocidad del fluido, $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$. Se deduce,

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} C^{(i,k)} = \delta_{j,k}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (1)$$

donde $\delta_{j,k}$ es la demanda neta del nodo j en el programa k . Esta ecuación garantiza que, para cada nodo j bajo un programa de riego k , el balance de caudales sea igual a la demanda neta.

- **Ecuación de conservación de la energía:** A partir del principio de Bernoulli para la conservación de la energía, incluyendo un factor de pérdidas, se deduce la expresión:

$$\frac{P^{(j,k)}}{\rho g} + \frac{v_j^2}{2g} + z_j = \frac{P^{(j+1,k)}}{\rho g} + \frac{v_{j+1}^2}{2g} + z_{j+1} + R_i(C^{(i,k)}),$$

donde g es la aceleración de la gravedad, v las velocidades, y z las cotas, considerándose constantes entre nodos contiguos. Obtenemos por tanto, una relación para las diferencias de presiones entre dos nodos, j y $j + 1$ dada por:

$$P^{(j,k)} - P^{(j+1,k)} = R_i(C^{(i,k)}), \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (2)$$

donde la tubería i conecta los nodos j y $j + 1$, y $R_i(C^{(i,k)})$ representa la pérdida de carga hidráulica. Como expresión que modela estas pérdidas de carga hay diferentes opciones, entre ellas elegimos la ampliamente usada ecuación empírica de Darcy–Weisbach, que relaciona la pérdida de carga en una tubería con el caudal $C^{(i,k)}$ mediante la forma

$$R_i(C^{(i,k)}) = r_i \cdot |C^{(i,k)}|^\gamma \cdot \text{sign}(C^{(i,k)}),$$

con:

$$r_i = f_i(\epsilon_i) \frac{8L_i}{\pi^2 g D_i^5}, \quad \gamma = 2,$$

siendo, L_i la longitud de la tubería i , D_i su diámetro interior y $f_i(\epsilon_i)$ el factor de fricción de Darcy para ese enlace, que siempre dependerá de la rugosidad ϵ_i de esa tubería, y tomará una expresión u otra según el régimen de flujo. El modelado de válvulas y bombas puede realizarse de manera análoga, mediante coeficientes de pérdida o curvas características que relacionan caudal y carga.

En general, un modelo hidráulico de una red de riego normal tiene muchas variables y las ecuaciones que lo rigen son no lineales. Es por esto, por lo que se han popularizado diferentes paquetes de simulación especializados en este tipo de sistemas. Entre ellos, el más usado en una extensa parte de la bibliografía es EPANET 2.2, que se basa en las ecuaciones mencionadas, asumiendo las demandas fijas. Entre las distintas opciones que presenta EPANET para simular las pérdidas de carga, usamos coherentemente la expresión de Darcy–Weissbach, donde el factor de fricción $f_i(\epsilon_i)$ irá en función del régimen en el que el simulador estime que se encuentra la simulación (Rossman, 2000).

2.3. Calibración de redes de riego

Las ecuaciones del modelo hidráulico dependen de una serie de parámetros que, en general, son difíciles de conocer con precisión. Algunos de los más importantes son:

- ϵ_i , $i \in \mathcal{I}$: rugosidad de la tubería, que será igual para todos los programas de riego.
- $\delta_{j,k}$, $j \in \mathcal{J}$, $k \in \mathcal{K}$: demanda en el nodo j y programa de riego k .
- D_i , $i \in \mathcal{I}$: diámetro interior de la tubería i .
- L_i , $i \in \mathcal{I}$: longitud de la tubería i .
- Parámetros de bombas o válvulas (si existen), tales como curvas características que pueden depender de parámetros calibrables, como la eficiencia de los motores.

La calibración de estos parámetros es esencial para obtener modelos precisos de la red hidráulica que reproduzcan adecuadamente el comportamiento real bajo distintas condiciones operativas. De todos estos parámetros, en este trabajo asumimos conocidos los relativos a la topología de la red, es decir, los diámetros, longitudes y alturas, mientras que consideraremos las rugosidades desconocidas; éste es el parámetro a calibrar.

2.4. Caso de estudio

En esta investigación, este enfoque se aplica al paradigma de la finca **Covadonga** de 125 hectáreas dedicadas a la producción de cítricos, y ubicada en el oeste de la provincia de Huelva. A partir de los datos topológicos y aproximaciones sobre las demandas de consumo de los sectores basadas en datos del productor, elaboramos un modelo hidráulico, representado en la Figura 3.

