

# Evaluación y clasificación de efectos de fugas en la red de abastecimiento de Moratalla (Murcia) para la priorización del mantenimiento de tuberías.

Casanova A.<sup>a1</sup>, Viguera-Rodríguez A.<sup>a2</sup>, García J.T.<sup>a3</sup> y Castillo L.G.<sup>a3</sup>

<sup>a</sup>Grupo de I+D+i en Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental (Hidr@m), Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 52. E-mail: <sup>a1</sup>casanovagonzalez.a@gmail.com, <sup>a2</sup>aviguera.rodriguez@upct.es, <sup>a3</sup>juan.gbermejo@upct.es, <sup>a4</sup>luis.castillo@upct.es

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua.

---

## RESUMEN

El presente trabajo busca proporcionar una herramienta informática de apoyo que sirva para priorizar la gestión de activos en las redes de abastecimiento de agua potable. Para ello, se ha simulado sobre una red existente y modelizada en *Epanet* una serie de fugas en cada una de las tuberías apoyándose en otra herramienta informática de libre acceso: *Epanet Toolkit-GNU Octave*. Se han obtenido los resultados tras la simulación de cada una de las tuberías de la red en función de distintos parámetros tales como: caudal máximo de fuga, caudal medio de fuga y otros. En base a dichos resultados se propone una categorización de las tuberías. Dicha categorización servirá como apoyo a la priorización de las inversiones en mantenimiento, sensorización y renovación de conducciones. También se estudia su aplicación en estudios de calidad de agua de redes de abastecimiento.

**Palabras clave** | gestión de agua; fugas; red de abastecimiento; categorización de tuberías; *Epanet Toolkit*; Moratalla.

---

## INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos más relevantes en la gestión de riesgos es la evaluación del efecto que puede ocasionar cada uno de los posibles fallos de un sistema. En sistemas de abastecimiento de agua, la mayoría de los fallos provienen de fugas en las tuberías que componen la red. Usualmente son evaluadas en pérdidas de energía para bombear el agua. (Colombo y Karney, 2002; Sahely et al. 2005; Ghorbanian et al. 2017).

La motivación u objetivo general de este trabajo es lograr alcanzar una gestión del activo agua más eficiente. Priorizar y ofrecer una ayuda para la toma de decisiones son algunas de las labores necesarias para acercarse a dicho objetivo. Es por ello, por lo que se decide crear esta herramienta que servirá de apoyo a esas tomas de decisiones.

A modo de un objetivo más específico, lo que se busca es la elaboración de un catálogo de impacto probable de fugas en tuberías de la red de distribución en base a unos determinados índices, orientado a la priorización de los gastos públicos.

---

## CONTEXTUALIZACIÓN

La red de abastecimiento de Moratalla proporciona suministro a más de 8000 habitantes (año 2014), los cuales habitan viviendas tanto de tipo casco urbano como en bloques exentos.

En el extrarradio de la localidad, la mayoría de las viviendas son de carácter unifamiliar y, además, también cobra gran importancia de cara a los consumos de agua, la presencia de superficies dedicadas a la agricultura y algún establecimiento ganadero.

## DESCRIPCIÓN DE LA RED DE ABASTECIMIENTO

La red se encuentra parcialmente mallada en su conjunto, sobre todo en la zona del casco urbano, pero a medida que nos alejamos de él se va ramificando hasta los puntos más lejanos de la red.

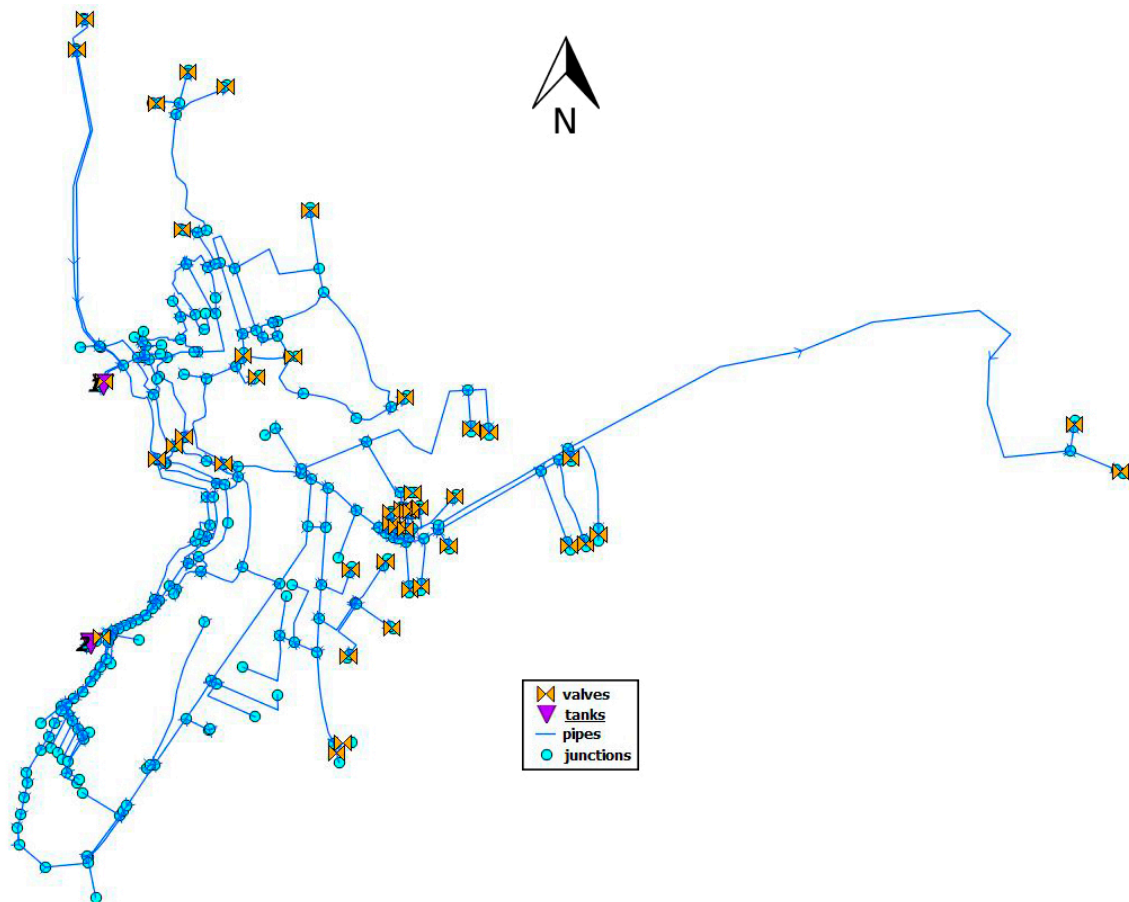


Figura 1 | Red de abastecimiento de Moratalla.

