

Metodología para caracterizar la eficiencia de una red de distribución sectorizada

• Patricia Gómez-Martínez* •
Universidad Politécnica de Madrid, España

*Autor para correspondencia

• Francisco Cubillo-González •
Canal de Isabel II S.A., España

• Francisco Javier Martín-Carrasco •
Universidad Politécnica de Madrid, España

DOI: 10.24850/j-tyca-2017-04-04

Resumen

Gómez-Martínez, P., Cubillo-González, F., & Martín-Carrasco, F. J. (julio-agosto, 2017). Metodología para caracterizar la eficiencia de una red de distribución sectorizada. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(4), 57-77.

Mejorar la eficiencia en las redes de distribución de agua potable, garantizando un nivel de servicio predefinido, es uno de los objetivos principales para los operadores del abastecimiento. Con el fin de mejorar la gestión y el control de las redes existentes se ha ido extendiendo la sectorización, que divide la red en zonas monitorizadas y aisladas mediante válvulas frontera. Ante la diversidad de criterios para el diseño de los sectores, se plantea una metodología de valoración de redes sectorizadas, que permite seleccionar la configuración de sector más eficiente en términos de vulnerabilidad del servicio y costes (también entendido como costos) asociados. La vulnerabilidad se evalúa con una función multiobjetivo con base en tres de los principales objetivos vinculados con el servicio que se persiguen con la sectorización: continuidad del servicio, calidad del agua y cumplimiento de un régimen de presiones adecuado. Se definen una serie de indicadores de cuantificación de estos objetivos, que son normalizados y combinados con referencia a la red de estudio. Para valorar la eficiencia de cada solución, se analizan los indicadores junto con los costes de implantación e instrumentación, energéticos, de operación y mantenimiento para cada alternativa mediante un análisis de Pareto. El análisis de vulnerabilidad permite identificar los sectores donde priorizar las actuaciones en redes existentes; el análisis de eficiencia permite seleccionar la mejor opción entre las distintas alternativas y el diseño de nuevos ámbitos de una red sectorizada. La metodología se ha aplicado en 494 sectores de la red Canal de Isabel II, en Madrid, España.

Palabras clave: red de distribución sectorizada, indicadores, eficiencia, vulnerabilidad del servicio, DMA, nivel de servicio.

Abstract

Gómez-Martínez, P., Cubillo-González, F., & Martín-Carrasco, F. J. (July-August, 2017). Methodology for efficiency assessment in sectorized water distribution networks. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 8(4), 57-77.

Improving water distribution network efficiency, while ensuring a predefined level of service, is one of the main goals for water suppliers. In order to improve existing networks management and control, network sectorization is gaining importance. It is based on network division into isolated zones, delimited by boundary valves, which are hydraulically monitored. Given the diversity of criteria for sectors' design, a methodology for sectorized networks assessment is proposed for selecting the most efficient sector's configuration in terms of every alternative's service vulnerability and involved costs. Vulnerability is assessed through a multi-objective function based on three of the main service related goals to achieve with a sectorization project: service continuity, water quality and appropriate pressure range. This way, performance indicators for quantifying these goals are proposed, normalized and weighted to be combined according to the reference of studied network. In order to assess sectors efficiency every alternative costs, including sector's establishment and instrumentation cost, energetic, operational and maintenance costs, are considered for solutions' comparison. Such process is carried out through a Pareto analysis. Vulnerability analysis allows the identification of sectors for prioritizing investments in existing networks while the efficiency analysis allows the selection of the best options from different alternatives, also for new sectors' design. The methodology has been applied to 494 sectors of Canal de Isabel II distribution network in Madrid (Spain).

Keywords: Sectorized distribution network, performance indicators, efficiency, vulnerability, DMA, service level.

Recibido: 01/09/2016
Aceptado: 07/03/2017

Introducción

La gran complejidad de las redes de distribución de agua potable actuales, que presentan un diseño particular según la zona y los condicionantes específicos de cada emplazamiento, generan cada vez más dificultades para su gestión y mantenimiento eficiente. Estas redes se vieron comprometidas en origen por la propia ubicación de los asentamientos, y el crecimiento y desarrollo de los núcleos urbanos, y han ido evolucionando de acuerdo con los sucesivos criterios técnicos de diseño que se han adoptado con el tiempo.

Frente a esta problemática surge la sectorización como una estrategia de diseño, gestión y optimización de la red de distribución existente. Consiste en la división de la red de abastecimiento en zonas aisladas (sectores hidráulicos), delimitadas por válvulas frontera, ya sea mediante configuraciones fijas o en sectorizaciones dinámicas (Wright, Abraham, Parpas, & Stoianov, 2015), en las que se controla el caudal suministrado mediante un equipo de medida instalado en cada una de sus entradas, siendo deseable, a su vez, la medida de la presión suministrada en dichos puntos.

El diseño de redes de abastecimiento sectorizadas adquiere relevancia en Inglaterra (Wrc/WSA/WCA, 1994) y se ha ido extendiendo a diferentes países (Karadirek, Kara, Yilmaz, Muhammetoglu, & Muhammetoglu, 2012). La implantación de sectores en las redes de distribución, denominados en la bibliografía como "district meter areas" (DMA), surge con el principal objetivo de permitir una medición más exhaustiva de las condiciones de la red, de los flujos y consumos, para un mayor control de la misma. La sectorización es un buen sistema de operación y gestión, que facilita la monitorización de las pérdidas de agua (Di Nardo & Di Natale, 2011), la detección (Hunaidi & Brothers, 2007) y las actividades de control de la red de distribución (Di Nardo, Di Natale, Guida, & Musmarra, 2013).

Sin embargo, existe un debate abierto sobre la configuración óptima de los sectores. Las

sectorizaciones desarrolladas se han hecho, en gran medida, con base en la experiencia o necesidades según diversos criterios que se traducen en una cierta disparidad y falta de uniformidad en las experiencias documentadas. Existen ciertas recomendaciones (Morrison, Tooms, & Rogers, 2007) que proponen un determinado tamaño de sector en función del número de conexiones o propiedades, pero por lo general resulta complicado encontrar en la bibliografía una metodología que permita un diseño sistemático de los sectores más adecuados para cada caso específico de red existente con un enfoque holístico. En la definición de los sectores hidráulicos intervienen múltiples variables (Alegre *et al.*, 2006), y según el motivo por el que se sectorice, o criterio que se adopte para sectorizar, la delimitación de los mismos puede ser muy diferente. Un número elevado de las experiencias reportadas busca diseños que posibiliten una mejor gestión de las presiones en la red (Awad, Kapelan, Savic, & Emerson, 2010; Gomes, Marques, & Sousa, 2011), mientras que otros persiguen un mayor control de las pérdidas de agua (Fontana, Giugni, & Portolano, 2012). Algunos planteamientos, como el de Messac y Mattson (2004) o Galdiero, De Paola, Fontana, Giugni y Savic (2016), emplean metodologías multiobjetivo. También hay metodologías basadas en la teoría de grafos, como las que proponen Tzatchkov, Alcocer-Yamanaka y Bourguett-Ortiz (2008), o Di Nardo, Di Natale, Santonastaso, Tzatchkov y Alcocer-Yamanaka (2014). Según el criterio adoptado resultan sectores de características muy diversas en cuanto a tamaño de la superficie abarcada, longitud de red, número de propiedades, número de válvulas de corte necesarias para generar fronteras y necesidades de inversión, entre otras.

Por tanto, el diseño de la red sectorizada variará en función de cuál sea el objetivo principal por el que se compartimenta la red. Para una misma red existen múltiples configuraciones de sectores y su eficiencia dependerá tanto de las características de la red de partida como del propio diseño de los sectores que la constituyen.

Las posibilidades en el diseño de sectores son tan amplias que resulta necesario comprobar el adecuado comportamiento de los mismos desarrollando una herramienta que ayude a los gestores del abastecimiento en la toma de decisiones. Considerando que las condiciones de la red inicial se mantienen y, por tanto, no se invertirá en renovación de red o extensión de la misma, las posibilidades para garantizar la eficiencia de la red sectorizada se centran en el diseño de los sectores. Por ello surge la necesidad de llevar a cabo una revisión de las redes sectorizadas existentes, con el fin de reordenarlas y gestionarlas a partir de su eficiencia. En este sentido, algunas publicaciones (Di Nardo, Di Natale, Santonastaso, Tzatchkov, & Alcocer-Yamanaka, 2015) proponen índices para evaluar el comportamiento de una red sectorizada.

El presente trabajo desarrolla una metodología de análisis de los sectores de una red de distribución sectorizada desde una serie de indicadores que permiten identificar posibles deficiencias o mejoras a implementar, para asegurar la adecuada prestación del servicio de abastecimiento (Cabrera-Béjar & Gueorguiev-Tzatchkov, 2012) de manera sostenible y eficiente. Se apoya en las variables que intervienen en la problemática de la definición de los sectores, teniendo en cuenta aquellos factores que condicionan el aseguramiento del servicio prestado, la eficiencia de la red, y tienen repercusión en el diseño y gestión de los sectores de una red sectorizada; todo ello, con el fin último de ayudar a la toma de decisiones de los operadores del servicio sobre planificación, gestión y control de la red de abastecimiento.

Metodología

Para determinar la eficiencia de un sector se plantea un sistema de múltiple calificación basado en el riesgo de incumplir el nivel de servicio preestablecido por el gestor del abastecimiento. En este sentido, se analiza el comportamiento de cada sector con base en los tres principales aspectos que aseguran la calidad y eficiencia en la prestación del servicio que percibe el usuario

final: continuidad del servicio, calidad del agua suministrada y régimen adecuado de presiones.

