

# Influencia de la presión en roturas de tubería de redes de distribución

• Ángela Martínez-Codina\* •  
Canal de Isabel II Gestión, España

\*Autor para correspondencia

• Casilda Saavedra •  
Universidad Tecnológica de Panamá

• Luis Cueto-Felgueroso • Luis Garrote •  
Universidad Politécnica de Madrid, España

## Resumen

Martínez-Codina, Á., Saavedra, C., Cueto-Felgueroso, L., & Garrote, L. (julio-agosto, 2016). Influencia de la presión en roturas de tubería de redes de distribución. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), 25-39.

Uno de los síntomas del deterioro de las redes de distribución de agua son las frecuentes roturas de tubería. Las gestoras del agua tratan de evitarlas en la medida de lo posible debido a los elevados costos económicos, sociales y medioambientales asociados a ellas. Se ha demostrado antes que la implantación de una gestión de presiones puede reducir la probabilidad de roturas. Se propone una metodología que analiza la influencia de la presión del agua en la probabilidad de roturas de tubería, a través de indicadores de presión. El principal objetivo es conocer los indicadores de presión más influyentes en la probabilidad de las roturas para una red en concreto. La metodología compara la función de distribución acumulada (FDA) condicionada a las roturas con 100 FDAs procedentes de series aleatorias de cada indicador de presiones. Los indicadores más influyentes se corresponden con los que tienen mayor número de hipótesis nulas rechazadas de la prueba de Kolmogorov-Smirnov. La metodología se ha aplicado a dos corregimientos de Ciudad de Panamá. Se concluye que los indicadores que representan la dispersión de los datos son los más influyentes en la probabilidad de las roturas.

**Palabras clave:** redes de abastecimiento urbano, rotura de tuberías, modelo bayesiano.

## Abstract

Martínez-Codina, Á., Saavedra, C., Cueto-Felgueroso, L., & Garrote, L. (July-August, 2016). Influence of Pressure on Pipe Breaks in Water Distribution Networks. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(4), 25-39.

Frequent pipe breaks are one symptom of the deterioration of water distribution systems. Water managers strive to avoid pipe breaks due to the high economic, social and environmental costs related to them. It has been previously demonstrated that water pressure management may succeed at reducing the probability of occurrence of pipe breaks. In this paper, a methodology that analyzes the influence of water pressure on the probability of occurrence of pipe breaks is proposed. The main objective is to identify the most influential pressure indicators on the probability of occurrence of pipe breaks for a particular network. The methodology compares the cumulative distribution function (CDF) conditioned to pipe breaks to 100 CDFs obtained from random realizations of the unconditional CDF. We argue that the most influential indicators on the probability of occurrence of pipe breaks are those associated with the largest number of rejected null hypotheses in the Kolmogorov-Smirnov test. The methodology has been applied to two districts of Panamá City. It is reasonable to conclude that the indicators that represent the dispersion of the data are the most influential on the probability of pipe breaks.

**Keywords:** Water supply systems, pipe breaks, bayesian model.

---

Recibido: 08/05/2015  
Aceptado: 09/03/2016

---

## Introducción

Las compañías gestoras del agua pretenden que se satisfagan todas las necesidades que son requeridas por sus usuarios, a los que les llega el suministro a través de las redes de distribución. Para poder prestar un buen servicio al ciudadano, el agua debe tener suficiente caudal y presión (Cabrera-Béjar & Gueorguiev-Tzatchkov, 2012), además de buena calidad. Sin embargo, los sistemas de distribución están en deterioro, que tienen como síntomas la aparición de roturas frecuentes en tuberías (Pelletier, Mailhot, & Villeneuve, 2003). Las roturas en redes de distribución pueden dar lugar a que no se cumplan estas condiciones, además de tener otros efectos nocivos sobre la salud humana debido a que el agua puede perder calidad porque puede contaminarse. También, las roturas de tubería podrían provocar interrupciones en el servicio, generando otros costos sociales, al producir incluso inundaciones y cortes en el tráfico (Xu, Chen, Li, & Ma, 2011). Asimismo, la actividad local de la zona circundante a la rotura se vería afectada y los niveles de ruido aumentarían por encima de lo habitual (Davies, Clarke, Whiter, & Cunningham, 2001). A su vez, las roturas constituyen un riesgo potencial debido a que dejarían fuera de servicio a los hidrantes en caso de incendios (Yamijala, Guikema, & Brumbelow, 2009). Las roturas no sólo afectan a los usuarios sino también a los gestores de las redes de abastecimiento de agua, dado que el costo que pueden provocar puede ser muy elevado. Además, las roturas implican grandes cantidades de pérdidas de agua, que en algunos países podría ascender a 70%, desencadenando tanto repercusiones económicas como graves consecuencias medioambientales (Berardi, Kapelan, Giustolisi, & Savid, 2008). Ante los costos sociales, económicos y medioambientales que producen las roturas, se puede pensar que la mejor solución podría ser la sustitución de toda la red de distribución, pero se trata de una inversión enorme, que está fuera de las posibilidades de las compañías del agua.