La gran mayoría de las **tuberías** presentes en la red están constituidas por material de fibrocemento, aunque también se dan tuberías de PVC y acero galvanizado. Los diámetros de dichas tuberías van desde los 32 mm hasta los 300 mm, siendo las más usadas aquellas de diámetro 80 mm.

Así mismo, la red cuenta con unos **70 nodos** de consumo en el plano. Cada uno de esos nodos incorpora una demanda base en función del distinto uso para su consumo. Una vez establecida la demanda base de cada nodo, se adjuntaron una serie de patrones determinados que representan la curva de demanda discretizada en horas (en este caso con una duración total del modelo de una semana).

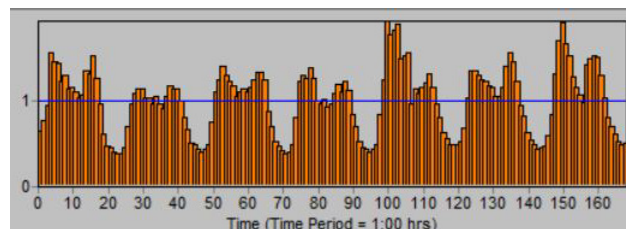


Figura 2 | Patrón semanal de los nodos de consumo relativos al sector abastecido por el depósito MCT.

El abastecimiento de la red se realiza mediante dos **depósitos**: *depósito nuevo* y *depósito viejo*. El primero de ellos es gestionado por la Mancomunidad de los Canales del Taibilla, y situado en el sur-oeste del municipio, cuenta con una elevación

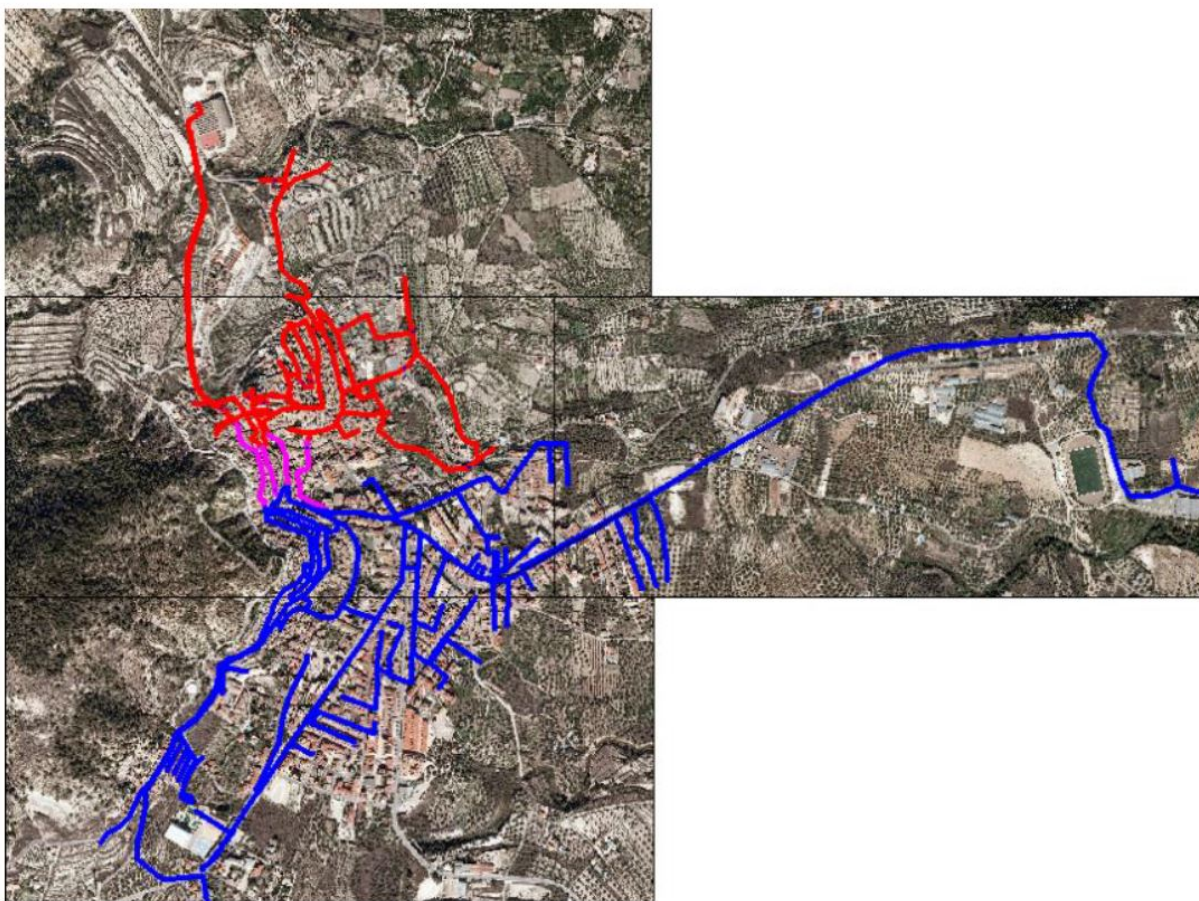
V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

de 690 msnm y un volumen de unos 2000 m<sup>3</sup>; dicho depósito se encarga de abastecer entorno el 50-60% de las demandas ubicadas en la parte media-baja del municipio.

Por otro lado, el *depósito viejo* es gestionado por la empresa concesionaria *Aqualia*; Éste se ubica en la zona noroeste de la red, tiene una elevación de 694 msnm y una capacidad de unos 800 m<sup>3</sup> y se encarga del abastecimiento del 40-50% de las demandas restantes. El suministro de este depósito proviene tanto de la Mancomunidad del Taibilla como de un pequeño afluente conocido como “El Cañico”.

Estos mismos depósitos son los que originan la separación en dos sectores (Figura 3) que existe en la red. Por un lado, el sector norte es abastecido por el *depósito viejo*; mientras que el sector sur es abastecido por el *depósito nuevo* o *depósito MCT*.

Los depósitos a su vez son abastecidos aguas arriba gracias a otro depósito a cargo de la Mancomunidad de los Canales del Taibilla ubicado a una mayor cota.



**Figura 3** | Sectores de la red de abastecimiento de Moratalla.

Dada la compleja orografía presente en el municipio de Moratalla, aparte de no necesitar de ninguna impulsión, se hace necesaria la presencia de **válvulas** en la red de abastecimiento para controlar la presión con la que el agua llega a los puntos de consumo. La red cuenta con diversas válvulas de retención, encargadas de mantener una presión no superior a lo previamente establecido.