El procedimiento planteado comprende las siguientes cuatro etapas: (a) cálculo de los indicadores adecuados; (b) normalización de cada indicador; (c) definición de los factores de combinación para los indicadores de cada objetivo, y (d) comparativa entre soluciones introduciendo los costes (también denominado costos) asociados con cada opción.

El resultado de las tres primeras etapas es una función paramétrica que evalúa cada uno de los objetivos, primero de manera individual y luego combinada, cuantificando la vulnerabilidad de la red, con el fin de ayudar a la toma de decisiones por parte de los operadores del servicio. La aplicación de esta función es un test de vulnerabilidad que permite priorizar aquellos sectores con una mayor debilidad a la hora de asignar inversiones adicionales en redes existentes.

A continuación se detallan cada una de las cuatro etapas anteriores:

Cálculo de los indicadores para cada objetivo

Para poder valorar cuantitativamente el comportamiento de un sector y cuantificar su eficiencia resulta necesario disponer de una serie de indicadores que reflejen el grado de vulnerabilidad frente al incumplimiento del nivel de servicio preestablecido. Se plantean diversos indicadores basados en la literatura que permitan conocer el comportamiento del sector frente a cada uno de los objetivos. Después se verifica la significancia de los indicadores de calidad en relación con el objetivo que se pretende medir.

De esta forma, se plantean los siguientes indicadores basados en modelos hidráulicos de la red para cada uno de los objetivos, que se resumen en el cuadro 1.

Continuidad del servicio

Se analiza mediante dos indicadores que consideran, por un lado, los riesgos internos asociados con las características del propio

Cuadro 1. Indicadores empleados (indicadores, fórmula y normalización).

Indicador	Objetivo	Fórmula	Normalización (*)
I1	Riesgo interno	$I1 = \frac{\sum_{i=1}^n (Pa_i \cdot Ia_i)}{n}$	= 1 (p5) = 0 (p95)
I2	Riesgo externo		$I2 = \frac{\sum_{i=1}^s (Pb_i \cdot Ib_i)}{s}$
I3	% de testers	$I3 = \frac{\sum_{j=1}^m t_j}{\sum_{i=1}^n l_i}$	= 1 (0%) = 0 (100%)
I4	Tiempo de estancia		$I4 = \frac{\sum_{i=1}^m rt_j}{m}$
I5	% horas propiedad con presión inferior al umbral mínimo	$I5 = \frac{\sum_{i=1}^m h_{\min,i}}{m \cdot h_T}$	= 1 (0%) = 0 (100%)
I6	% horas propiedad con presión superior al umbral máximo		$I6 = \frac{\sum_{i=1}^m h_{\max,i}}{m \cdot h_T}$

(*) Nota: se marcan los valores extremos (0 y 1); el valor normalizado se obtiene de manera proporcional a los valores extremos señalados.

sector y, por el otro, los que existen hasta el punto de entrada y están vinculados con las condiciones de contorno del ámbito. Con este doble procedimiento de evaluación se obtiene un indicador que refleja la vulnerabilidad total de un sector frente a la garantía de la continuidad del servicio.

(I-1) Riesgo de discontinuidad interno del sector

Se valora a partir de la probabilidad de fallo que presentan las tuberías de distribución del sector y el impacto que se deriva de su rotura. La probabilidad de fallo se calcula a partir del análisis estadístico del histórico de roturas registradas en la red de estudio. Para ello se analizan las posibles variables explicativas y se elabora la función de probabilidad de fallo de las tuberías de la red (Gómez-Martínez, Cubillo, Martín-Carrasco, & Garrote, 2017).

Para considerar el impacto de la posible rotura (Ia_i) se determina el alcance de las consecuencias mediante la duración y el área de la afección, es decir, el tiempo durante el cual un conjunto de propiedades verán su servicio afectado por la reparación de la eventual rotura. El ámbito de afección depende del nivel

de mallado interno del sector y del número de válvulas de corte que definen el área en el que se interrumpe el servicio para aislar cada uno de los tramos en los que se puede producir una rotura eventual (figura 1).

El indicador se obtiene como el promedio del riesgo de discontinuidad de cada una de las tuberías de distribución del sector analizado:

$$I1 = \frac{\sum_{i=1}^n (Pa_i \cdot Ia_i)}{n} \quad (1)$$

Siendo $I1$ el indicador de riesgo de discontinuidad interno; Pa_i , la probabilidad de fallo de cada tubería de distribución i ; Ia_i , el impacto asociado con la rotura de la tubería de distribución, y n el número de tuberías del sector. En este sentido, el impacto Ia_i se evalúa como el resultado del tiempo de reparación multiplicado por el número de propiedades pertenecientes al sector que se ven afectadas por la avería, medido en propiedades-hora.

(I-2) Riesgo de discontinuidad externo al sector

Para evaluar la influencia de la configuración de la red externa al sector sobre la continuidad

del servicio prestado se emplea este segundo parámetro de riesgo. De nuevo se aplica el concepto de probabilidad por impacto. Como en el indicador anterior, la probabilidad de fallo de las tuberías estratégicas en este caso se obtiene analizando las variables explicativas mediante el análisis estadístico de las roturas registradas en este tipo de tuberías de la red. A partir de tales variables se desarrolla un modelo conjunto de probabilidad de fallo.

A partir de una modelización hidráulica se analizan sobre la topología de la red todos los caminos que conectan las fuentes con la cabecera de cada sector. Siguiendo el concepto de riesgo aplicado en el indicador anterior, se mide el resultado del producto de la probabilidad de fallo asociada con cada tubería estratégica por el impacto sobre la totalidad del sector; es decir, tiempo en que todas las propiedades del sector verán interrumpido el suministro. De esta forma se tienen en cuenta los riesgos vinculados con la infraestructura de transporte o red estratégica

que abastece al sector a través de la probabilidad de fallo de los tubos, y se evalúa la capacidad de regulación de las fuentes que lo abastecen y el número de entradas fijas o alternativas para un sector mediante el factor de impacto.

El impacto (Ib_i) se mide en este caso como el resultado del tiempo de afección multiplicado por el número total de propiedades del sector (figura 2). El tiempo de afección se calcula partiendo de tres variables temporales: tiempo de maniobra para el suministro alternativo que se identifique, tiempo de regulación de los depósitos disponibles para abastecer al sector y tiempo de corte para la reparación de la rotura; todas ellas combinadas mediante una función lógica que responde al procedimiento de operación ante una rotura. Así, se define el tiempo de afección como el tiempo empleado en la reparación (corte) o en una maniobra alternativa que permita abastecer al sector (si el tiempo de respuesta es menor), descontando el tiempo de regulación del sector, para tener en

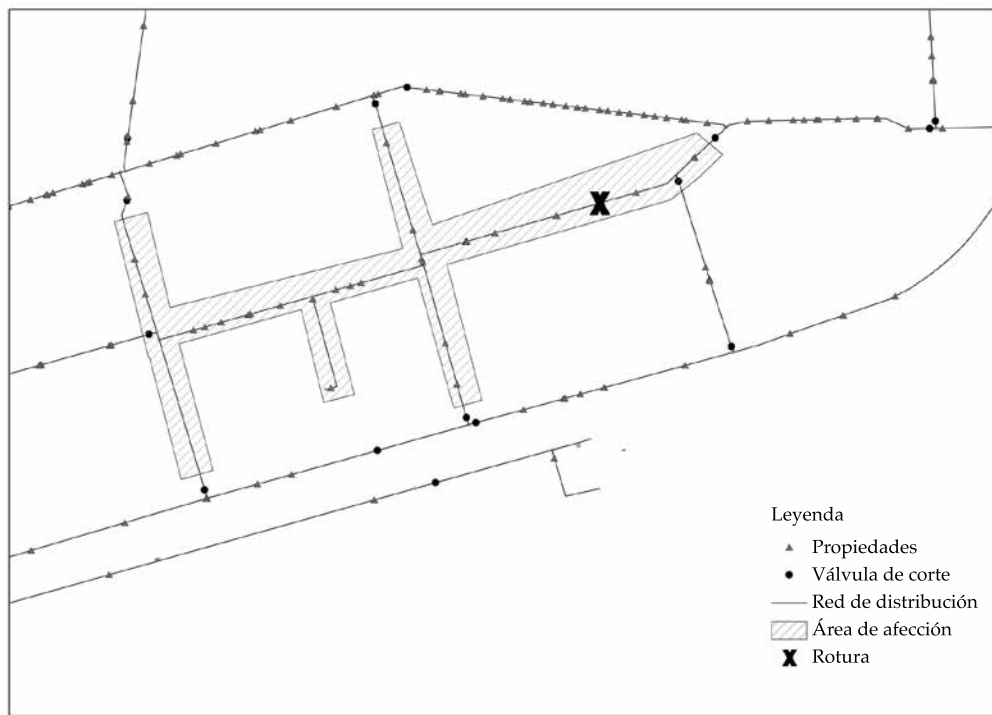


Figura 1. Riesgo de discontinuidad interno. Ámbito de afección.