Por ello, los gestores del agua necesitan modelos que les ayuden a la toma de decisiones, a fin de poder predecir las roturas y así actuar para evitarlas en la medida de lo posible, y llevar a cabo estrategias de reparación o renovación. Sin embargo, resulta difícil plantear un modelo que permita deducir cuándo se va a producir una rotura o qué gestión es necesario hacer para tratar de reducirlas, en particular debido al elevado número de factores que contribuyen al deterioro de la red de distribución y que tiene como consecuencia la rotura de tuberías (Davies et al., 2001) (Boxal, O'Hagan, Pooladsaz, Saul, & Unwin, 2007). En los últimos años, se ha dedicado más atención a examinar cómo las roturas se encuentran influenciadas por la presión en los sistemas de distribución de agua (Lambert & Thornton, 2005). Con este objetivo, todavía se siguen realizando análisis prácticos y métodos de predicción, los cuales consideran normalmente a las tuberías y las acometidas por separado (Lambert & Fantozzi, 2010). En general, la gestión de presiones se asocia con el control de la presión máxima para disminuir las roturas de tubería en redes de distribución de agua. Sin embargo, se ha deducido que el análisis de las variaciones de presión es también crucial para conseguir este objetivo (Thornton & Lambert, 2007). Dada esta situación, es esencial que se analice una serie de indicadores de presión que permiten extraer información de las series de presión, además de resultar herramientas útiles de ayuda a la decisión (Alegre et al., 2006). Estos indicadores se pueden adaptar a la disponibilidad de datos de presión. Por tanto, un indicador de presión se puede definir como el estadístico calculado a partir de una serie de lapso de presión para un ancho de ventana específico y un tiempo de anticipación determinado. El ancho de ventana es el número de valores de presión que se requieren para calcular el indicador de presión y que es múltiplo de 24 horas debido al comportamiento cíclico diario de la presión. El tiempo de anticipación es el tiempo (en horas) que transcurre entre el final del periodo de computación del indicador de presión y el momento de registro de la rotura. La presión

del agua se puede medir en la cabecera de los sectores en los que se divide la red, porque se puede asumir que esta presión es representativa de todas las tuberías del sector, dado que las pérdidas de carga son relativamente bajas y las diferencias topográficas se tienen en cuenta en las condiciones del diseño de la red.

Por otra parte, Babovic, Drécourt, Keijzer y Hasen (2002) explican que la relación causal entre dos variables se puede establecer de modo probabilístico. También sugieren que las funciones de probabilidad pueden reducir la incertidumbre asociada con los datos de las tuberías, a los que, en su mayor parte, son difíciles de acceder por estar éstas enterradas. Así, en este artículo se plantea una metodología de análisis estadístico de roturas de tubería en redes de distribución de agua, que emplea reglas probabilísticas y trata de identificar los indicadores de presión con más influencia en la probabilidad de roturas. El fin principal de esta metodología es ayudar a las gestoras del agua a reducir las roturas de tubería que se producen en las redes de distribución de agua.

## Metodología

Las roturas de tubería están relacionadas con la presión del agua, pero existen distintas alternativas de gestión de la presión. Los indicadores de presión son estadísticos calculados a partir de la serie de presiones que muestran valores, como la presión y su variación, que a su vez influyen en la probabilidad de roturas (Martínez-Codina, Castillo, González-Zeas, & Garrote, 2013; Martínez-Codina, 2015a; Martínez-Codina, Castillo, González-Zeas, & Garrote, 2015b). A través de una gestión de presiones que limite los rangos de los indicadores que aumentan la probabilidad de roturas, se puede reducir el número de roturas que se produce en la red (Martínez-Codina, Cueto-Felgueroso, Castillo, & Garrote, 2015c).

Para conocer si un indicador es influyente en la probabilidad de las roturas, se comparan las estimaciones de las funciones de distribución

acumulada (FDA) de los indicadores de presiones, considerando dos situaciones: cuando se condicionan a la ocurrencia de una rotura (suceso raro) y cuando se calculan en la situación normal de operación (normal operación). Por lo general, las compañías gestoras cuentan con registros de roturas de los años más recientes y al encontrarse las tuberías enterradas, se complica el acceso a su información. Por ello, se propone el uso de funciones de probabilidad que permite reducir la incertidumbre asociada con los datos registrados. De esta forma, se determinan las funciones de distribución acumuladas (FDAs) de los valores del indicador de la serie de presión (situación normal de operación) y las FDAs de los valores del indicador en el momento de ocurrencia de las roturas (condicionado a las roturas). Si las funciones de distribución provienen de la misma población, no se puede deducir que el indicador de manera clara influya en la probabilidad de roturas. Sin embargo, si se prueba estadísticamente que las funciones no proceden de la misma población, se puede concluir que existe una relación entre el indicador analizado y la ocurrencia de las roturas. Debido a que el número de valores del indicador de la FDA condicionada a las roturas puede ser mucho menor que el número de valores del indicador de la FDA incondicional a las roturas, se generan series aleatorias a partir de los valores de los indicadores con el mismo número de valores de roturas registradas. Las series aleatorias se generan a partir de números pseudoaleatorios distribuidos de forma uniforme a lo largo de la serie de presiones completa. La serie completa de presiones es función del tiempo. Para generar una serie aleatoria correspondiente a un determinado indicador, se generan puntos o instantes de tiempo pseudoaleatorios distribuidos de modo uniforme a lo largo de la serie de presiones completa. Una vez obtenidas las fechas correspondientes a estos instantes de tiempo, se determinan los valores del indicador de presiones, que conformarán la serie aleatoria. Con los valores de los indicadores procedentes de la serie aleatoria, se

obtiene la FDA aleatoria del indicador. Se repite este proceso tantas veces como FDAs de series aleatorias se quieran obtener. De esta forma, se comparan las FDAs de series aleatorias del indicador con la FDA condicionada a las roturas del mismo indicador y se deduce si el indicador es influyente en la probabilidad de las roturas.

El modelo introduce unos parámetros de cálculo, llamados tiempo de anticipación y ancho de ventana. Como se ha mencionado, el tiempo de anticipación es el lapso entre el final del periodo de computación del indicador de presión y la rotura, y el ancho de ventana es el número de valores de presión que se requieren para calcular el indicador de presión (múltiplo de 24 horas). Estos parámetros son necesarios porque permiten determinar el intervalo de tiempo en el que la presión del agua, expresada a través de indicadores, es más influyente en la probabilidad de las roturas. Un análisis de sensibilidad de los parámetros de cálculo explica cuándo los indicadores de presión influyen más en la probabilidad de roturas.