Por otro lado, dentro de la red de abastecimiento al existir dos sectores anteriormente mencionados, para materializar la separación de los mismos, se emplean válvulas que, en condiciones normales, cortan el paso entre ambos sectores.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA FUGA

El programa informático para el modelado de redes de abastecimiento *Epanet* permite realizar análisis hidráulicos de redes de tuberías a partir de las características físicas de las tuberías y dinámicas de los nudos (consumos) para obtener la presión y los caudales en nodos y tuberías respectivamente, además de otra serie de parámetros.

El modelo de *Epanet* que puede permitir la simulación de fugas es el “emisor”, aunque éste sólo está definido en los nodos de la red, no en las tuberías. Es por ello por lo que las fugas en una tubería en concreto, se han simulado modelando un emisor en los nodos en los que está conectada dicha tubería, ambas soluciones acotarían los efectos de una fuga en cualquier parte de la tubería. Con los resultados obtenidos de simular la fuga en cada uno de los dos nodos, se pueden calcular los valores máximos o medios para el caudal de fuga u otros parámetros que puedan resultar relevantes para categorizar la tubería.

A la hora de modelar las fugas en una red hidráulica se ha utilizado tradicionalmente como método de referencia aproximada el comportamiento hidráulico de un orificio (Ecuación (1)). (Van Zyl y Clayton, 2007).

$$Q = C_d A \sqrt{2gH} \quad (1)$$

Donde  $Q$  es caudal,  $C_d$  es el coeficiente de descarga,  $A$  es el área del orificio,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $H$  es la carga del agua respecto al orificio. Esta ecuación puede representarse dentro del modelo de emisor de *Epanet* que se describe bajo la Ecuación (2):

$$Q = CP^\gamma \quad (2)$$

Donde  $C$  es un coeficiente que representaría el coeficiente de descarga y la superficie del orificio,  $P$  es la presión del agua en la tubería y  $\gamma$  el exponente.

*Epanet* nos recomienda el uso de un exponente de 0.50, que se correspondería con el modelo de orificio mencionado anteriormente; Sin embargo, diversos autores sugieren que la utilización de valores distintos (desde 0.42 hasta 2.40) puede mejorar el comportamiento de la fuga en función de material del que esté constituida la tubería, dado que el tipo de rotura (longitudinal o en forma de fisura o circular) en éstas varía en función de la constitución de la tubería. (Lambert, 2003)

Además, el comportamiento del fluido dependiendo del régimen al que circule produce variaciones en el coeficiente de descarga a utilizar. No obstante, para este estudio y una primera aproximación se ha adoptado el valor recomendado por EPANET, así como la suposición de régimen turbulento, propio en este tipo de infraestructuras hidráulicas.

En la determinación del coeficiente de fuga toman parte el coeficiente de descarga y el área del orificio de la fuga a suponer. Se puede adoptar 0.61 para el valor del coeficiente de descarga como un valor aceptable. (Neutrium, 2015)

Así mismo, para poder comparar los efectos de un fallo en distintas tuberías en condiciones equiparables, se ha optado por definir un orificio tipo con un diámetro de orificio del 10 % del diámetro de la tubería donde se simula la fuga. A la hora de definir este orificio tipo se ha partido de los valores propuestos en el estudio (De Silva et al. 2011) donde realizan pruebas de fugas en una sección de tubería de diámetro 100 mm con orificios de fuga de valor medio de diámetro 13 mm. Por lo tanto, se van a simular orificios que con diámetros desde 3.2 mm en el caso de las tuberías de 32 mm hasta 30mm en las de 300 mm.

## EPANET TOOLKIT EN GNU OCTAVE

*EPANET Toolkit* es una librería, desarrollada por la “Environmental Protection Agency” de EEUU en C, que permite interactuar con el método de cálculo de *Epanet*. Dicha herramienta puede ser utilizada tanto desde Windows como ser compilado para otras arquitecturas y sistemas operativos. (Rossman, 2000)

Desde el grupo de I+D+I en Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental *Hidr@m*, de la Universidad Politécnica de Cartagena, se ha desarrollado una herramienta libre capaz de llamar a las funciones en C de *EPANET Toolkit* desde GNU Octave. (Vigueras-Rodríguez, 2016)

El hecho de poder trabajar desde GNU Octave, un programa libre similar a *Matlab*, permite emplear operaciones con matrices y vectores para mejorar el uso e incrementar las posibilidades de *EPANET Toolkit*. Es capaz además de acceder al fichero INP de la red de *Epanet* y modificar un gran número de parámetros, elementos y diseño de la red.

Esta herramienta es muy útil por ejemplo en aquellos proyectos donde sea necesario realizar un gran número de simulaciones cambiando determinados parámetros de la red del modelo. Este trabajo es un claro ejemplo, donde para realizar la categorización de las 300 tuberías que compone la red, es necesario definir la fuga en cada uno de los nodos aisladamente y ver y guardar esos resultados de simulación en cada situación.

## SIMULACIÓN DE FUGAS

A través de la herramienta *EPANET Toolkit* y el empleo de GNU Octave, se ha procedido a la creación de un código de programación que permita simular procesos de fuga a lo largo de todas las tuberías de la red de abastecimiento.

A continuación, se muestra y se explica la representación del diagrama de flujo (el cual se encuentra dividido en tres figuras) representando el código de programación para la categorización de las tuberías de la red.

En la Figura 4 se expresa la primera parte del código. En ella, se lee el fichero INP relativo a nuestra red de abastecimiento, que previamente deberemos tener modelada y calibrada en *Epanet*; acto seguido se abre el módulo para el cálculo hidráulico presente en *Epanet Toolkit* para poder modificar dicho cálculo y definir previamente las variables que queremos calcular. El siguiente paso es empezar a recorrer cada una de las tuberías de nuestra red, donde en cada una de ellas, detectamos los nodos (inicial y final) a los que dicha tubería  $n$  está conectada y se realiza la simulación para ese *nodo inicial* de la tubería  $n$  en cuestión.