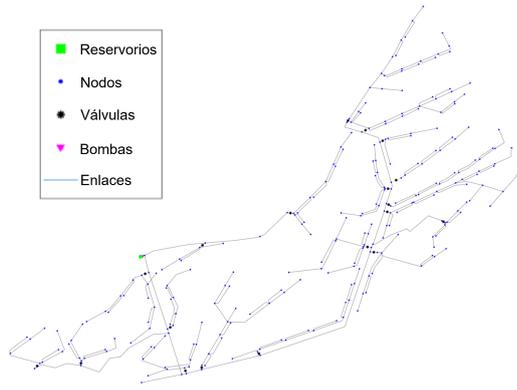


Figura 3: Modelo de la red de distribución a calibrar.

Los componentes de este modelo se detallan en la Tabla 1. Si nos fijamos en éstos, vemos el carácter jerárquico de la red, que, considerándola como un grafo, cumple que el número de enlaces (tuberías y válvulas, en este caso) es igual al número de nodos menos uno, $|\mathcal{I}| + |\mathcal{V}| = |\mathcal{J}| - 1$, donde $|\cdot|$ representa la cardinalidad del conjunto. Esta es una cualidad de una red conexa sin ciclos, es decir, un árbol (Diestel, 2017).

Tabla 1: Elementos de la red hidráulica Covadonga

Elemento	Cantidad
Nodos (\mathcal{J})	269
Tuberías (\mathcal{I})	249
Estaciones de bombeo	1
Reservorio (unión a la comunidad de regantes)	1
Válvulas reductoras de presión (\mathcal{V})	19
Sensores de presión (nodos críticos)	38
Contadores de agua	19

3. Métodos

3.1. Presentación del problema

3.1.1. Parámetros de calibración

El proceso de calibración consiste en ajustar las rugosidades ϵ_i de cada tubería de manera sintética, buscando únicamente que el comportamiento hidráulico simulado se asemeje al observado en campo. Este factor representa la altura promedio de las irregularidades internas de la superficie de la tubería (Brown, 2002). Se mide en milímetros y refleja el desgaste, la corrosión y la acumulación de sedimentos que afectan la resistencia al flujo dentro de la red hidráulica.

El problema se plantea a través de la suposición de dos hipótesis, de manera independiente, estimando que la degradación de la red ocurre de manera homogénea para aquellas tuberías que se componen del mismo **material**; y falsando esta primera hipótesis al considerar que no hay homogeneidad en la degradación, por lo que se necesitaría ajustar la rugosidad de cada tramo de la red de manera **individual**.

3.1.2. Función objetivo y restricciones

La calibración del modelo hidráulico se fundamenta en minimizar la diferencia entre las variables hidráulicas medidas en campo y las simuladas por el modelo, específicamente presiones y caudales en puntos estratégicos de la red. Para ello, se

define una función objetivo $J(\epsilon)$, $\epsilon = \{\epsilon_i, i \in \mathcal{I}\}$, que cuantifica el error relativo cuadrático medio, incorporando además una penalización para evitar soluciones no físicas como presiones negativas en nodos críticos.

La función objetivo se expresa formalmente como:

$$J(\epsilon) = \sum_{k \in \mathcal{K}} \left(\sum_{j \in \mathcal{J}} \alpha \left(\tilde{P}^{(j,k)} \right) \cdot \left(\frac{\tilde{P}^{(j,k)} - P^{(j,k)}(\epsilon_i)}{\tilde{P}^{(j,k)}} \right)^2 + \sum_{i \in \mathcal{I}} \beta \left(\tilde{C}^{(i,k)} \right) \cdot \left(\frac{\tilde{C}^{(i,k)} - C^{(i,k)}(\epsilon_i)}{\tilde{C}^{(i,k)}} \right)^2 \right) + \lambda \cdot \max \left(0, - \min_{j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}} P^{(j,k)}(\epsilon_i) \right), \quad (4)$$

donde, $\tilde{P}^{(j,k)}$ y $\tilde{C}^{(i,k)}$ están relacionados con los valores observados de presión y caudal en el programa k y nodo j o enlace i respectivamente, siendo detallados en la Sección 3.3. Los términos $\alpha(\tilde{P}^{(j,k)})$ y $\beta(\tilde{C}^{(i,k)})$ ponderan los errores asociados a los valores medidos, penalizando aquellos con mediciones estadísticamente dispares (ver Sección 3.3). Finalmente, λ es un coeficiente de penalización alto (e.g., 10^4) que se activa cuando alguna presión simulada de los nodos críticos es negativa, para desalentar soluciones no físicas. Esto sucede cuando la simulación hidráulica arroja una solución que no tiene sentido físico para la configuración aportada, y EPANET lo resuelve arrojando presiones negativas.