La metodología propuesta en este apartado se aplica a nivel de sector y parte de la hipótesis de que la presión del agua es similar en todo el sector debido a que las pérdidas de agua deben ser significativamente bajas, debido a que se asume que se han seguido los criterios de sectorización para dividir la red de abastecimiento del agua, como el criterio de similitud entre cotas piezométricas de las tuberías. La metodología se divide en tres etapas principales: (1) filtrado de datos, (2) análisis de roturas y (3) análisis de sensibilidad. En primer lugar, el filtrado de datos conduce a la obtención de series de tiempo de presión y de roturas objeto de evaluación. En segundo lugar, el análisis de roturas permite la comparación entre la FDA de los indicadores calculados a partir de la serie de presiones y la FDA condicionada a las roturas de tuberías de los mismos indicadores. En tercer lugar, el análisis de sensibilidad del ancho de ventana y del tiempo de anticipación permite conocer qué indicador es más influyente en la probabilidad de roturas de tuberías.

## Filtrado de datos

Los datos que se necesitan en este estudio son las series temporales de las presiones y la ubicación de las roturas de tuberías, así como el momento en que se producen. La ubicación de las roturas es necesaria para identificar las zonas en las que se produjeron las roturas y poder analizar la influencia de la presión en la probabilidad de las roturas en cada una de las zonas.

Se aplica una nueva técnica de agrupamiento de datos de la variable continua (presión) para definir los periodos de tiempo en los que el agua se suministra bajo condiciones estables. Por condiciones estables se entiende que no haya registros de presión muy baja o nula. De esta forma, se descartan los posibles errores de medición de la presión. La técnica consiste en primer lugar en ajustar las series temporales de la presión del agua a varias funciones paramétricas (regresión lineal, regresión polinómica, modelo exponencial, series de Fourier, modelo gaussiano, modelos de series potenciales, modelos racionales, suma de senos, distribución de Weibull) y no paramétricas (interpolación, ajuste suave). La serie temporal de la presión y las curvas ajustadas se comparan de forma gráfica y cuantitativa por medio de la bondad del ajuste, para obtener la curva que mejor se ajusta a los datos. El siguiente paso consiste en determinar la función derivada de la función que representa el mejor ajuste. Además, se deben obtener los extremos (máximos y mínimos) de la función derivada de la curva ajustada, que son equivalentes a los puntos de inflexión de la curva ajustada. Sin embargo, sólo unos extremos conducen a la agrupación de las series de tiempo y son aquellos que están fuera del rango definido por la media de los valores mínimos y máximos, más y menos un número de veces la desviación estándar de los mismos valores extremos, respectivamente. La forma de la serie temporal de presiones definirá el factor multiplicador de la desviación típica de las presiones. Los valores extremos elegidos generan grupos de datos sucesivos en el tiempo dentro de la serie tem-

poral de las presiones con un comportamiento estadístico similar listos para ser analizados. En la figura 1 se muestra la técnica de agrupamiento de datos, una vez que se ha determinado el mejor ajuste a la serie de presiones. Se presenta la serie de presiones completa, la función a la que se ajusta dicha serie y la primera derivada de la función ajustada. Los mayores máximos y menores mínimos de la función derivada permiten dividir la serie de presiones completa en tramos estadísticamente homogéneos. Por lo tanto, esta técnica de agrupamiento de datos permite definir tramos estadísticamente homogéneos en las series temporales, facilitando el análisis de estas series con cambios estadísticos en el tiempo, porque permite estudiar la variable de la serie con independencia de cada uno de los tramos en los que se ha dividido dicha serie temporal. Para diferenciar los tramos estadísticamente homogéneos se tienen en cuenta los errores de medición y cambios relevantes en presión. Los errores de medición se asocian con periodos prolongados con registro nulo de presiones. Los cambios en la presión se identifican con variaciones relevantes de la presión media y desviación típica.

Los datos de roturas de tubería que se requieren en este análisis deben haberse registrado en las tuberías, no en otros elementos de la red, y no tienen que ser provocadas. Al mismo tiempo, los datos de roturas y presiones deben solaparse con el tiempo para poder estudiar su relación.

### Análisis de roturas

En esta parte de la metodología, se identifican los indicadores de presión del agua relacionados con roturas de tubería. Se parte de los indicadores mostrados en el cuadro 1. La figura 2a ilustra cómo se calculan los indicadores de presión condicionados a las roturas. Muestra una rotura y su antecedente serie temporal para un periodo determinado. Los indicadores relacionados con la presión se computan mediante el análisis de la serie temporal de presiones para un ancho de ventana dado y separada una anticipación en el tiempo del evento de roturas. Si se repite este proceso antes de cada registro de roturas se obtiene un conjunto de valores del indicador de presiones condicionado a las roturas. A partir de dichos valores, se puede obtener la FDA del indicador condicionado a las roturas.

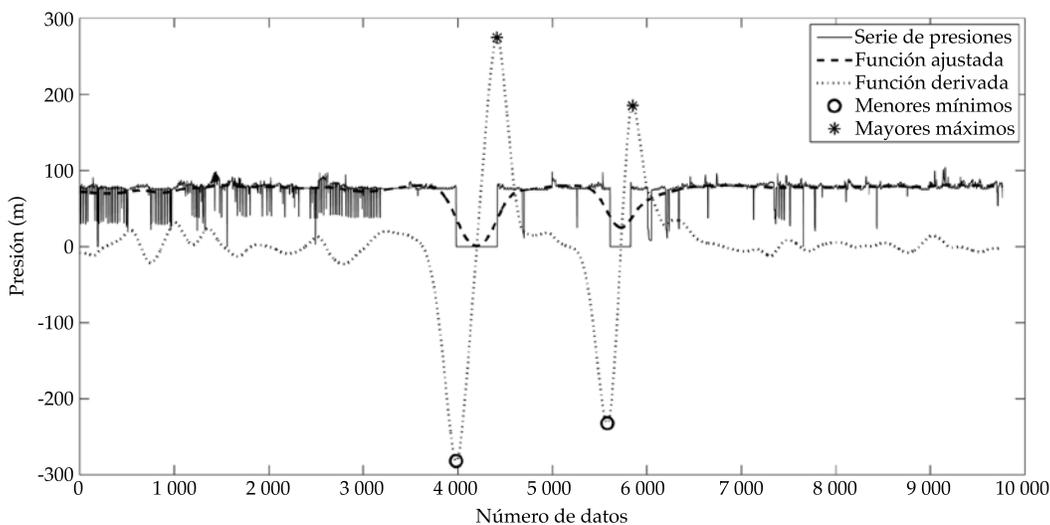


Figura 1. Método de filtrado de datos. Se muestra un caso de estudio (Bethania). Se presenta la serie completa de presiones, la función ajustada a la serie de presiones y la función derivada de la función ajustada. Se identifican mayores máximos y menores mínimos de la función derivada.