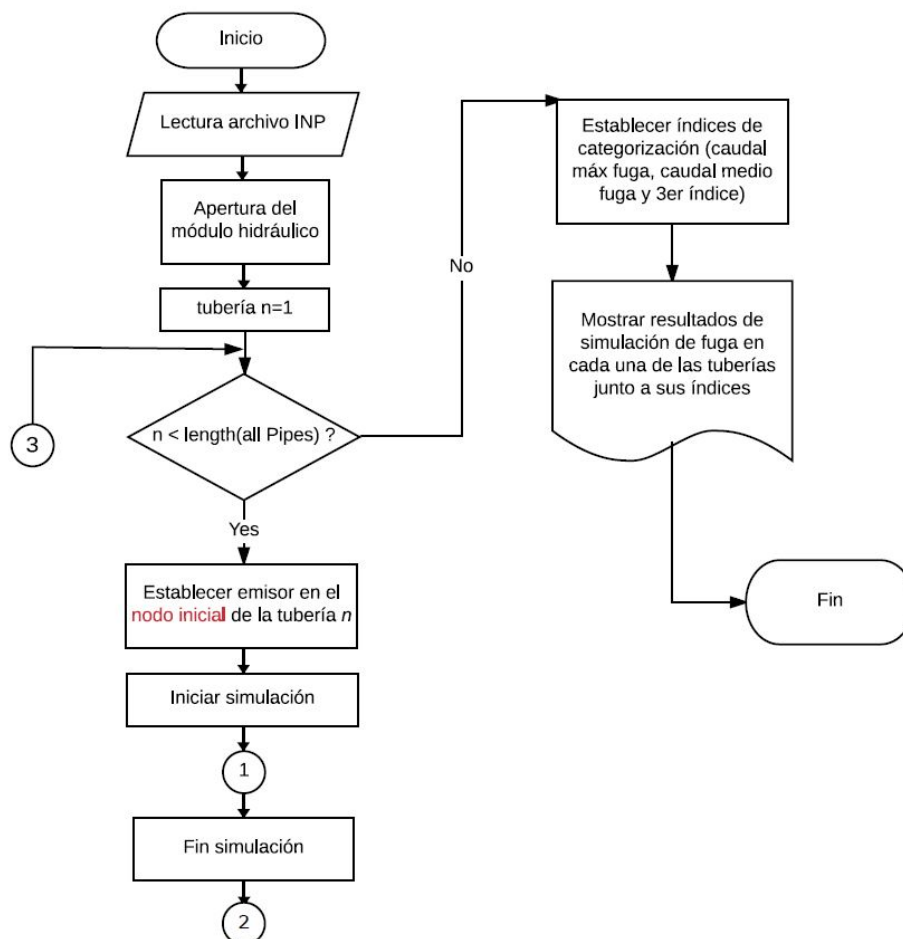


Figura 4 | Diagrama de flujo I.

Dentro de la simulación para ese *nodo inicial* (Figura 5), es donde tiene lugar todo el proceso de simulación de la fuga. En ese *nodo inicial* en función de las características de su tubería *n* (su diámetro), le es asignada su *fuga tipo* y ya comienza a correr temporalmente la simulación.

En cada paso temporal (cada hora) va guardando un conjunto de variables que nos permitan posteriormente evaluar cada fuga. En este caso, algunas de las variables definidas han sido el caudal de fuga que sale a través del *nodo inicial*, los niveles de altura de agua de los depósitos que abastecen la red, una lista con los nodos de consumo que en ese paso temporal su presión haya decaído por debajo de 20 mca y por encima de 50 mca, y el caudal total que dejamos de suministrar en condiciones aceptables definido como el caudal de todos aquellos nodos con presión inferior a 20 mca. Así hasta la duración total de la simulación, que para este modelo de *Epanet* es de 7 días. Transcurrida la simulación completa, se realiza el mismo proceso en el *nodo final* de la misma tubería *n* (Figura 6).

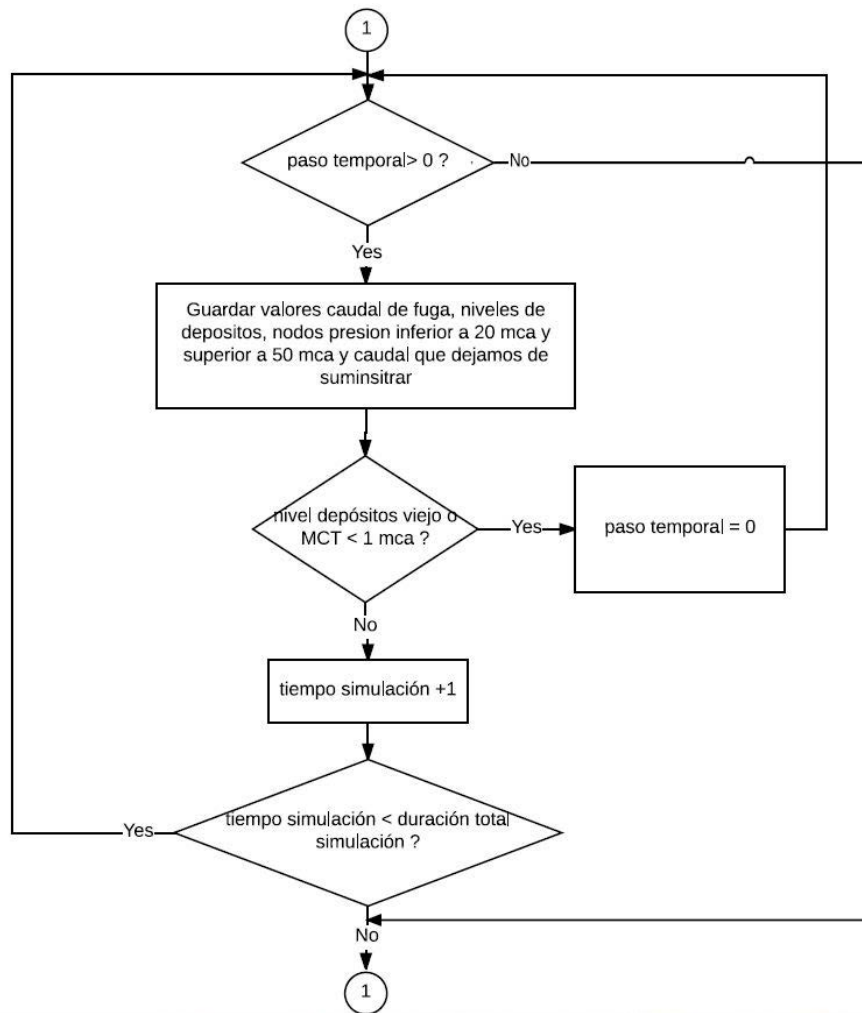


Figura 5 | Diagrama de flujo II.

Una vez realizado el idéntico proceso para el *nodo final*, continua la simulación de fugas con la siguiente tubería y realizando el mismo proceso hasta completar todas las simulaciones de todas las tuberías de la red de abastecimiento.