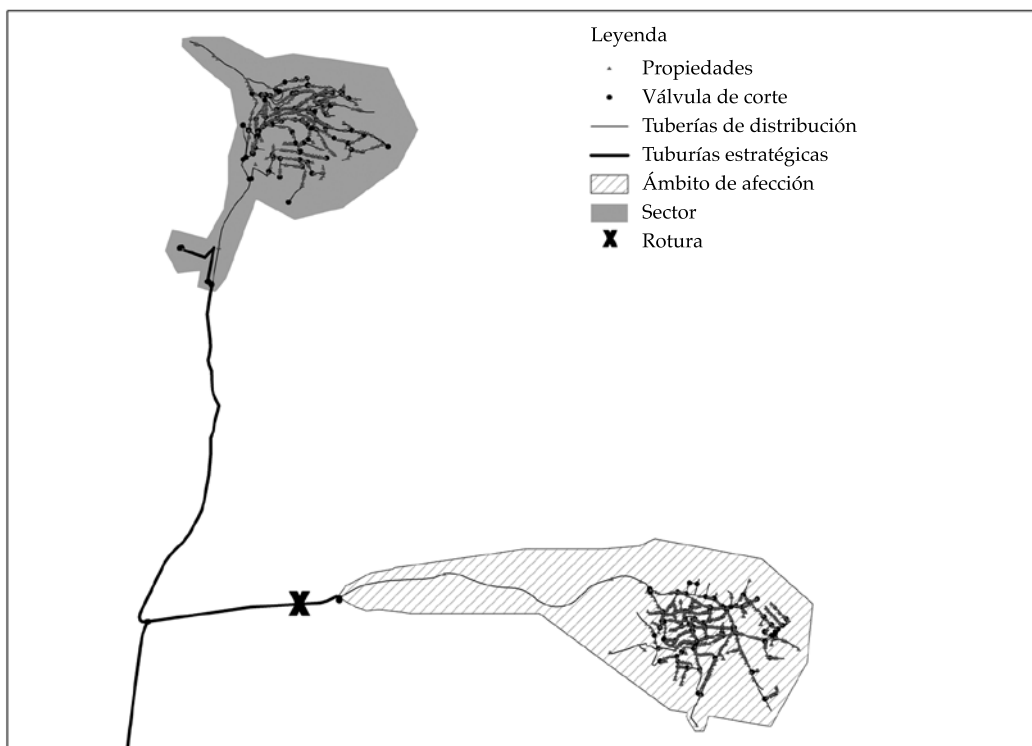


Figura 2. Riesgo de discontinuidad externa. Ámbito de afección.

cuenta el resguardo que proporciona el depósito en aquellos tramos que están aguas arriba del mismo. Cuando no hay maniobra alternativa disponible, se considera sólo el tiempo de corte. De igual manera, siempre que el tiempo de regulación supere al menor de los tiempos de corte o maniobra se considera que no hay impacto. Ante la reducida probabilidad de que fallen dos caminos alternativos de la red estratégica hasta el sector, se estima impacto nulo en aquellos sectores que disponen de dos entradas.

De nuevo, el indicador se calcula como el promedio del riesgo de discontinuidad de cada una de las tuberías de la red estratégica que abastece al sector:

$$I2 = \frac{\sum_{i=1}^s (Pb_i \cdot Ib_i)}{s} \quad (2)$$

Siendo $I2$ el indicador de riesgo de discontinuidad interno, Pb_i la probabilidad de

fallo de cada tubería estratégica Ib_i , el impacto asociado con la rotura de la tubería, medido en propiedades-hora, y s el número de tuberías de la red estratégica hasta el sector.

Calidad

Para evaluar la calidad del agua suministrada se plantean los siguientes indicadores:

(I-3) Porcentaje de testers

Al compartimentar las redes se instalan válvulas cerradas para crear fronteras que generan tramos de red con una única salida, es decir, tuberías que son fondos de saco. Estas tuberías, que presentan un menor flujo circulante, denominados "testeros" en este trabajo, por la analogía con los extremos de red que abastecen un único punto mediante un tramo sin retorno, generan zonas críticas en las que se reduce de

forma considerable la calidad del agua. Por tal motivo, se plantea un indicador del porcentaje de red que se considera formada por testeros (ya sean fondos de saco o tramos de red seleccionados por su baja velocidad) respecto de la longitud total de la red del sector. La formulación del indicador de testeros es la siguiente:

$$I3 = \frac{\sum_{j=1}^m t_j}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (3)$$

Siendo $I3$ el indicador de testeros; t_j la longitud de cada uno de los testeros; l_i la longitud de cada una de las tuberías del sector; m , el número de testeros dentro del sector, y n el número de tuberías. El número de testeros se obtiene mediante modelos hidráulicos desarrollados con el *software* de modelización y análisis de sistemas de distribución de agua *SynerGee Water*. Aquellos tramos con velocidades inferiores a 0.001 m/s son considerados testeros.

(I-4) Tiempo medio de estancia en el sector

El tiempo de estancia es uno de los principales parámetros que influyen sobre la calidad del agua suministrada en una red. En este trabajo se entiende como tiempo de estancia el tiempo transcurrido desde el punto de entrada del agua en la cabecera del sector y el punto de consumo. Conforme aumenta la permanencia del agua en la red, las condiciones de calidad empeoran. Se calcula el valor medio para cada sector con base en su modelo hidráulico para un escenario de caudal medio. Bajo este planteamiento, la formulación del indicador es:

$$I4 = \frac{\sum_{j=1}^m rt_j}{s} \quad (4)$$

Siendo $I4$ el indicador del tiempo de estancia del sector; rt_j el tiempo de estancia por propiedad individual hasta cada punto de consumo; s , el número total de propiedades, y m el número de puntos de consumo.

Gestión de presiones

La eficiencia en el cumplimiento de un régimen de presiones adecuado se mide con base en la distribución de presiones que se tiene dentro del sector en las condiciones de servicio. La sectorización permite una gestión de presiones que facilita el cumplimiento de los umbrales establecidos por el operador. Las condiciones de presión baja en los puntos de consumo genera quejas y reclamaciones por parte de los usuarios, mientras que el exceso de presión se vincula con el aumento de las fugas y roturas (Martínez-Codina, Saavedra, Cueto-Felfueroso, & Garrote 2016), y una disminución de la eficiencia energética (UKWIR, 1997). Para ello se analizan modelos hidráulicos de los sectores en tres escenarios de servicio en función del caudal (mínimo, medio y máximo). En cada uno de los escenarios se determina el porcentaje de puntos de consumo en los que se tiene una presión mínima por debajo del umbral de presión, adoptado como criterio de compromiso por el gestor del abastecimiento. Así, pues, los indicadores calculados para el escenario más desfavorable son los siguientes:

(I-5) Porcentaje de horas por propiedad en las que se tiene una presión inferior al umbral mínimo:

$$I5 = \frac{\sum_{i=1}^m h_{\min,i}}{m \cdot h_T} \quad (5)$$

Siendo $h_{\min,i}$ el número de horas en las que la propiedad i tiene una presión inferior al umbral mínimo; m , el número total de propiedades, y h_T el número total de horas de la simulación.

(I-6) De manera análoga, el porcentaje de horas por propiedad en las que se tiene una presión superior al umbral máximo es:

$$I6 = \frac{\sum_{i=1}^m h_{\max,i}}{m \cdot h_T} \quad (6)$$

Siendo $h_{máx,i}$ el número de horas en las que la propiedad i tiene una presión superior al umbral máximo; m , el número total de propiedades, y h_T el número total de horas de la simulación.

Normalización del indicador

Para poder categorizar el comportamiento de un sector es necesario disponer de unos valores de referencia de cada indicador. Puesto que los parámetros que caracterizan las redes de distribución dependen de múltiples variables, no es posible establecer una referencia absoluta. Por ello, a partir del análisis de los diferentes sectores de la red de estudio se genera un espectro de valores de cada indicador que sirve como punto de referencia para evaluar el comportamiento individual de las diferentes opciones de sectorización. De esta forma, es la propia red existente la que sirve como patrón para comparar los sectores.

Esta referencia permite establecer un nivel característico sobre el cual poder asignar una puntuación a los futuros sectores donde se aplique la metodología descrita. Así, se realiza una normalización de los valores obtenidos, creando un patrón de referencia con el que se compararán los sectores.

Para seleccionar el método de normalización se tiene en cuenta que para garantizar las condiciones de servicio preestablecidas se deben cubrir de modo satisfactorio los tres parámetros (continuidad, calidad y presión) simultáneamente. De igual forma, se tiene en cuenta que los indicadores planteados evalúan la vulnerabilidad del incumplimiento del servicio, por lo que el valor medio registrado es una referencia, pero no significa un umbral mínimo a satisfacer. El objetivo es la minimización de la vulnerabilidad. Por este motivo se descartan aquellos métodos de normalización basados en distribuciones normales que asignan valor 0 a los valores próximos a la media, así como para evitar sobreponderar aquellas soluciones en las que un único indicador tiene un comportamiento muy bueno frente al resto. El criterio de normalización de cada indicador se resume en el cuadro 1.

Para el indicador de testeros y los indicadores de presión (por ser porcentajes) se asigna valor 1 cuando el sector no presenta testeros o cuando no existen puntos de consumo en los que se exceden los umbrales de presión de referencia. En cuanto a los indicadores de continuidad (basados en la teoría de riesgos) y el tiempo de estancia, se plantea una normalización proporcional a los niveles de referencia de 5 y 95% observados en los datos registrados. Asignando de esta forma el valor máximo (unidad) al valor que marca el percentil 5 y el valor mínimo 0 al percentil 95.

Combinación de los indicadores

Para poder establecer una puntuación única del sector en cuanto al cumplimiento de cada uno de los tres objetivos seleccionados se deben combinar los indicadores. Se plantea una función multicriterio para cada uno de los objetivos obtenida como suma ponderada de los diferentes indicadores:

$$\text{Vulnerabilidad total} = \begin{cases} C = c_1 \cdot I1 + c_2 \cdot I2 \\ Q = q_1 \cdot I3 + q_2 \cdot I4 \\ P = p_1 \cdot I5 + p_2 \cdot I6 \end{cases} \quad (7)$$

Donde C es la coordenada que cuantifica la continuidad del sector; c_1 y c_2 los pesos de la función de continuidad para cada uno de los indicadores ($I1$, $I2$); Q y P , de forma análoga, son las coordenadas de calidad y presión con sus respectivos pesos (q_1 , q_2 , p_1 y p_2) para los indicadores ($I3$, $I4$, $I5$ e $I6$).