Cuadro 1. Indicadores de presión del agua.

Nombre	Fórmula
Presión máxima	$\text{máx}_p = (\text{máx}_{i=1,\dots,n}(p_i))$
Presión mínima	$\text{mín}_p = (\text{mín}_{i=1,\dots,n}(p_i))$
Presión media	$\bar{p} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i\right)$
Rango de presión	$rg_p = \text{máx}_p - \text{mín}_p$
Variabilidad de presión	$s_p = \left(\left(1/n \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2\right)^{1/2}\right)$
Variación de presión	$v_p = (\text{máx}_{i=1,\dots,n}( p_{i+1} - p_i ))$
Rango de variación de presión	$rv_p = (\text{máx}_{i=1,\dots,n-2}( 2p_{i+1} - p_i - p_{i+2} ))$

$p_i$  representa la presión del valor  $i$  y  $n$  es el número de valores de presión considerados para determinar cada indicador.

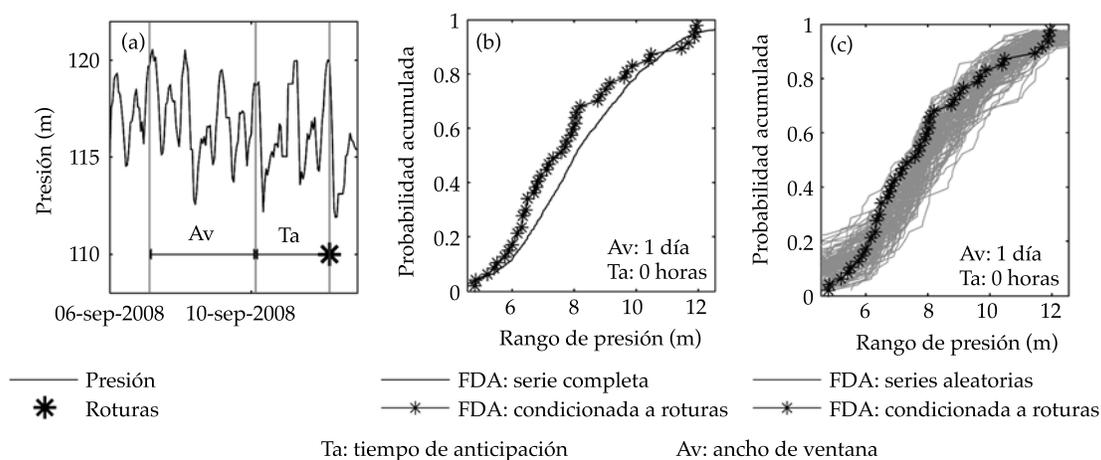


Figura 2. a) Cálculo del indicador condicionado a las roturas; b) comparación de FDA condicionada a las roturas y FDA de la serie completa; c) comparación de FDA incondicional a las roturas y 100 FDAs procedentes de la FDA de la serie completa.

El conjunto de valores del indicador incondicionales a las roturas se calcula a partir de la serie completa de presiones con una ventana temporal móvil (figura 2b). El ancho de ventana es el mismo que el utilizado en el cálculo del conjunto de valores de los indicadores condicionados a las roturas. Sin embargo, los resultados dependen del tamaño de las muestras que se comparan. El número de valores del

indicador empleados para determinar la FDA condicionada a las roturas puede ser menor, en comparación con el número de indicadores utilizados para estimar la FDA de la serie incondicional de presiones. Por esta razón, la FDA estimada y condicionada a la ocurrencia de las roturas se compara con un conjunto elevado de series aleatorias que tienen el mismo tamaño muestral que la FDA condicionada a las roturas

y que se obtienen a partir de los valores de los indicadores incondicionales a las roturas. En la figura 2c se muestra el resultado de graficar la FDA condicionada a las roturas y 100 FDAs procedentes de 100 series aleatorias de la FDA incondicional a las roturas.

Se aplica la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Conover, 1980) para comparar la FDA obtenida a partir de los indicadores de presión antes de cada rotura con cada una de las FDAs resultantes de las series aleatorias de los indicadores.

Se supone que  $F_1(x)$  y  $F_2(x)$  son dos pares de FDAs de dos muestras de datos de la variable  $x$ . La hipótesis nula y la hipótesis alternativa de la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) pueden describirse como sigue:

$$H_0: F_1(x) = F_2(x) \text{ para toda } x$$

$$H_1: F_1(x) \neq F_2(x) \text{ para al menos un valor de } x$$

El estadístico  $D$  se puede describir como:

$$D = (\sup_x |F_1(x) - F_2(x)|)$$

Donde  $D$  es la máxima distancia vertical entre las dos funciones  $F_1(x)$  y  $F_2(x)$ . Si el estadístico  $D$  es mayor que un determinado valor crítico, la hipótesis nula se rechaza (Khan, Coulibaly, & Dibike, 2006):

$$D \leq D_\alpha \text{ se acepta } H_0$$

$$D > D_\alpha \text{ se rechaza } H_0$$

Donde  $D_\alpha = c(\alpha) * \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 * n_2}}$ , siendo  $n_1$  el número de valores de la primera muestra y  $n_2$  el número de valores de la segunda. El coeficiente  $c(\alpha)$  depende del nivel de significancia para  $\alpha = 0.05 \rightarrow c(\alpha) = 1.36$ .