Tras realizar la simulación en todas las tuberías (Figura 4) y con todos los resultados almacenados en las pertinentes variables, se procede a tratar dichos resultados. Para cada tubería, se le asignará tres índices en función de estos resultados obtenidos tras la simulación para poder así establecer una categorización en función del índice y en el orden que se desee.

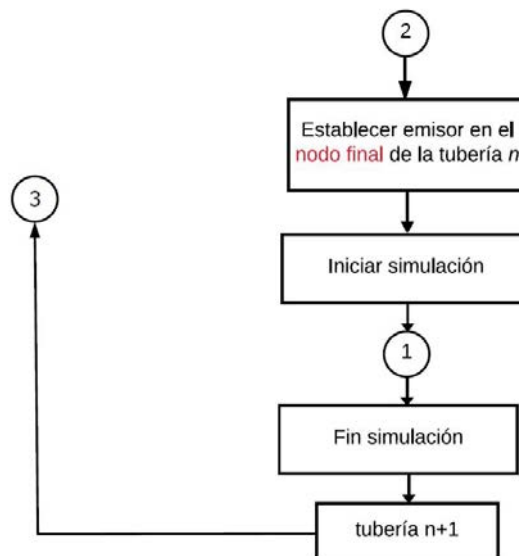


Figura 6 | Diagrama de flujo III.

## CATEGORIZACIÓN DE LAS TUBERÍAS

La elaboración de un catálogo o lista de todas las tuberías del sistema se basa principalmente en los resultados obtenidos en la simulación por la ejecución de una *fuga tipo* en cada una de dichas tuberías. De esta forma, se persigue evaluar en condiciones equiparables la gravedad de las consecuencias de fallos en cada una de las tuberías. Para ello se han definido cuatro índices o parámetros.

El **primer índice o parámetro** corresponde con el caudal máximo de fuga que se puede dar en dicha tubería frente a su *fuga tipo* correspondiente en un momento dado. Cabe recordar que dicho caudal de fuga será mayor cuanto mayor sea la presión en el momento dado y mayor sea el orificio o abertura producida en la tubería. Este parámetro caracteriza las peores pérdidas esperadas (fugas cortas) o, en su caso, los posibles efectos del agua en los alrededores de la tubería.

El **segundo índice o parámetro** para caracterizar una tubería en el catálogo corresponde con el caudal medio de fuga ( $Q_{mediofugas}$ ) a lo largo de la simulación. Éste índice puede resultar más relevante que el anterior en lo referente a pérdida de agua total durante un periodo extenso de tiempo.

El **tercer índice o parámetro** es el caudal sin suministrar en condiciones adecuadas ( $Q_{sinsummedio}$ ) corresponde con el sumatorio de los caudales de aquellos nodos donde la presión decae por debajo de 20 mca debido a la fuga al considerarse que el funcionamiento en los puntos de consumo se vería afectado por debajo de dicho valor (funcionamiento anómalo y/o descenso de consumo). Por lo tanto, este parámetro recoge la influencia negativa sobre el servicio.

El **cuarto índice o parámetro** recoge la influencia de los dos parámetros anteriores: caudal medio de fuga y el caudal medio sin suministrar en condiciones adecuadas.

Cada uno de los anteriores parámetros que componen este cuarto índice se pondera mediante un peso que equilibra la relevancia de cada uno de los parámetros frente a los otros. Como es el caso de los parámetros *caudal medio de fuga* ( $Q_{mediofugas}$ ) y *caudal sin suministrar medio* ( $Q_{sinsummedio}$ ) que se les ha asignado un coeficiente ponderador de 0.50 a ambos (Ecuación (4)).

Éste último índice está comprendido entre 0 y 1, donde aquellos valores cercanos a 1 indicarán un peor comportamiento de dicha tubería ante posibles fugas o por un posible vaciado del depósito. Valores muy inferiores o cercanos a 0 indicarán un buen comportamiento de la tubería en cuestión, ya que no generará un elevado caudal medio de fuga, ni afección importante al servicio.

$$Q_{indice} = a [ Q_{mediofugas} / \max(Q_{mediofugas}) ] + b [ Q_{sinsummedio} / \max(Q_{sinsummedio}) ] \quad (4)$$

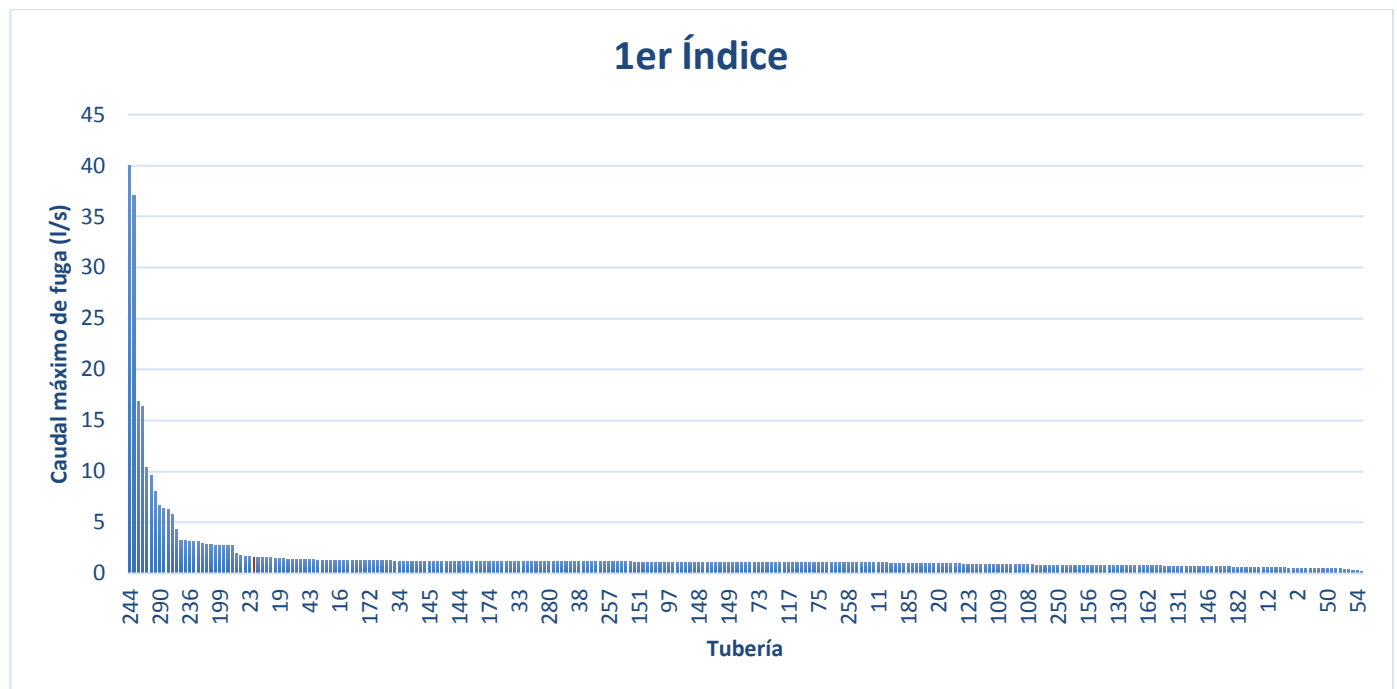
donde  $a$  es 0.5 y  $b$  es 0.5.