Respecto a las restricciones, el problema de optimización se plantea con los límites físicos de búsqueda en los parámetros a optimizar. Cada coeficiente de rugosidad ϵ_i está acotado entre valores mínimos y máximos que reflejan condiciones reales de las tuberías. Formalmente:

$$\epsilon_{min} \leq \epsilon_i \leq \epsilon_{max}, \quad \forall i \in \mathcal{I}$$

con valores típicos en milímetros, en nuestro caso $0,001 \leq \epsilon_i \leq 50$, rango que cubre desde tuberías plásticas lisas hasta conducciones corroídas (Mays, 1999).

3.2. Calibración mediante algoritmos genéticos

Para resolver el problema de optimización no lineal asociado a la calibración de las rugosidades, se hace uso de un algoritmo genético (GA) en MATLAB R2024b. Este método es adecuado para explorar espacios de solución complejos sin depender de derivadas o aproximaciones lineales, y es robusto frente a óptimos locales. El algoritmo genético emula el proceso de evolución biológica para encontrar las soluciones óptimas. La filosofía de los algoritmos genéticos es emular la evolución de una población de especies a lo largo del tiempo y, al igual que afirma esta teoría, hacer prevalecer a los individuos de las poblaciones que son mejores frente al resto; en nuestro caso, prevalecen aquellas soluciones que minimicen esas diferencias del modelo con la realidad. La implementación del algoritmo genético se realiza a través de la función `ga()` de la *Global Optimization Toolbox* de MATLAB.

El proceso general del algoritmo genético, de manera análoga a lo que estipula la biología, se compone de las siguientes etapas:

- **Inicialización:** Se genera una población inicial de soluciones candidatas, con valores aleatorios dentro de los límites establecidos.

- **Evaluación:** Para cada individuo (vector ϵ) se ejecuta la simulación hidráulica con los parámetros propuestos, calculando la función objetivo $J(\epsilon)$.
- **Selección:** Se eligen los individuos con mejor desempeño (menores valores de J), empleando métodos como ruleta ponderada o selección directa (elitismo).
- **Cruce:** Se combinan pares de individuos seleccionados para crear descendientes que hereden características de ambos, buscando generar nuevas soluciones potencialmente mejores.
- **Mutación:** Se aplican pequeñas modificaciones aleatorias a algunos individuos para mantener diversidad genética y evitar convergencia prematura.
- **Reemplazo:** Se conforma la nueva generación con la descendencia y algunos individuos elitistas de la generación anterior.

Problema 1. Dada la función de coste (4), donde las presiones y caudales se relacionan a través de (2) y (3), escoger el conjunto de variables de decisión $\epsilon = (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n)$, que representan los coeficientes de rugosidad de las tuberías, tal que:

$$\min_{\epsilon} J(\epsilon) \quad (5)$$

$$\text{sujeto a } \epsilon_{\min} \leq \epsilon_i \leq \epsilon_{\max}, \quad \forall i \in \mathcal{I}. \quad (6)$$

El algoritmo genético se usa para resolver el Problema 1 bajo dos consideraciones: asumiendo que todas las tuberías que son del mismo material tienen que compartir el coeficiente de rugosidad, y considerando un coeficiente de rugosidad diferente para tubería. La primera consideración establece, de forma efectiva, una restricción a los elementos de la población.

Este ciclo se repite hasta alcanzar un criterio de convergencia definido por un número máximo de generaciones o por estabilidad en la función objetivo.

3.3. Preprocesamiento de los datos

Como se ha dicho en la Sección 2.4, se instalaron sensores de presión y de volumen en diferentes posiciones de la red. Estos sensores toman datos cada 2.5 minutos. Como un programa de riego tiene una duración mayor (típicamente de 30 ó 60 minutos), se disponen de muchas muestras de presión y de pulsos de volumen por cada programa de riego.

Vamos a denotar $P^{(j,k)}(t)$, $V^{(i,k)}(t)$ a los valores de presión y pulsos de volumen medidos en el nodo j o tubería i para el programa de riego k en el instante de tiempo t . A partir de estas series de datos, se obtienen las medidas representativas de presión y caudal que se emplean en (4):

- **Presión** en el nodo $j \in \mathcal{J}$:

$$\tilde{P}^{(j,k)} = \frac{1}{T} \sum_{l=0}^{T-1} P^{(j,k)}(l \cdot T_s), \quad (7)$$

donde T el número de muestras obtenidas en esa serie de datos y $T_s = 2.5\text{min}$ el tiempo de muestreo. El peso para la presión en (4) se define como: $\alpha(\tilde{P}^{(j,k)}) = 1/(\kappa \cdot \sigma_{j,k} + 1)$, donde $\sigma_{j,k}$ es la desviación típica de los valores observados $P^{(j,k)}(t)$ y κ una constante positiva, que regula la influencia de esta desviación.