La hipótesis nula de la prueba de K-S afirma que la FDA del indicador condicionado a las roturas ( $F_1(x)$ ) y la FDA del indicador de la serie completa de presiones ( $F_2(x)$ ) proceden

de la misma función de distribución teórica. Si el estadístico  $D$  es mayor que el valor crítico, la hipótesis nula no se puede aceptar, lo que significa que el indicador en estudio puede influir en la probabilidad de roturas de tubería. Cuanto mayor sea el número de hipótesis rechazadas cuando se compara la FDA del indicador de la serie completa con cada una de las funciones condicionadas a las roturas, mayor influencia tendrá el indicador de presiones en las roturas.

### Análisis de sensibilidad

Con el fin de identificar el indicador de presiones más importante con respecto a los resultados de la probabilidad de roturas de tubería, se desarrolla un análisis de sensibilidad que calcula el tiempo de anticipación y ancho de ventana para los cuales el indicador es más influyente en la probabilidad de las roturas. Para ello, se aplica la prueba de K-S (Conover, 1980) entre las FDAs procedentes de series aleatorias del indicador de la serie temporal de presiones y la FDA del indicador condicionado a las roturas. El mayor número de hipótesis nulas rechazadas determina la situación en la que el indicador de presiones en análisis es más influyente en la probabilidad de roturas.

### Casos de estudio

Los casos de estudio en donde se ha aplicado la metodología son dos corregimientos o zonas de Ciudad de Panamá, llamados San Francisco y Bethania. En la figura 3 se muestra la red de distribución de estas áreas, cuyas características principales se presentan en el cuadro 2.

La figura 4 enseña los periodos en los que las condiciones de suministro son estables y además se muestra el número de roturas registradas en cada periodo. Esta figura 4 es el resultado de la primera parte de la metodología, de filtrado de datos. El periodo de registro está comprendido entre el 3 de enero



Figura 3. Red de distribución de los corregimientos de San Francisco (abajo a la derecha) y Bethania (arriba a la izquierda).

Cuadro 2. Características generales de los corregimientos de Ciudad de Panamá.

Núm.	Corregimiento	Área (km <sup>2</sup> )	Longitud (km)	Material		Diámetro (")
				Porcentaje	Material	
1	San Francisco	6.24	77.915	91%	Hierro fundido	2-24
				6%	PVC	
				3%	HR	
2	Bethania	8.88	119.26	78%	Hierro fundido	1-42
				17%	PVC	
				2%	Fibrocemento	

de 2012 y el 14 de febrero de 2013. En cada uno de los corregimientos se puede apreciar que hay tres tramos en los que las presiones son estadísticamente homogéneas, los cuales se van a estudiar de forma independiente: en San Francisco, el primero, segundo y tercer

tramo; y en Bethania, el primero, tercero y quinto tramo. Los tramos segundo y cuarto de Bethania no se han representado, al existir errores de medición de presión, por lo que no se puede analizar la influencia de la presión en la probabilidad de roturas.

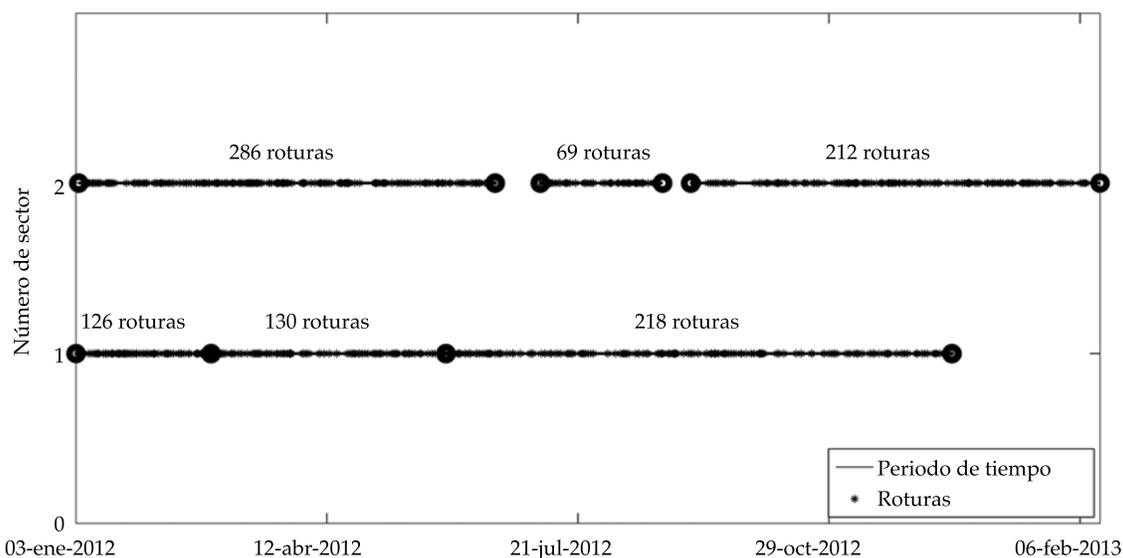


Figura 4. Periodos de tiempo con condiciones estables de suministro y número de roturas en los dos corregimientos de San Francisco (número 1) y Bethania (número 2).