Por otro lado, cabe mencionar que la afección en la calidad de agua es evaluada mediante la presencia de presiones negativas en zonas de la red aguas arriba del orificio o en las cercanías del mismo, provocadas por el aumento de las pérdidas de carga debidas al caudal de fuga. Las presiones negativas en tubería enterradas pueden conducir a la aspiración de contaminantes perjudicando la calidad del agua (Fox et al. 2015).

## RESULTADOS

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos en la red de abastecimiento para cada índice. Comenzamos con el **primer índice** (caudal máximo de fuga (l/s)) (Figura 7). El valor medio de caudal máximo de fuga (color naranja en el gráfico) es de 1.58 l/s. Si ordenamos las tuberías de mayor a menor de dicho valor del caudal máximo de fuga, este valor deja por debajo al 89.4% de las tuberías que componen la red. Se puede observar además que alrededor de dicho valor medio, hacia la derecha, los valores de caudal máximo de fugas son bastantes regulares.

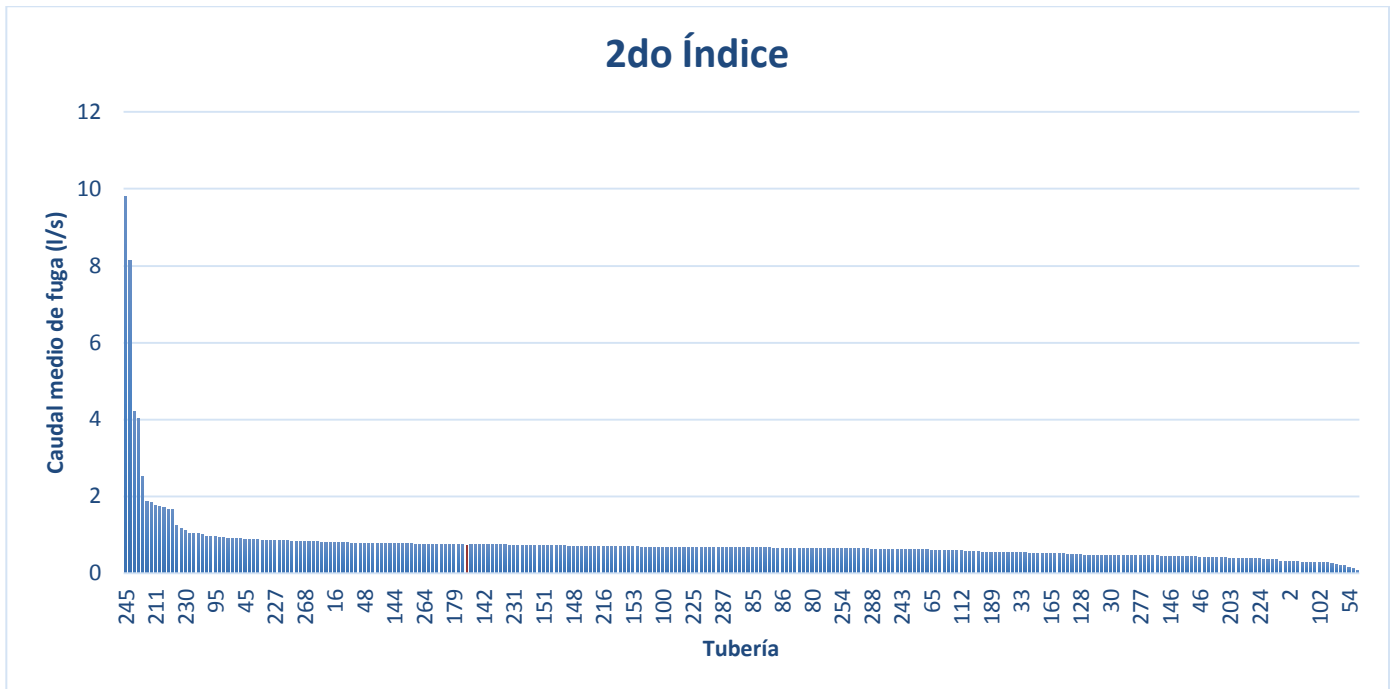
Las dos tuberías que han presentado mayor valor de *caudal máximo* superan en más de 30 veces la media del *caudal máximo*. Dichas tuberías se corresponden con las que proporcionan abastecimiento a los depósitos de la red; una fuga o problema en cualquiera de esas dos tuberías tendría gran repercusión en la red, ya que no se produciría un llenado de los depósitos suficiente como para hacer frente a las demandas establecidas lo cual es de esperar. Las dos siguientes en este índice se corresponderían con las tuberías de salida de los depósitos de la red.



**Figura 7** | Caudal máximo de fuga para cada tubería, el índice que identifica cada tubería se representa en el eje de las abscisas.