- **Caudal** en la tubería $i \in \mathcal{I}$: dado el volumen acumulado $V_{\mathcal{T}}^{(i,k)} = \{V^{(i,k)}(l \cdot T_s)\}_{l=0}^{T-1}$, obtenido a partir de los pulsos medidos por los contadores de agua, donde 1 pulso equivale a 0.1m^3 , en el conjunto de tiempos $\mathcal{T} = \{l \cdot T_s\}_{l=0}^{T-1}$, el caudal estimado $\tilde{C}^{(i,k)}$ se obtiene como la pendiente de la regresión lineal

$$V_{\mathcal{T}}^{(i,k)} = \tilde{C}^{(i,k)} \cdot \mathcal{T}, \quad (8)$$

Siendo el peso asociado a los datos de caudal, presente en (4), definido como: $\beta(\tilde{C}^{(i,k)}) = R_{i,k}^2$, con $R_{i,k}^2$ el coeficiente de determinación de la regresión.

4. Resultados

Los resultados que se presentan en esta sección se obtienen con los parámetros del algoritmo que se estipulan en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros del algoritmo genético

Parámetro	Valor
Población	50 individuos
Generaciones	1000
Elitismo	2 mejores individuos
Cruce	crossoverscattered (mezcla aleatoria)
Mutación	mutationadaptfeasible (perturbaciones viables)
Selección	selectionroulette (ruleta estocástica)
Parada	Tolerancia 10^{-8} o estancamiento 20 gen.

El proceso de entrenamiento arroja los valores que se incluyen en la Tabla 3. Ambas hipótesis mejoran el valor de la evaluación de la función objetivo llevada a cabo con el vector de rugosidades inicial obtenido a partir del tipo de material de cada tubería. Se observa que la calibración individual es más óptima que la optimización por material, por lo que se toman estos parámetros como los característicos de nuestro nuevo modelo calibrado.

Tabla 3: Resultados del algoritmo genético para las distintas hipótesis de optimización

	Por Material	Individual
Generaciones alcanzadas	83	878
Ajuste en las condiciones iniciales	0.9413	0.9413
Mejor ajuste	0.7299	0.6007
Porcentaje de mejora	22.46 %	36.19 %
Tiempo de cómputo	2927 (s)	24277 (s)
Criterio de parada	Tolerancia	Tolerancia

Tras el proceso de calibración, una vez estipulado el nuevo modelo, llevamos a cabo una fase de validación con otro conjunto de datos no usados para entrenar. Podemos ver una representación del ajuste lineal de las simulaciones, antes y después de la calibración, para los datos de caudal, en la Figura 4 y presión, en la Figura 5, normalizados a su valor máximo, donde se ha representado la recta $X_{med} = Y_{sim}$, sirviendo como referencia para ver la similitud de los datos simulados con los reales.

Para una comparativa cuantitativa de los resultados, se ha hecho uso del índice de Willmott:

$$d_w(S_i, O_i) = 1 - \frac{\sum (S_i - O_i)^2}{\sum (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

que mide la concordancia entre valores observados y predichos; y donde S_i son los valores simulados, O_i los observados y \bar{O} es la media de los observados. Toma valores entre 0 (sin concordancia) y 1 (concordancia perfecta) (Willmott, 1981). En la Tabla 4, podemos ver una comparativa entre estos índices para el modelo estimado inicial, sin calibrar, y para el modelo calibrado.

Tabla 4: Índice de concordancia de Willmott para presiones y caudales

	$d_w(P^{(j,k)}, \bar{P}^{(j,k)})$	$d_w(C^{(j,k)}, \bar{C}^{(j,k)})$
Modelo sin calibrar	0.36128	0.77905
Modelo calibrado	0.46895	0.77905