El resultado es por tanto un vector de tres coordenadas para cada sector analizado. Mediante cada una de esas tres coordenadas se puede plantear una comparativa directa entre sectores.

(c.1) Combinación de los indicadores de continuidad

Para combinar los indicadores de continuidad ($I1$, $I2$) se hace un reparto equitativo (50/50), pues a través de la componente de impacto se

ponderan las consecuencias asociadas con la interrupción del servicio en cada caso.

(c.2) *Combinación de los indicadores de calidad*

Con el objetivo de validar su incidencia y poder cuantificar el grado de significancia se efectúan análisis estadísticos, relacionando la distribución de incidencias de calidad en la red con los valores de cada indicador obtenidos en la aplicación del mismo al conjunto de la red.

Por tratarse de datos procedentes de observaciones o modelos hidráulicos de diversos sectores, se plantea un tratamiento estadístico no paramétrico. No obstante, se debe verificar que los datos no sigan una distribución normal a partir de un análisis mediante gráficos QQ. En ellos se compara la dispersión de los datos respecto de la línea recta teórica (correspondiente a la distribución normal). Por la propia naturaleza de los datos (observaciones), no es de esperar que se cumpla una distribución normal; en tal caso, se pueden aplicar otros métodos, como el análisis de la varianza (ANOVA).

Una vez confirmada la idoneidad del tratamiento no paramétrico, se plantea un análisis estadístico Kolmogorov-Smirnov (K-S) (Smirnov, 1939) basado en los registros reales de incidencias o avisos de calidad de la red de estudio. Este estudio busca la evidencia empírica de la relación entre el indicador y las incidencias mediante un análisis de dependencia. Para determinar la capacidad de reflejar el objetivo determinado, el test K-S plantea una comparativa entre la distribución acumulada del indicador en aquellos sectores con incidencias de calidad y la función de distribución genérica de todos los sectores.

La hipótesis a contrastar por tanto es la siguiente: H_0 : los datos analizados siguen la distribución teórica; H_1 : los datos analizados no siguen la distribución teórica.

Así, la función de distribución genérica se obtiene con todos los sectores analizados, mientras que la condicionada a las incidencias de calidad se obtiene sólo con aquellos sectores en los que no se han registrado incidencias. Con

este planteamiento, el estadístico de contraste responde a la siguiente formulación:

$$D = \max_{1 \leq i \leq n} |F_c(x_i) - F_g(x_i)| \quad (8)$$

Siendo $F_g(x)$ la función de distribución acumulada teórica o genérica; $F_c(x)$, la distribución acumulada analizada o condicionada; x_i los valores de la distribución que se han obtenido, y D_α es el nivel de significancia del estadístico de contraste.

Cuando se cumpla que $D \leq D_\alpha$, se acepta la hipótesis H_0 , lo que indica que los datos obtenidos siguen la misma distribución. En estos casos, el indicador explicativo analizado no afecta a la probabilidad de ocurrencia de incidencias.

Por el contrario, cuando se cumpla que $D \geq D_\alpha$, se acepta la hipótesis H_1 , esto es, que los datos obtenidos no siguen la misma distribución. Por tanto, en estos casos el indicador analizado influirá en la probabilidad de incidencia.

Para calcular el estadístico de contraste se toma un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y número de grados de libertad el tamaño de la muestra, número de sectores. Basándose en los valores dados por Massey (1951) e integrados por Birnbaum (1952) se obtiene el valor crítico del contraste, según la fórmula siguiente:

$$D_{\alpha=0.05} = \frac{1.36}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

Con base en el planteamiento K-S, tomando un determinado nivel de significancia, se llega al umbral crítico en función del tamaño de la muestra. Cuanto mayor sea la diferencia entre las distribuciones mayor será la dependencia y mejor reflejará el objetivo deseado.

Este análisis se realiza únicamente para los indicadores de calidad del servicio (I3, I4). Se han excluido del análisis los indicadores relativos a la continuidad, pues el planteamiento realizado para su elaboración es el de adaptar una función de probabilidad a las diferentes variables con base en los datos registrados. Por tanto, el indicador es una muestra conjunta de la probabilidad de fallo de los diferentes elementos del sector que por su propia construcción

no requiere una posterior validación, ya que se elabora a partir de los datos disponibles. Lo mismo ocurre con los indicadores de la gestión de presiones (I_5 , I_6), pues la relación con el objetivo a medir es directa y su valor puede ser previsto mediante modelos hidráulicos.

(c.3) Combinación de los indicadores de presión

Se plantea un reparto de pesos no uniforme entre el exceso de presión (puntos con presión por encima del límite superior deseado) y la falta de presión (puntos con presiones por debajo de la presión umbral de diseño). Puesto que una sobrepresión supone una ineficiencia y la falta de presión constituye un inadecuado servicio que percibe el usuario final, y por tanto un mayor riesgo de incumplir el nivel de servicio, la ponderación adoptada es 30/70. Es decir, los pesos relativos son $p_1 = 0.30$ y $p_2 = 0.70$ para sobrepresión y presión mínima, respectivamente.

Con este planteamiento se obtiene una puntuación global frente al cumplimiento de cada objetivo por parte del sector analizado. El resultado de aplicar esta metodología es un análisis holístico del comportamiento del sector, que refleja su nivel de vulnerabilidad ante el incumplimiento del servicio, medido en términos de continuidad, calidad y presión. Aporta una información muy útil para la toma de decisiones de planificación de inversiones, operación y mantenimiento de una red sectorizada.

Para la siguiente fase de análisis de eficiencia resulta necesario ponderar cada objetivo de forma que se puedan combinar en un único indicador (ecuación (10)):

$$V = \alpha \cdot q + \beta \cdot c + \gamma \cdot p \quad (10)$$

Siendo V la vulnerabilidad global del sector; α , β y γ , los pesos para cada uno de los objetivos: calidad (q), continuidad del servicio prestado (c) y gestión de presiones (p).

Este proceso de valoración entre los objetivos de continuidad, calidad y gestión de presiones se puede establecer con base en las políticas regulatorias y prioridades del operador de la

red. De esta forma, según los requerimientos de los usuarios o de las propias necesidades de las gestoras, se pueden planificar las actuaciones, priorizando alguno de los objetivos frente al resto. Por todo ello, la ponderación relativa entre objetivos no se especifica en este trabajo. En el caso de estudio desarrollado se han adoptado unos factores de combinación equitativos para evitar asumir decisiones estratégicas que distorsionen los resultados.

Análisis de eficiencia-Pareto

Por otra parte, entendiendo la eficiencia como la minimización de la vulnerabilidad de incumplir el nivel de servicio (mejor calidad del agua, maximizando la continuidad y optimizando la gestión de presiones), unida a la minimización del coste de implantación y operación asociado, resulta preciso completar el análisis ya descrito con un estudio de costes específico para las opciones de cada sector. El análisis de eficiencia se plantea en dos pasos. Primero se combinan los tres objetivos, a fin de tener un único indicador de vulnerabilidad global del sector. En el segundo paso se evaluará la eficiencia de las alternativas, valorando coste y nivel de vulnerabilidad de manera conjunta.

A la hora de cuantificar los costes correspondientes a la opción analizada se consideran los costes de inversión, energéticos, así como de operación y mantenimiento. Dentro de los primeros se incluyen los que se derivan de las inversiones necesarias para delimitar, controlar e instrumentar los sectores como válvulas frontera, desagües de purga, caudalímetros dimensionados para el rango de caudales demandados por el sector, o elementos de gestión de presión, ya sean de carácter estático o dinámico, cuya selección dependerá de los fondos disponibles y criterios propios del operador. En cuanto a los costes energéticos, se consideran los asociados con los bombeos necesarios para proporcionar la presión necesaria. En los costes de operación y mantenimiento se incluyen tareas de inspección, purga y, en general, todas aquellas tareas necesarias para el funcionamiento de la red de cada ámbito.

A través de la metodología planteada, en redes sectorizadas existentes se identificarán los sectores críticos mediante el análisis de vulnerabilidad, y posteriormente se evaluarán las diferentes alternativas de diseño a través del análisis de eficiencia, tomando como referencia la vulnerabilidad del sector implantado y considerando los costes asociados a cada solución. Aparentemente, conforme aumenta la inversión mejora el comportamiento de la red (Kandulu, 2013). Sin embargo, en términos de vulnerabilidad del servicio, es necesario analizar si el aumento de la inversión produce una mejora significativa o si se dispone de los fondos suficientes para realizar la mejora deseada. En el caso de diseño de nuevos sectores, se podrá hacer directamente a partir del análisis de eficiencia, evaluando el nivel de vulnerabilidad y los costos de cada alternativa. Por ello, en ambos casos es preciso analizar la eficiencia del sector y no sólo la vulnerabilidad.

Este proceso se puede realizar de dos formas: desde un punto de vista teórico se podría asignar un coeficiente que asigne un valor económico a la vulnerabilidad, buscando el óptimo de la curva en la que tanto coste como vulnerabilidad se midieran en la misma unidad (económica). Sin embargo, la complejidad para determinar el coeficiente que transformaría la vulnerabilidad en un coste introduce imprecisiones a la metodología, por lo que se ha descartado esta opción.

La segunda alternativa es plantear un análisis de Pareto que busque la optimización del vector (coste, vulnerabilidad), minimizando de forma simultánea inversión y vulnerabilidad sin introducir coeficientes adicionales. Procedimientos adicionales para optimizar una función multiobjetivo basados en el análisis de Pareto han sido estudiados por Pecci, Abraham y Stoianov (2017). Puesto que un vector no puede optimizarse buscando un máximo o un mínimo, el conjunto de soluciones no inferiores generadas mediante el análisis de Pareto proporciona una información muy útil.