### Tratamiento de datos de roturas

Entre las variables almacenadas en la base de datos de roturas se explica la causa del fallo del sistema. Las causas de las quejas se refieren tanto a problemas de la red de distribución de agua como de la red de saneamiento. Se filtran los problemas según los dos corregimientos de San Francisco y Bethania. Las causas de las quejas de los usuarios registradas, en el caso de agua potable, pueden ser baja presión, carro de cisterna no despacha agua, daño al hidrante, fuga de agua, interrupción del suministro, problemas de calidad del agua, reposición del pavimento, medidores, conexión ilegal y robo de agua, cortes del servicio por error, denuncia-toma de agua, mantenimiento de camino y solicitud de inspección de alto consumo. Debido a que sólo se consideran las roturas que no han sido provocadas y que se producen en la infraestructura de la red de distribución, no en acometidas ni contadores, las quejas de los usuarios que se consideran son aquellas que se refieren a “baja presión”, pues una rotura da lugar a que disminuya la presión, y a “fuga de agua”, porque una

rotura se agrupa dentro de las fugas de agua alertadas por usuarios. Se podría considerar la queja de alto consumo como una consecuencia de una rotura, pero puede que se trate de fallos de los contadores o roturas en las acometidas. Además, entre las variables de la base de datos de roturas se encuentran la fecha de apertura de la rotura y la fecha de cierre de la rotura. Se ha optado por escoger una sola fecha de cierre, a la que se asocia la primera fecha de apertura debido a que una rotura puede ser alarmada por los usuarios desde que se produce hasta que se repara. Sin embargo, se debe tener en cuenta que si la fecha de cierre se repite en varias ocasiones puede significar que un día en concreto se reparan varias roturas al mismo tiempo, pero se considera que tales roturas han ocurrido con poco margen de tiempo y por la misma causa.

### Resultados y discusiones

La metodología presentada se ha aplicado en los dos corregimientos de Ciudad de Panamá: San Francisco y Bethania, en los que se distinguían tres tramos homogéneos de presiones en cada

uno de ellos (figura 4). Se han evaluado los indicadores que se muestran en el cuadro 1. Para conocer qué indicadores son los más influyentes en la probabilidad de ocurrencia de las roturas se hizo un análisis de sensibilidad de los dos parámetros de cálculo, tiempo de anticipación y ancho de ventana. Este último parámetro es múltiplo de 24 horas, al tener la presión un comportamiento cíclico.

En cada uno de los tramos se ha comparado la FDA condicionada a las roturas con cada una de las 100 funciones de distribución procedentes de las series aleatorias del indicador incondicional a las roturas, variando el tiempo de anticipación y ancho de ventana. En el cuadro 3 se muestra el número máximo de

hipótesis falsas que se rechazan de la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Esta situación se corresponde con determinados valores del tiempo de anticipación y el ancho de ventana, los cuales se muestran en el cuadro 4. En la última columna del cuadro 3 se presenta el número de tramos en los que se rechaza al menos 60% de las hipótesis nulas evaluadas, para poder determinar los indicadores más influyentes en la probabilidad de ocurrencia de roturas.

Se distingue en el cuadro 3 que en todos los tramos analizados de los corregimientos de San Francisco y Bethania, los indicadores del rango de presión, de la variabilidad de presión y de la variación de presión influyen en la probabilidad de la rotura. Se observa que en 100%

Cuadro 3. Porcentaje de hipótesis nulas que son rechazadas de la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Número de tramos en los que se rechaza al menos 60% de las hipótesis nulas.

Indicador/corregimiento	San Francisco			Bethania			Tramos ( $\geq 60\%$ )
	1	2	3	1	3	5	
Tramo							
Presión máxima	98	94	32	93	38	94	4
Presión mínima	82	88	54	83	74	86	5
Presión media	100	100	53	97	44	86	4
Rango de presión	94	73	100	100	69	98	6
Variabilidad de presión	100	91	89	98	60	96	6
Variación de presión	100	94	98	100	62	84	6
Rango de variación de presión	99	100	100	88	48	82	5

Cuadro 4. Parámetros de cálculo del modelo: tiempo de anticipación ( $Ta$ ) y ancho de ventana ( $Av$ ), cuando el número de hipótesis nulas rechazadas es máximo. La unidad de medida de los parámetros es la hora.

Indicador/corregimiento	San Francisco						Bethania					
	1		2		3		1		3		5	
Tramo	$Ta$	$Av$	$Ta$	$Av$	$Ta$	$Av$	$Ta$	$Av$	$Ta$	$Av$	$Ta$	$Av$
Presión máxima	18	2	23	2	79	1	9	4	146	5	51	1
Presión mínima	119	1	62	1	125	5	156	5	51	5	52	1
Presión media	33	1	67	1	97	2	67	5	36	1	34	1
Rango de presión	146	1	60	1	58	3	11	4	101	1	6	1
Variabilidad de presión	161	3	149	2	35	5	133	5	102	1	56	5
Variación de presión	139	1	1	1	58	3	33	4	66	5	11	2
Rango de variación de presión	164	3	76	1	64	4	80	1	54	1	14	1

de los tramos, el número de hipótesis nulas rechazadas en estos tres indicadores supera 60% de los casos estudiados. El rango de presión se calcula a través de la diferencia entre la presión máxima y presión mínima; la variabilidad de presión, con la desviación típica de la presión, y la variación de presión, con el máximo de la diferencia de presiones en cada paso de tiempo horario. El rango de presión y la variabilidad de presión son indicadores que hacen referencia a la dispersión de los datos, a la persistencia de la variación de la presión y que en términos de resistencia de materiales se asemeja a la fatiga. La variación de presión representa cómo crece o decrece la presión con el tiempo.

De esta forma, los indicadores del rango de presión, de la variabilidad de presión y de la variación de presión son los indicadores más influyentes en la probabilidad de ocurrencia de roturas de los corregimientos estudiados. Tales resultados verifican uno de los principios básicos de la implantación de una gestión de presiones, que sugiere se controlen las variaciones de presión, con el fin de reducir la probabilidad de ocurrencia de roturas (Thornton & Lambert, 2007).

Sin embargo, se debe mencionar que para el resto de indicadores (presión máxima, presión mínima, presión media, rango de variación de presión), el porcentaje de tramos en los que se rechazan más de 60% de las hipótesis analizadas, es de al menos 66.67% (cuatro de los seis tramos considerados). Por tanto, se puede afirmar que la presión es un factor determinante que contribuye al deterioro de la red de distribución de los dos corregimientos en Ciudad de Panamá. Sin embargo, que el número de roturas sea tan elevado en periodos de tiempo relativamente cortos puede dar lugar a que se superpongan los efectos entre roturas, lo que podría aumentar el número de hipótesis rechazadas. Se puede llegar a pensar que si una rotura se produce con tan poco margen de tiempo desde que sucede otra rotura es porque una misma causa de deterioro puede influir en la rotura de varias tuberías y también porque cuando se rompe una tubería se pueden producir cambios en el entorno e

interior de las tuberías cercanas a la rotura, que pueden provocar el fallo de las mismas.