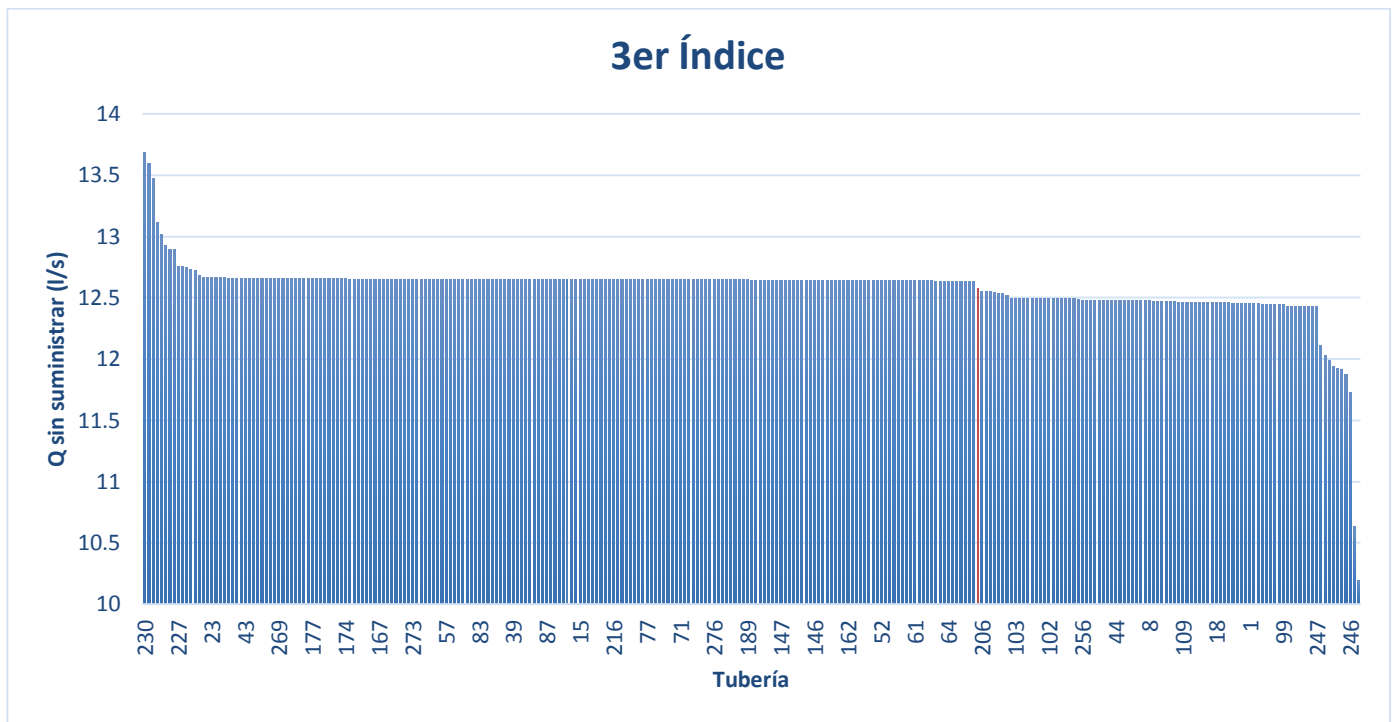
Se procede a analizar los resultados obtenidos por el **segundo índice** (caudal medio de fugas (l/s)) (Figura 8). El valor medio de caudal medio de fuga (color naranja en el gráfico) es de 0.74 l/s. Si ordenamos las tuberías de mayor a menor de dicho valor del caudal medio de fuga, este valor deja por debajo al 71.8% de las tuberías que componen la red. Se puede observar también como, a excepción de las primeras 10 primeras tuberías más o menos, los resultados obtenidos son muy regulares.





**Figura 8** | Representación de mayor a menor caudal medio de fugas obtenido en las tuberías de la red.

Se procede a analizar los resultados obtenidos por el **tercer índice** (caudal sin suministrar medio (l/s)) (Figura 9). El valor medio de caudal medio de fuga (color naranja en el gráfico) es de 12.58 l/s. Si ordenamos las tuberías de mayor a menor de dicho valor del caudal medio de fuga, este valor deja por debajo al 30.9% de las tuberías que componen la red. Se puede observar también como, a excepción de las primeras 10 primeras tuberías más o menos, los resultados obtenidos son muy regulares.



**Figura 9** | Representación de mayor a menor caudal sin suministrar medio obtenido en las tuberías de la red.

Por último, se analizan los resultados obtenidos por el **cuarto índice** ( $Q_4 \text{ índice}$ ) (Figura 10). Recordar que este último índice es adimensional y comprende teóricamente desde 0 hasta 1; siendo los valores cercanos a 1 los que reflejan un peor comportamiento en la red. El valor medio de este índice (color naranja en el gráfico) es de 0.498. Si ordenamos las tuberías de mayor a menor de dicho índice, este valor medio deja por debajo al 62.9% de las tuberías que componen la red. En este caso, unas 5 tuberías son las que sobresalen del resto, a partir de ahí, se obtienen unos resultados bastante estables entorno a la media.

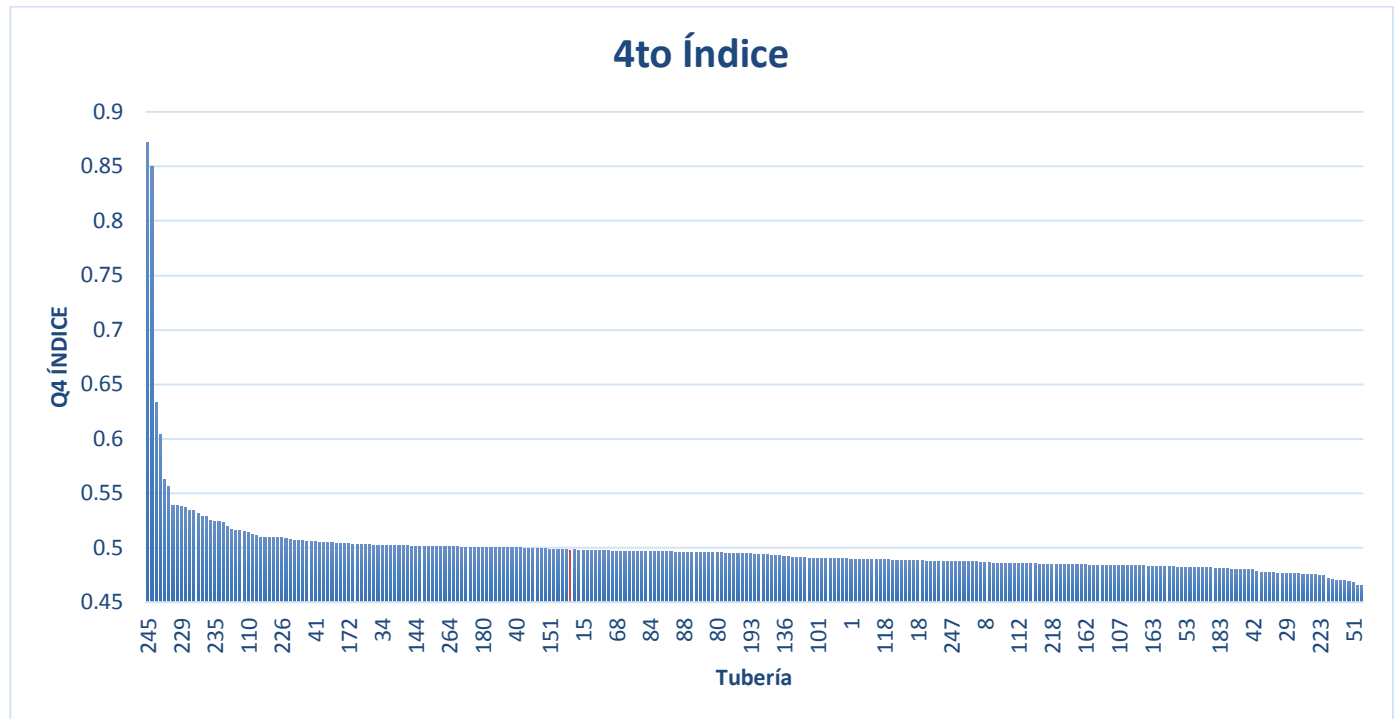


Figura 10 | Representación de mayor a menor  $Q_4 \text{ índice}$  obtenido en las tuberías de la red.