Representando gráficamente las alternativas por su nivel de vulnerabilidad total (suma ponderada del comportamiento frente a cada uno

de los objetivos) frente al nivel de inversión de cada opción se genera una nube de puntos. La optimización de ese vector se consigue analizando las soluciones frontera (no inferiores), es decir, aquellas para las que con un determinado nivel de inversión se consigue una menor vulnerabilidad. Sobre esa curva de soluciones no inferiores se elegirá la opción óptima, ya sea fijando el límite de inversión o bien precisando la vulnerabilidad mínima deseada. Con este método se refuerza la toma de decisiones del operador del servicio, que puede seleccionar la opción más adecuada con base en el nivel de vulnerabilidad o de los fondos disponibles. Además, permite valorar en qué medida la reducción de la vulnerabilidad justifica un aumento de la inversión.

En la figura 3 se representa el procedimiento descrito, que permite evaluar las diferentes configuraciones disponibles para un mismo sector. Un aumento de la inversión puede reducir la vulnerabilidad; sin embargo, hay un cierto nivel de vulnerabilidad que no es posible reducir aun cuando se aumenta de forma notable la inversión. Esto se debe a los riesgos intrínsecos a la red, no evitables, que son independientes del nivel de inversión.

Caso de estudio

La metodología planteada se ha aplicado a la red de distribución de Canal de Isabel II en la Comunidad de Madrid, España. De los datos registrados en más de 800 sectores de la red, 494 fueron seleccionados por su representatividad para este estudio y por la disponibilidad de información fiable. Estos datos posibilitan la construcción de las funciones de probabilidad de fallo y la estimación de los tiempos de afección de los indicadores de continuidad ($I1$, $I2$), a partir del número de roturas registradas. Asimismo, los indicadores de calidad ($I3$, $I4$), junto con los avisos e incidencias de calidad registrados en las bases de datos de la compañía, se emplearon para la normalización del indicador. Por último, a partir de modelos hidráulicos de la red, y con el establecimiento de umbrales objetivo por el

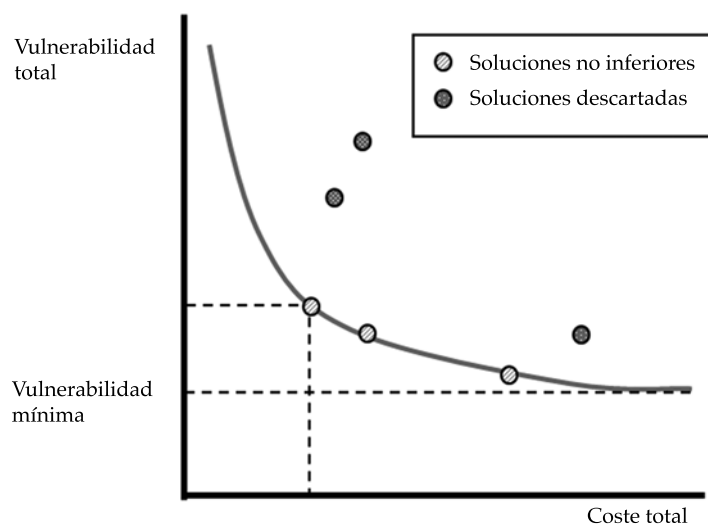


Figura 3. Planteamiento conjunto de los tres parámetros (eficiencia global) vs. coste. Análisis de Pareto.

operador, se establecieron los indicadores de presión (I5, I6).

Para evaluar la vulnerabilidad de la continuidad del servicio se usaron dos indicadores contruidos a partir de un análisis estadístico de más de 50 000 roturas registradas en la red de Canal de Isabel II durante cinco años, en el periodo 2010-2014. Para ello se identificaron las variables explicativas que condicionan las roturas de la red de distribución y la estratégica.

Para la estimación de los tiempos de maniobra para suministro alternativo y de corte se emplearon los registros de tiempo de reparación del sistema de incidencias de Canal de Isabel II. En esa determinación de tiempos influyen las variables diámetro, material, localización de la rotura, ubicación, proximidad de válvulas de corte y existencia de desagües.

La base de datos con 35 000 registros de los avisos e incidencias de calidad en la red de Canal de Isabel II en el mismo periodo de estudio se utilizó para el ajuste de los indicadores de calidad (I3, I4), construyéndose la función de distribución acumulada genérica y condicionada a las incidencias de calidad para su posterior tratamiento estadístico mediante el test K-S.

Se elaboraron modelos hidráulicos para el análisis de las presiones en los diferentes sectores de la red. Además, se hizo un análisis geográfico, en el que se han caracterizado los diferentes porcentajes de horas-propiedad para presión mínima y máxima de acuerdo con los umbrales establecidos en este estudio.

A partir de la metodología se construye la función multiobjetivo con datos de la red de la empresa. Del conjunto de los 494 sectores estudiados de la red de distribución de Canal de Isabel II se seleccionaron tres sectores colindantes (figura 4) sobre los que se aplicó. Así, se plantea una comparación directa entre las diferentes alternativas de resectorización, que facilite la selección de la mejor opción.

Para cada una de las alternativas planteadas se obtuvo la valoración de la vulnerabilidad frente a cada objetivo analizado, así como la vulnerabilidad total. Como ya se indicó, los factores de combinación de los tres objetivos aplicados en este estudio para el cálculo de la vulnerabilidad global son equitativos para evitar la alteración del resultado.

Dado que la estimación de costes asociados con cada solución depende en gran medida de

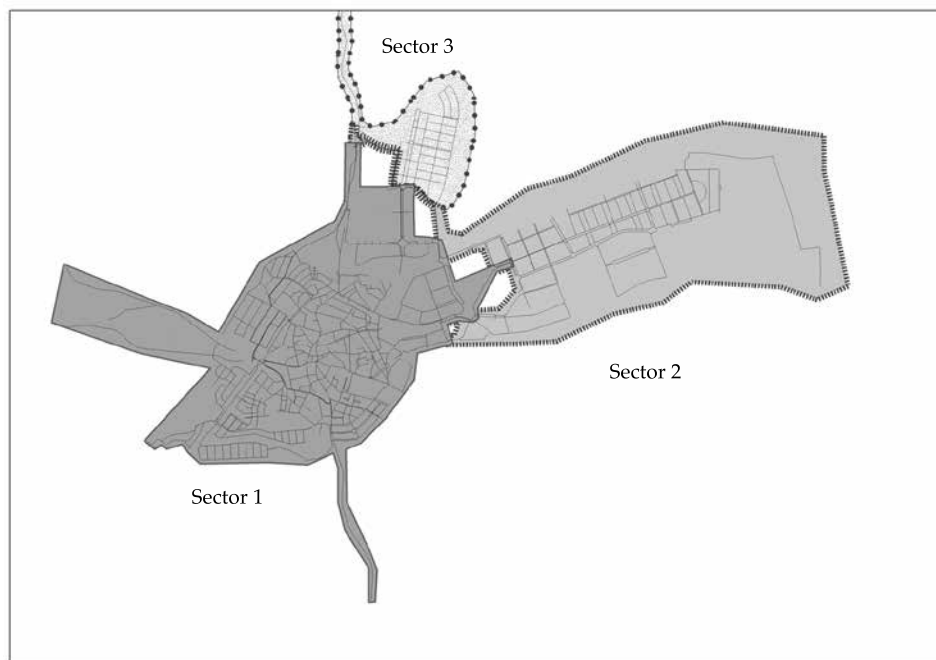


Figura 4. Caso de estudio, sectores analizados.

los criterios propios del gestor de la red, que definirá las especificaciones de los equipos más convenientes en cada caso, no se incluyen en el caso de estudio presentado.

Resultados y discusión

La metodología propuesta se aplicó a 494 sectores de la red de Canal de Isabel II en Madrid, evaluándose los indicadores que se muestran en el cuadro 1.

Continuidad

Para la obtención del indicador del riesgo de discontinuidad interno se estudiaron las variables explicativas en el deterioro de las tuberías de distribución. De ellas, se seleccionaron las siguientes por su mayor repercusión en las roturas registradas: (1) año de instalación o edad de la tubería, (2) diámetro, (3) presión media de funcionamiento y (4) profundidad de instalación. A partir de estas variables se desarrolló un

modelo conjunto que determina la probabilidad de fallo para cada tubería. Se analizó en primera estancia el año de instalación y el diámetro, pues se identificaron como variables dependientes; después se incorporaron las otras variables explicativas mediante coeficientes correspondientes a cada una de ellas. Así, se desarrolló un modelo de rotura en función del año y el diámetro, y dos factores de corrección que se calcularon mediante un modelo no paramétrico, dividiendo el valor de la función de distribución en roturas por el valor de la función de distribución genérica para cada variable:

$$Pa_i = p_{1,2}(t)f_2f_3 \quad (11)$$

Donde Pa_i es la probabilidad de fallo de la tubería de distribución i ; $p_{1,2}(t)$, la probabilidad de rotura de las tuberías de distribución en función del año de instalación y el diámetro; y f_2 y f_3 son los factores de corrección en función de las variables presión media y profundidad. Para el ajuste de la probabilidad de rotura se emplea

una expresión formada por una componente de fallo aleatorio constante y una componente de fallo por deterioro:

$$p_{1,2}(t) = A + \frac{B}{1 + e^{c(t-D)}} \quad (12)$$

Donde A , B , C y D son valores numéricos constantes que varían en función de las características particulares de cada red de estudio, y t es la antigüedad de la tubería en años.

En la figura 5a se muestran los resultados parciales de los diferentes modelos de probabilidad de fallo para cada variable. Por lo general se identifica una componente aleatoria (valor constante) más un término adicional en cada caso; una componente función del tamaño (para el caso del diámetro); otra exponencial por el deterioro para el caso del año de instalación; una de modulación para el caso de la profundidad, y otra para el caso de la presión.