Para los tres indicadores seleccionados como influyentes en la probabilidad de roturas, se representan la FDA condicionada a las roturas y las 100 FDAs procedentes de las series aleatorias del indicador incondicional a las roturas, cuando el número de hipótesis nulas rechazadas es máximo. Cuando el número de hipótesis rechazadas alcanza su máximo, la probabilidad de rotura es más elevada. Para esta situación, en la figura 5 se muestran los resultados para el indicador del rango de presión; en la figura 6, para el indicador de la variabilidad, y en la figura 7, para el indicador de la variación de presión. También se tiene el tiempo de anticipación y ancho de ventana que hacen máximo el número de hipótesis nulas rechazadas. El tiempo de anticipación puede asociarse con el tiempo que transcurre desde que ocurre la rotura hasta que se registra.

En la figura 5 se aprecia que la FDA condicionada a las roturas sigue un comportamiento estadístico característico y diferente que en la mayoría de los casos de las FDAs de series aleatorias. En cuatro de los seis tramos, la FDA condicionada a las roturas está desplazada hacia los valores más elevados del indicador. Es de destacar que los valores del indicador del rango de presión en el tercer tramo del corregimiento de Bethania difieren en el orden de magnitud con respecto a los otros dos tramos. Hay que mencionar que en este tramo, los valores del rango de presión son bastante inferiores, no sólo en cuanto a los de los otros dos tramos del corregimiento de Bethania, sino también en relación con los tramos de San Francisco. Estos resultados podrían llegar a explicar que en este tercer tramo del corregimiento de Bethania, el número de hipótesis nulas falsas es mucho menor que el resto de tramos analizados.

En el indicador de la variabilidad de presión, representado en la figura 6, se observa que de manera clara la FDA condicionada a las roturas está separada de las FDAs obtenidas de series aleatorias del indicador, estando desplazada hacia valores más elevados o más bajos del

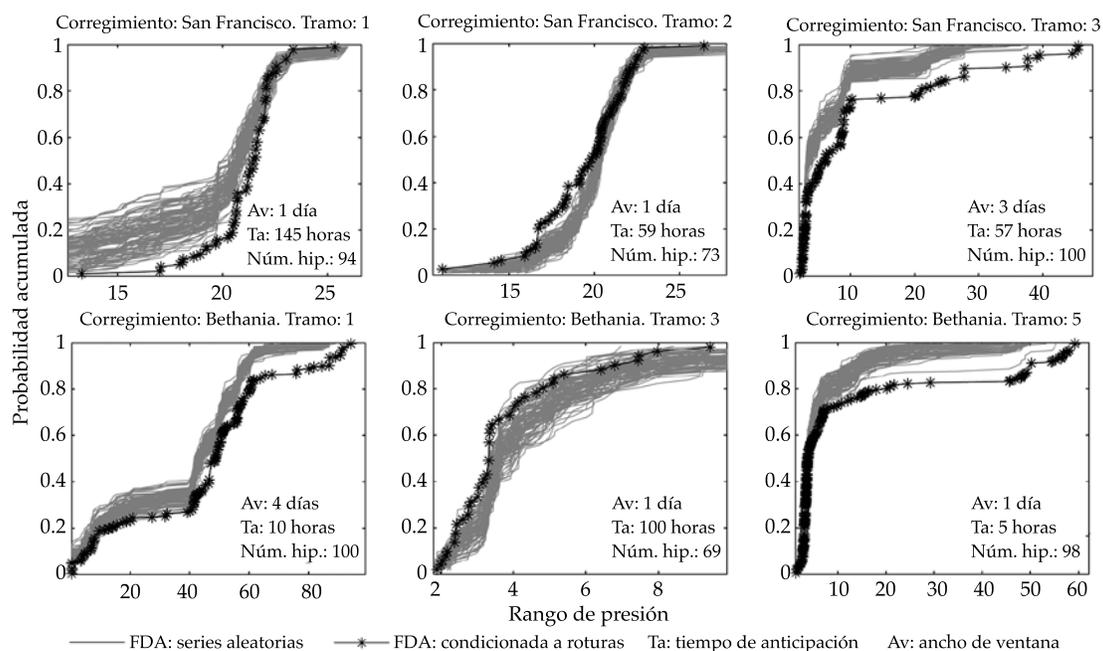


Figura 5. Para el indicador del rango de presión se muestran las funciones de distribución acumuladas siguientes: FDA condicionada a las roturas y FDAs procedentes de las 100 series aleatorias, cuando el número de hipótesis nulas de la prueba de K-S es el máximo. Se indica el valor del tiempo de anticipación y ancho de ventana.