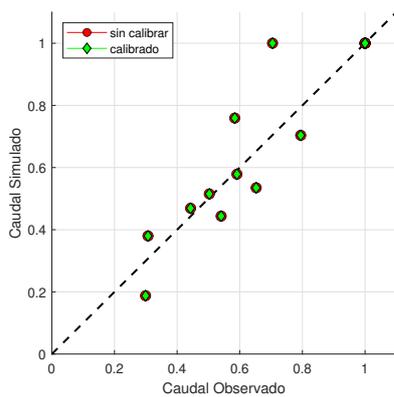


Figura 4: Ajuste lineal de los caudales simulados con respecto a los reales

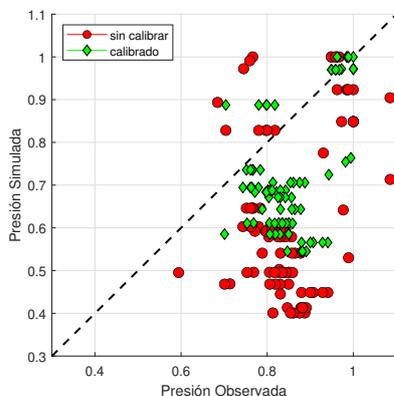


Figura 5: Ajuste lineal de las presiones simuladas con respecto a las reales

5. Discusión

La calibración del modelo mejora las simulaciones de presión, como refleja el aumento del coeficiente de concordancia, presente en la Tabla 4, y la mayor proximidad entre los valores simulados y observados, ilustrada en la Figura 5. En cambio, los caudales apenas muestran cambios significativos, tanto en dicho coeficiente como en la comparación gráfica de la Figura 4. La calibración agrupada por material resulta más eficiente computacionalmente. Sin embargo, la calibración individual por tubería, aunque diez veces más costosa, logra una mejora del ajuste del 13,7 %, como se expone en la Tabla 3, lo que evidencia una compensación entre precisión y coste .

La limitada mejora global puede deberse a varios factores; que la calibración se haya realizado únicamente sobre un subconjunto reducido de parámetros, sin ajustar otros factores relevantes como las pérdidas localizadas o demandas reales; que los datos presentan un nivel considerable de ruido, especialmente en las series de presiones; o que el propio modelo hidráulico es estacionario y no contempla fenómenos como fugas o transitorios. Todo ello limita el potencial de ajuste, incluso con una estrategia de calibración precisa.

Esta metodología permite mejorar modelos hidráulicos de forma poco costosa, apenas intrusiva y realista, ajustándolos a condiciones observadas. No obstante, su precisión depende de la calidad de los datos y puede implicar altos costes computacionales sin garantizar soluciones óptimas.

6. Conclusiones

A pesar de ver la efectividad de aplicar algoritmos genéticos a los modelos hidráulicos, cuya eficiencia se demuestra en el hecho de que incluso tomando la hipótesis más simple encontramos una mejoría del ajuste de la función objetivo, es decir, una disminución del error relativo entre las medidas reales y simuladas, podemos asegurar que la extensión de la calibración es insuficiente.

El carácter multimodal y extremadamente complejo de los modelos hidráulicos en sistemas de riego agrícola hace imposible que, centrándonos solo en algunos parámetros para la calibración, seamos capaces de caracterizarla con precisión. En nuestro caso, este aspecto se manifiesta claramente en la falta de ajuste en los caudales, al no haber abordado la calibración del parámetro del que refieren mayor dependencia, i.e. las demandas.

Por la complejidad del problema que abordamos y fijándonos en la trascendencia tanto económica como incluso vital para muchas regiones, urge el profundizar y avanzar en nuevas y más detalladas técnicas de calibración de modelos de riego, con el fin de mitigar los efectos adversos que el mal uso del agua pueda causar.

Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto GOPG-SE-23-0003, financiado por la Junta de Andalucía en el marco de los Grupos Operativos de la Asociación Europea de Innovación (AEI).

Referencias

- Brown, G., 2002. The History of the Darcy-Weisbach Equation for Pipe Flow Resistance. Proceedings of the Environmental and Water Resources History Conference 38, 39, DOI: 10.1061/40650(2003)4.
- Diestel, R., 2017. Graph Theory, 5th Edition. Springer.
- European Environment Agency, 2021. Water and agriculture: towards sustainable solutions. Tech. Rep. EEA Report No 17/2020, DOI: 10.2800/73735.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017. Water for Sustainable Food and Agriculture: A Report Produced for the G20 Presidency of Germany. Tech. rep.
- Mays, L. W., 1999. Hydraulic Design Handbook, 1st Edition. McGraw-Hill Education, New York.
- Rossman, L. A., 2000. EPANET 2: Users Manual. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, EPA/600/R-00/057. URL: nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1007WU.TXT
- White, F. M., 2011. Fluid Mechanics, 7th Edition. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering. McGraw-Hill, New York.
- Willmott, C. J., 1981. On the validation of models. Physical Geography 2 (2), 184–194, DOI: 10.1080/02723646.1981.10642213.