Respecto del riesgo de discontinuidad externo, la probabilidad de fallo responde al mismo análisis considerado en el indicador anterior, pero particularizado al caso de las tuberías de la red estratégica con los datos disponibles de la red de Canal de Isabel II. En este caso, en el análisis de las roturas en las tuberías estratégicas se identificaron tres variables explicativas independientes: (1) año de instalación o edad de la tubería, (2) diámetro y (3) presión media de funcionamiento (ver figura 5b). A partir de ellas se desarrolló el modelo conjunto de forma análoga a la red de distribución:

$$Pb_i = p_1(t)f_2f_3 \quad (13)$$

Donde Pb_i es la probabilidad de fallo de la tubería estratégica i ; $p_1(t)$, la probabilidad de rotura de las tuberías estratégicas en función del año de instalación; f_2 , el factor de corrección en función del diámetro, y f_3 es el correspondiente a la presión media. Para el ajuste de la probabilidad de rotura se emplea una expresión formada por una componente de fallo aleatorio constante y dos componentes de fallo por deterioro, en función de la antigüedad de la tubería:

$$p_1(t) = E + Gt + \frac{H}{1 + e^{J(t-K)}} \quad (14)$$

Donde E , G , H , J y K son valores numéricos constantes que varían en función de las características particulares de cada red de estudio, y t es la antigüedad de la tubería en años.

El análisis de los indicadores con la configuración del sector permite extraer conclusiones sobre su repercusión en el comportamiento del sector. En la figura 6a se puede observar la influencia del nivel de mallado, expresado como longitud de red, dividido por número de propiedades, en el riesgo interno. Si este nivel es inferior a 50 m/propiedad se tiene una dispersión de resultados, pero por encima de ese valor todos los sectores tienen un buen comportamiento frente al riesgo interno de discontinuidad. La explicación de esta observación se debe a la minimización del impacto al aumentar el nivel del mallado, pues se reduce el área de afección y con ello el número de propiedades implicadas por las posibles roturas. En este sentido, aunque el nivel de mallado esté por debajo de ese umbral, se observan ciertos sectores con un comportamiento adecuado en cuanto al riesgo interno. Esto se puede deber a que una correcta sectorización facilita el establecimiento de un rango de presiones adecuado que puede reducir la probabilidad de fallo (Lambert & Thornton, 2011), y con ello el riesgo de discontinuidad.

Calidad

Se han construido las correspondientes funciones de distribución acumuladas de los dos indicadores, genérica y condicionadas a las incidencias. Según la metodología descrita para un tamaño de muestra de 494 sectores, el estadístico de contraste resultante es de 0.061. El resultado del test estadístico K-S para cada uno de los indicadores de calidad se muestra en la figura 6, donde se aprecia la separación máxima entre las funciones de distribución genérica y condicionada para los dos indicadores frente a las incidencias registradas. Este análisis ha permitido confirmar la influencia del porcentaje de

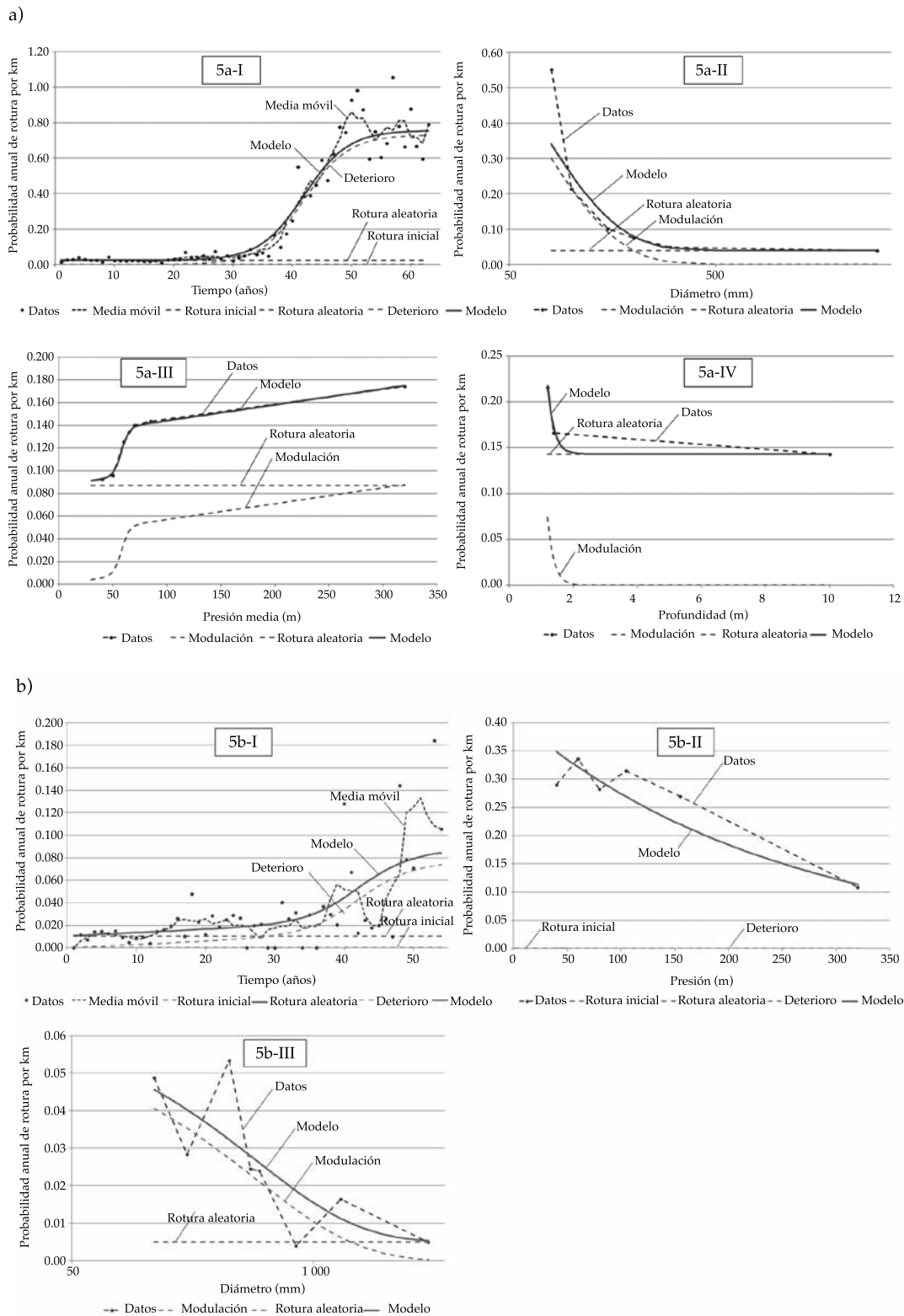


Figura 5a. Ajuste de la probabilidad de fallo en redes de distribución en función de: I) año de instalación, II) diámetro, III) presión media y IV) profundidad de la tubería. Figura 5b. Ajuste de la probabilidad de fallo en red estratégica en función de: I) año de instalación, II) diámetro y III) presión media.

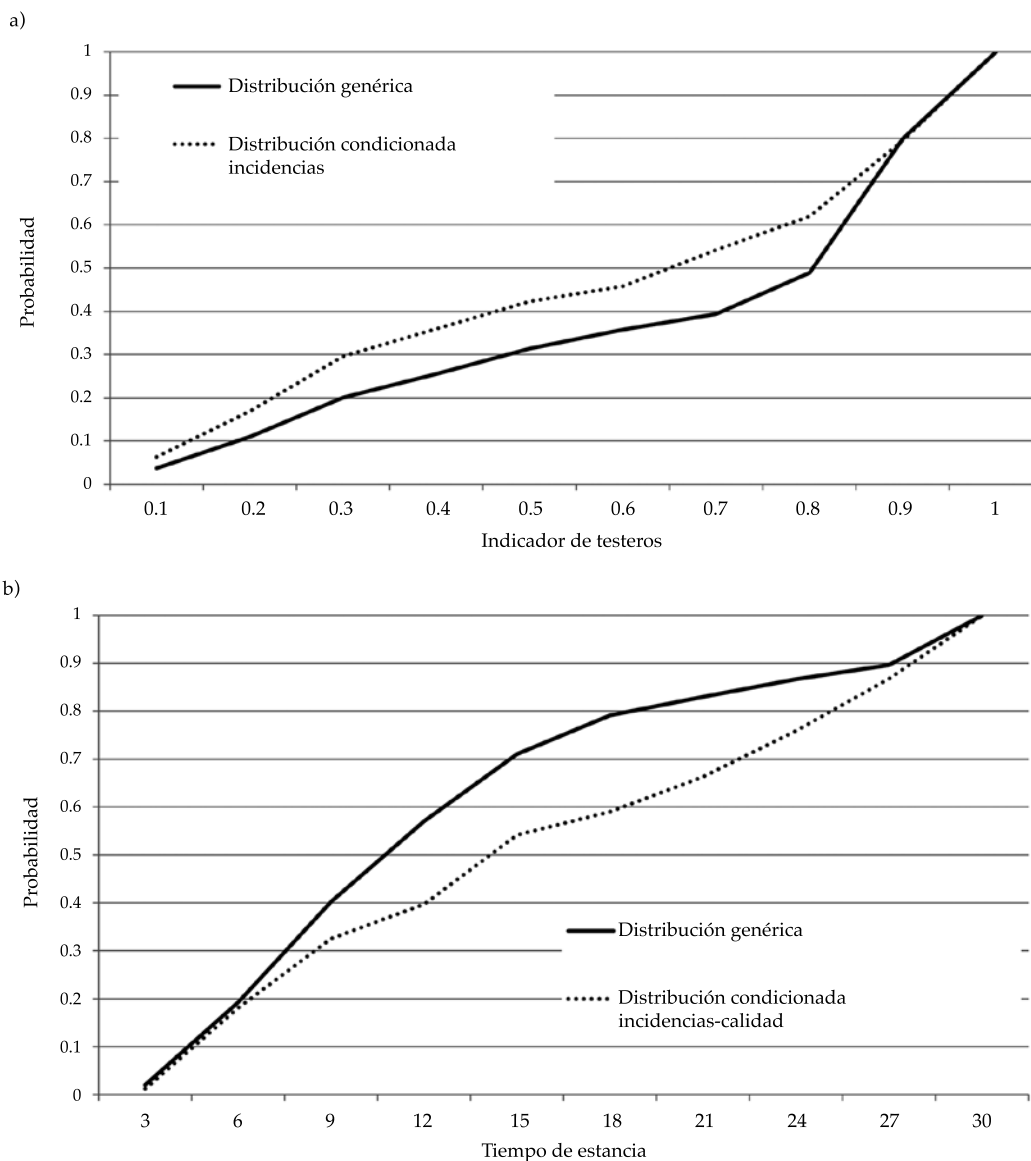


Figura 6a Análisis de indicadores e incidencias de calidad. Porcentaje de testers. Figura 6b. Análisis de indicadores e incidencias de calidad. Tiempo de estancia.

testeros y del tiempo de estancia sobre la calidad del agua.