Las dos tuberías que han presentado mayor valor de  $Q_4 \text{ índice}$  corresponden de nuevo con las de llenado de los depósitos.

A modo de resumen, se muestran en la Tabla 1 un resumen de los índices obtenidos en las 10 tuberías que mayor valor han alojado.

Tabla 1 | Tabla de categorización de las diez primeras tuberías.

Índice Tubería	Caudal máximo de fuga (l/s)	Caudal medio de fuga (l/s)	Caudal sin suministrar medio (l/s)	Q4 Índice
245	37.03	9.79	10.2	0.87
244	39.97	8.12	11.92	0.85
246	6.20	4.01	11.73	0.63
290	6.68	4.22	10.64	0.60
249	4.27	2.52	11.88	0.56
230	9.63	1.10	13.69	0.56
200	2.69	1.66	12.43	0.54
199	2.69	1.65	12.43	0.54
229	7.96	0.88	13.48	0.54
232	3.07	1.86	12.12	0.54

El cuarto índice, se considera el más relevante de los cuatro, al ser el que más parámetros intrínsecos contiene, y, por tanto, un punto de vista más amplio a la hora de proporcionarnos ayuda para priorizar la gestión de las tuberías de la red.

En las siguientes imágenes (Figura 11 y Figura 12) se han indicado sobre ortofoto aquellas tuberías que han presentado la mayor categorización (a excepción de las tuberías de conexión directa con los depósitos).

En el caso del sector relativo al *Depósito Viejo* (Figura 11), aquellas tuberías que podrían presentar mayores inconvenientes están ubicados en el casco antiguo del municipio (tuberías 229 y 230). Estas tuberías alojan los mayores valores de *caudal medio sin suministrar* de toda la red dada su conexión con numerosos nodos de consumo. Por otro lado, la tubería 232 debe su alta categorización gracias al conjunto caudal medio de fugas y caudal sin suministrar, otorgándole un elevado *Q4índice*.



Figura 11 | Ubicación sobre ortofoto de las tuberías más relevantes en el sector *Depósito Viejo*.

En el sector del *Depósito MCT* (Figura 12), las tuberías 246 y 290 alojan elevados valores de caudal máximo de fuga debido sobre todo a la diferencia de energía respecto al depósito. Las tuberías 199 y 200 presentan su elevada categorización gracias al *caudal sin suministrar medio* ya que abastecen una serie de bloques residenciales con gran demanda.



Figura 12 | Ubicación sobre ortofoto de las tuberías más relevantes en el sector *Depósito MCT*.

---

## CONCLUSIONES

Se ha elaborado un catálogo sencillo para clasificar todas las tuberías del sistema de abastecimiento de Moratalla atendiendo a los efectos que una hipotética fisura tendría en la red. Esta clasificación se ha basado en distintos índices que permiten valorar el impacto de las mismas principalmente en cuanto a la calidad del suministro y a la pérdida de volúmenes de agua. Los resultados se han representado geográficamente como herramienta de apoyo a la priorización de las inversiones en mantenimiento, sensorización y renovación de conducciones. Además, en este trabajo se ha presentado mediante un ejemplo de uso las aplicaciones de la herramienta *Epanet-Octave* que permite el uso de la librería *Epanet Toolkit* desde un entorno amigable, y similar a *Matlab*, como es *GNU Octave*.

Como problemas abiertos, en la actualidad se está trabajando para definir distintos patrones de orificios dependiendo del material de la tubería, así como de introducir otro parámetro que incida sobre la calidad del agua (existencia de presiones bajas o incluso negativas, etc.).

---

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración por parte del Ayuntamiento de Moratalla, concretamente por parte del Ingeniero Juan Gabriel Lizán García y de la ex-Alcaldesa Candi Marín Lozano, así como por parte del Ingeniero de *Aqualia*, José Javier Juárez Villora.

---

## REFERENCIAS

Colombo, A. F., & Karney, B. W. 2002. Energy and costs of leaky pipes: toward comprehensive picture. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128(6), 441-450.

V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

- De Silva, D., Mashford J., & Burn S. 2011. Computer Aided Leak Location and Sizing in Pipe Networks. *Urban Water Security Research Alliance Technical Report No . 17*.
- Fox, S., Shepherd, W., Collins, R., & Boxall, J. (2015). Experimental quantification of contaminant ingress into a buried leaking pipe during transient events. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1), 04015036.
- Ghorbanian, V., Karney, B., & Guo, Y. (2017). Intrinsic relationship between energy consumption, pressure, and leakage in water distribution systems. *Urban Water Journal*, 14(5), 515-521.
- Lambert, A. 2000. What do we know about pressure: Leakage relationships in Distribution Systems? *Proc. IWA System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management*. May, Brno, Czech Republic, ISBN 80-7204-197-5.
- Neutrium, 2015. [https://neutrium.net/fluid\\_flow/calculation-of-flow-through-nozzles-and-orifices/](https://neutrium.net/fluid_flow/calculation-of-flow-through-nozzles-and-orifices/). Fecha de último acceso: 14 de julio de 2017.
- Rossman, L.A. 2000. *EPANET Programmer's Toolkit*. 1-74.
- Sahely, H. R., Kennedy, C. A., & Adams, B. J. 2005. Developing sustainability criteria for urban infrastructure systems. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(1), 72-85.
- Van Zyl, J. E., & Clayton, C. R. I. 2007. The effect of pressure on leakage in water distribution systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (Vol. 160, No. 2, pp. 109-114). Thomas Telford Ltd.
- Vigueras Rodríguez, A. 2016. *Analysis of water supply systems through Epanet Toolkit in GNU Octave*. Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia, España.