Se ha empleado la información del test K-S de verificación de cada uno de los sectores con los datos reales sobre los que se aplica la metodología para obtener los pesos de combinación en función del nivel de significancia presentado por cada uno de los indicadores sobre la distribución de avisos de calidad. El resultado

obtenido para porcentaje de testers y tiempo de estancia es $q_1 = 0.25$ y $q_2 = 0.75$, respectivamente.

Analizando los valores obtenidos de los indicadores de calidad para los sectores de la red analizada, se observa que hay una gran dispersión de resultados. En este caso, la distribución de las incidencias de calidad se vincula con la configuración del sector mediante la relación longitud de red entre área. Según los

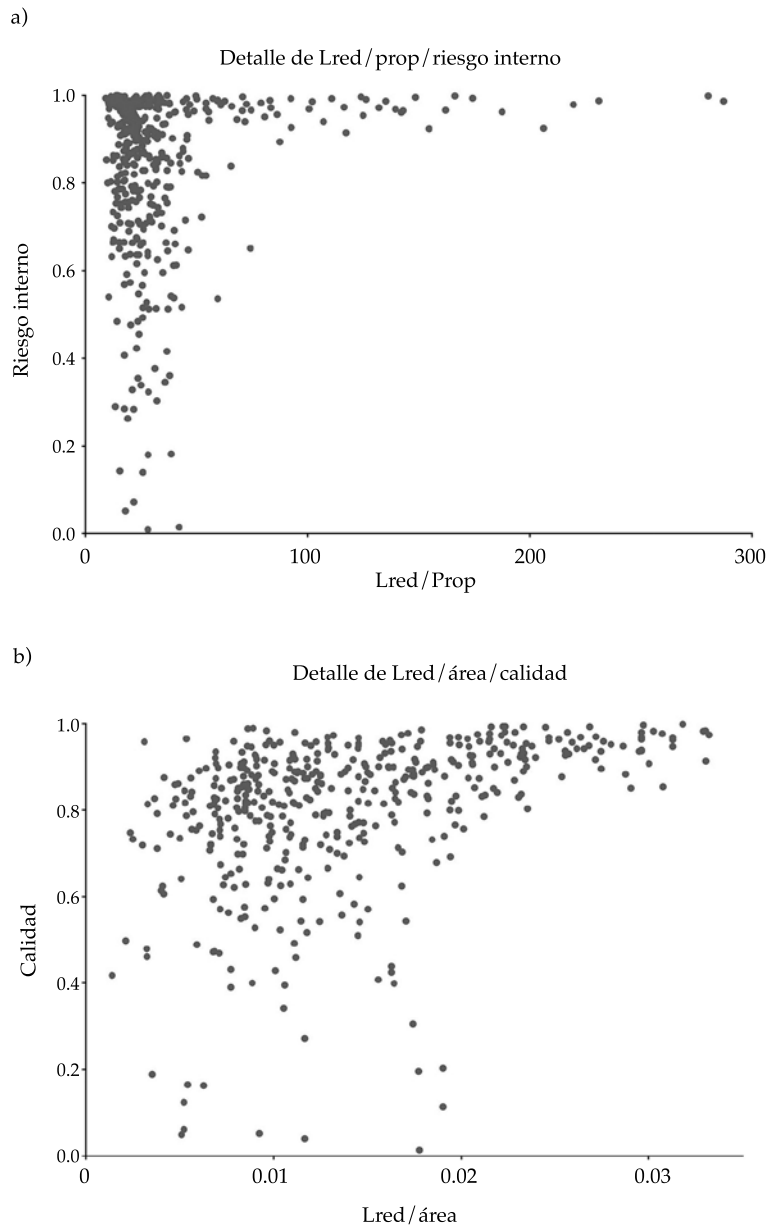


Figura 7. Vinculación de los indicadores con la configuración del sector: a) longitud de red/propiedades *versus* indicador de riesgo interno; b) longitud de red/área *versus* indicador de calidad.

resultados obtenidos (ver figura 7b), se observa de nuevo un umbral, próximo a los 0.02 m de red por cada m^2 de superficie, por encima del cual se tiene una mayor garantía de la calidad del servicio. Por debajo de este valor también hay sectores con buen comportamiento, pero la dispersión es mayor y no se puede garantizar el comportamiento.

De nuevo un adecuado nivel de mallado mejora la calidad del agua, pues se genera un mayor número de posibles caminos de suministro, reduciéndose el tiempo de estancia al mínimo, que la propia distancia entre punto de entrada al sector y punto de consumo exige. Además, esta característica reduce la posibilidad de que se generen testeros y su negativa repercusión en la calidad del agua.

Presión

En la figura 8 se muestra la distribución de porcentajes de sectores de acuerdo con el rango horas por propiedad y categorías de presiones obtenidos con los modelos hidráulicos. Se aprecia que el porcentaje de sectores en los que se tiene un porcentaje de horas por propiedad con presiones por debajo de la mínima es muy reducido. Este resultado es consistente con los criterios de diseño de la red sectorizada, que priorizan el aseguramiento de la presión mínima en los puntos de consumo del sector. Se ha confirmado la relación entre los sectores en los que no se cumplen las presiones y las zonas con mayor desnivel topográfico. La justificación de este resultado se asocia con la evidente complicación que introduce esta característica en el cumplimiento de un régimen adecuado de presiones.

La función multiobjetivo construida con los datos de la red de Canal de Isabel II se aplicó a tres sectores determinados. En el cuadro 2 se recogen las valoraciones obtenidas para cada sector de acuerdo con diferentes alternativas de resectorización planteadas. Con base en este

criterio, la opción C supone una mejora de la configuración actual y de las otras dos alternativas de resectorización planteadas (alternativas A y B), pues consiguen reducir la vulnerabilidad total del sector. Se observa que al mejorar el comportamiento frente a un objetivo se incide sobre el comportamiento del resto, por lo que la sectorización debe ser analizada desde un punto de vista de red y no de sector, dado que conseguir una baja vulnerabilidad en un sector puede implicar una alta vulnerabilidad en sectores próximos. Por este motivo, la solución a la sectorización requiere un equilibrio entre los distintos sectores.

La metodología plantea la construcción de la función multiobjetivo a partir de los datos específicos de la red a estudiar. Se basa en el análisis de la red existente como punto de referencia de los nuevos sectores, evitando así la comparación entre redes de abastecimiento diferentes, pues los condicionantes específicos, al igual que el nivel de servicio a prestar, es diferente en cada caso. No obstante, los datos recogidos pueden servir como punto de partida para redes en las que no se disponga del mismo volumen de registros históricos.

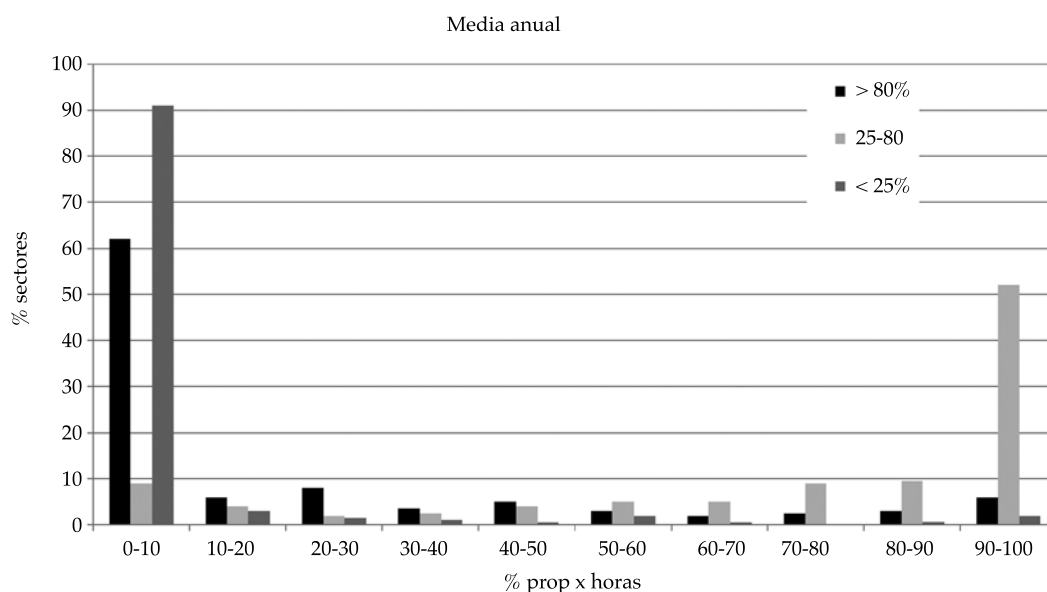


Figura 8. Porcentajes de sectores por rango horas por propiedad y categorías de presiones.

Cuadro 2. Comparativa de valoraciones obtenidas en las alternativas propuestas.

Alternativa	Long. red (m)	Núm. prop.	Área (m ²)	Vulnerabilidad			Vulnerabilidad total	
				Continuidad	Calidad	Presión		
Sector 1	Sit. in.	73 932	4 685	4 502 501	0.759	0.540	0.999	0.766
	Alt. A	74 251	4 701	4 691 135	0.815	0.601	0.989	0.802
	Alt. B	70 912	4 158	4 121 784	0.801	0.512	1.000	0.771
	Alt. C	72 997	4 581	1 668 881	0.659	0.602	0.351	0.537
Sector 2	Sit. in.	36 270	415	4 145 634	0.905	0.142	1.000	0.682
	Alt. A	35 751	409	4 035 679	0.715	0.451	0.998	0.721
	Alt. B	38 297	491	3 850 155	0.805	0.253	1.000	0.686
	Alt. C	37 156	436	2 423 756	0.827	0.627	0.458	0.637
Sector 3	Sit. in.	21 750	393	1 747 559	0.831	0.668	0.300	0.599
	Alt. A	21 951	383	1 668 881	0.818	0.557	0.951	0.775
	Alt. B	22 744	844	2 423 756	0.910	0.451	0.989	0.783
	Alt. C	21 800	476	1 681 131	0.841	0.751	0.451	0.681

Nota: Long. red = longitud de red; Sit. in. = situación inicial.

Conclusiones

La metodología presentada aporta una herramienta de valoración de la sectorización de redes de distribución sectorizadas, posibilitando una revisión de la sectorización para mejorar su eficiencia. Mediante un test basado en parámetros fácilmente obtenibles se dispone de una imagen cuantitativa sobre el nivel de vulnerabilidad de los diferentes sectores. De esta forma se podrán dirigir los esfuerzos de inversión a la mejora del comportamiento de aquellos sectores que presentan un mayor riesgo de incumplir el nivel de servicio, que debe ser preestablecido por el operador del abastecimiento.

Se plantea una función multicriterio para cuantificar la vulnerabilidad de un sector en una red de distribución, en términos de continuidad del servicio, calidad del agua y gestión de presiones. Aplicando esta función en los diferentes ámbitos implantados de una red sectorizada se pueden identificar los sectores críticos. Esta función permite establecer una comparación directa entre sectores para la toma de decisiones de inversión.

A fin de determinar la eficiencia de un sector se debe vincular la vulnerabilidad con el

parámetro coste. Para ello se combinan los tres niveles de vulnerabilidad planteados (calidad, continuidad y gestión de presiones) en un único indicador de vulnerabilidad global. La combinación se hace ponderando cada parámetro según las estrategias y criterios propios del gestor. En un segundo paso se realiza un análisis de Pareto, comparando alternativas en sus dos variables: coste y nivel de vulnerabilidad. Este análisis permite buscar el óptimo dentro de las soluciones frontera, ya sea para un nivel de vulnerabilidad deseado o bien en función del nivel de inversión.

Este procedimiento es útil para el diseño de soluciones alternativas o para nuevos ámbitos de una red sectorizada, buscando la menor vulnerabilidad. Introduciendo la variable coste asociada con cada solución se puede determinar la eficiencia de cada alternativa y seleccionar así, desde un punto de vista objetivo, la mejor opción.

Con los resultados obtenidos de aplicar los indicadores a la red de Canal de Isabel II se confirma la influencia del nivel de mallado, expresado como longitud de red entre número de propiedades, identificándose un umbral por encima del cual se tiene una mayor garantía de

continuidad de servicio. De igual manera, por encima de un determinado umbral de longitud de red/área del sector se tiene una mayor garantía de la calidad del servicio prestado.

La aplicación de la construcción de la función para la red de Canal de Isabel II y su aplicación a ciertos sectores muestra cómo caracterizar una red sectorizada de manera objetiva y cómo evaluar la configuración de diferentes alternativas con el fin de minimizar su vulnerabilidad. Esa comparación constituye una herramienta útil para establecer las prioridades de inversión, facilitando la toma de decisiones y cuantificando el nivel de mejora asociada con cada inversión.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Subdirección de I+D+i de Canal de Isabel II la ayuda prestada en la elaboración de la investigación recogida en el presente artículo.

Referencias

- Alegre, H., Baptista, J. M., Cabrera Jr., E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., & Parena, R. (2006). *Performance indicators for water supply services*. London: IWA Publishing.
- Awad, H., Kapelan, Z., Savic, D.A., & Emerson, A. (Enero, 2010). Optimal setting of time-modulated pressure reducing valves in water distribution networks using genetic algorithms. *Integrating Water Systems*, 31-37, Sheffield, UK.
- Birnbaum, Z. W. (1952). Numerical tabulation of the distribution of Kolmogorov statistic for finite sample size. *Journal of the American Statistical Association*, (47), 425-441.
- Cabrera-Béjar, J. A., & Gueorguiev-Tzatchkov, V. (2012). Modelación de redes de distribución de agua con suministro intermitente. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(2), 5-25.
- Di Nardo, A., & Di Natale, M. (2011). A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks. *Engineering Optimization*, 43(2), 193-211.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Guida, M., & Musmarra, D. (2013). Water network protection from intentional contamination by sectorization. *Water Resources Management*, 27(6), 1837-1850.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G., Tzatchkov, V., & Alcocer-Yamanaka, V. (2014). Water network sectorization based on graph theory and energy performance indices. *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 140(5), 620-629.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G., Tzatchkov, V., & Alcocer-Yamanaka, V. (2015). Performance indices for water network partitioning and sectorization. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15(3), 499-509.
- Galdiero, E., De Paola, F., Fontana, N., Giugni, M., & Savic, D. (2016). Decision support system for the optimal design of district metered areas. *Journal of Hydroinformatics*, 18(1), 49-61, DOI: 10.2166/hydro.2015.023.
- Fontana, N., Giugni, M., & Portolano, D. (2012). Losses reduction and energy production in water distribution networks. *J. Water Resour. Plann. & Manage.*, 138(3), 237-244.
- Gomes, R., Marques, A. S., & Sousa, J. (2011). Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems. *Urban Water Journal*, 8(2), 65.
- Gómez-Martínez, P., Cubillo, F., Martín-Carrasco, F. J., & Garrote, L. (2017). Statistical dependence of pipe breaks on explanatory variables. *Water*, 9(3), 158.
- Hunaidi, O., & Brothers, K. (2007). *Optimum size of district metered areas*. Water Loss Specialist Conference, IWA, Bucharest, Romania.
- Kandulu, J. (2013). Are we risking too much? Estimating the risk-mitigating benefit of urban water supply augmentation options. *Water Science & Technology*, IWA, 13(2), 531-539.
- Karadirek, I. E., Kara, S., Yilmaz, G., Muhammetoglu, A., & Muhammetoglu, H. (2012). Implementation of hydraulic modelling for water-loss reduction through pressure management. *Water Resources Management*, 26(9), 2555-2568.
- Lambert, A., & Thornton, J. (2011). The relationship between pressure and burst – A 'state-of-the-art' update. *Journal of Water Reuse and Desalination Water*, 13(2), 37-38.
- Massey, F. J. (1951). The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, 46(253), 68-78.
- Martínez-Codina, Á., Saavedra, C., Cueto-Felgueroso, L., & Garrote, L. (2016). Influencia de la presión en roturas de tubería de redes de distribución. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), 25-39.
- Morrison, J., Tooms, S., & Rogers, D. (2007). *District metered areas guidance notes*. London: IWA Publishing.
- Messac, A., & Mattson, C. A. (2004). *Normal constraint method with guarantee of even representation of complete Pareto frontier*. Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC.
- Pecci, F., Abraham, E., & Stoianov, I. (2017). Scalable Pareto set generation for multiobjective co-design problems in water distribution networks: A continuous relaxation approach. *Struct. Multidisc. Optim.*, 55(3), 857-869.
- Smirnov, N. (1939). Sur les écarts de la courbe de distribution empirique. *Recueil Mathématique*, 6, 3-26.
- Tzatchkov, V., Alcocer-Yamanaka, V., & Bourguett-Ortiz, V. (2008). Sectorización de redes de distribución de agua

potable a través de algoritmos basados en la teoría de grafos. *Tlálloc-AMH*, 40, 14-22.

UKWIR (1997). *The managing leakage series of reports*. London: United Kingdom Water Industry Research.

Wright, R., Abraham, E., Parpas, P., & Stoianov, I. (2015). Control of water distribution networks with dynamic DMA topology using strictly feasible sequential convex programming. *Water Resources Research*, 51(12), 9925-9941.

C.E. Francisco Cubillo-González

Canal de Isabel II S.A.
Subdirección de I + D + i
C/ Santa Engracia 125
28003 Madrid, ESPAÑA
Teléfono: +34 (91) 5451 000
fcubillo@canaldeisabelsegunda.es

Dirección institucional de los autores

M.C. Patricia Gómez-Martínez
Dr. Francisco Javier Martín-Carrasco

Universidad Politécnica de Madrid
ETSI Caminos Canales y Puertos
Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y Medio Ambiente
C/ Profesor Aranguren s/n
28040 Madrid, ESPAÑA
Teléfono: +34 (91) 3366 711
pgomezmartinez@canaldeisabelsegunda.es
f.martin@upm.es