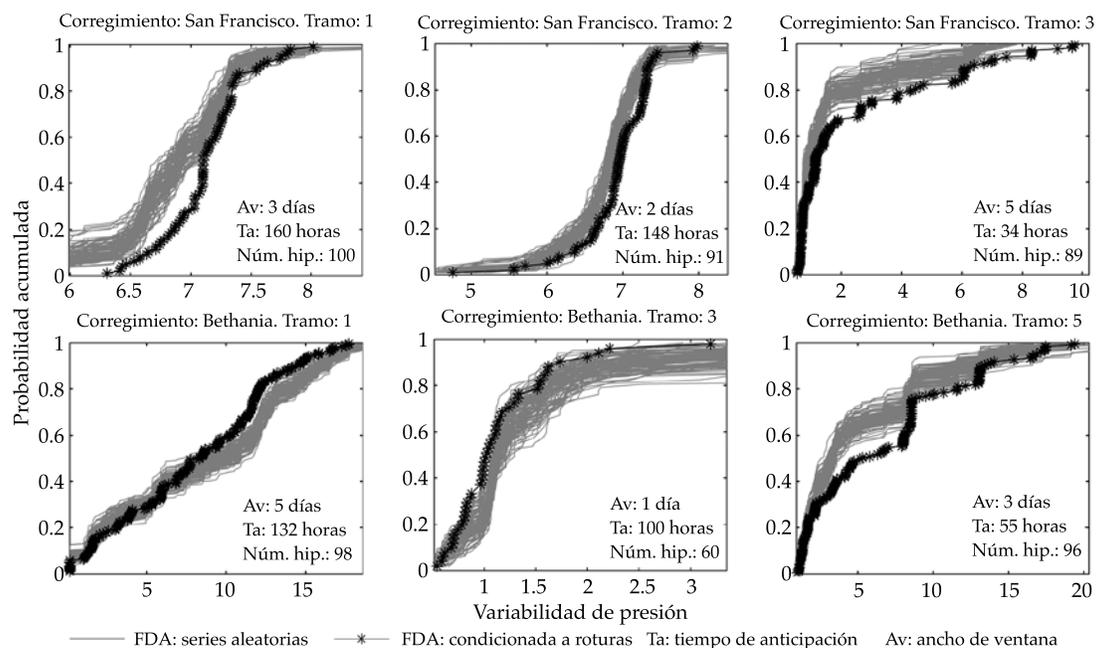


Figura 6. Para el indicador de la variabilidad de la presión se presentan las funciones de distribución acumuladas siguientes: FDA condicionada a las roturas y FDAs procedentes de las 100 series aleatorias, cuando el número de hipótesis nulas de la prueba de K-S es el máximo. Se indica el valor del tiempo de anticipación y ancho de ventana.

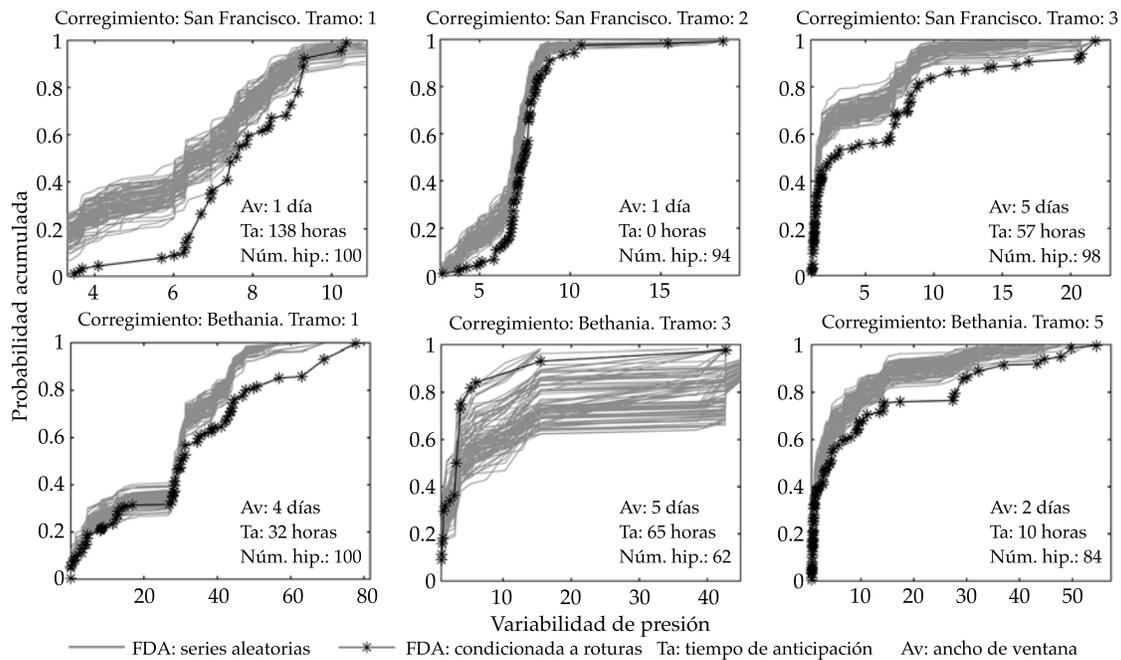


Figura 7. Para el indicador de la variación de presión se muestran las funciones de distribución acumuladas siguientes: FDA condicionada a las roturas y FDAs procedentes de las 100 series aleatorias, cuando el número de hipótesis nulas de la prueba de K-S es el máximo. Se indica el valor del tiempo de anticipación y ancho de ventana.

indicador. En cuatro de los seis tramos, la FDA condicionada a las roturas adquiere valores más altos del indicador para la misma probabilidad acumulada.

Con excepción del primer tramo de Bethania, la FDA condicionada a las roturas del indicador de la variabilidad de presión tiene un comportamiento estadístico similar a la FDA condicionada a las roturas del indicador del rango de presión, es decir, la FDA condicionada a las roturas está por encima o por debajo del resto de FDAs de series aleatorias para los mismos tramos de presiones.

En el segundo tramo del corregimiento de San Francisco, la diferencia en el comportamiento estadístico de la FDA condicionada a las roturas es más notable, pues esta función se desplaza hacia valores más elevados del indicador y el número de hipótesis rechazadas pasa de 73, con el indicador del rango de presión; a 91 hipótesis, con el indicador de la variabilidad de presión.

Como sucedía con el indicador del rango de presión, en el tercer tramo del corregimiento de Bethania, el orden de magnitud del indicador de la variabilidad de presión es menor que en el resto de tramos tanto de Bethania como de San Francisco. En este tramo, el número de hipótesis rechazadas es de 60, bastante inferior al resto de tramos, cuyo porcentaje de rechazos es como mínimo de 89%.

Por último, la FDA estimada a partir de los valores del indicador de la variación de presión condicionado a las roturas destaca sobre las 100 FDAs estimadas con 100 series aleatorias de valores del mismo indicador (figura 7). Para la misma probabilidad acumulada, en cinco de los seis tramos, los valores del indicador son superiores cuando está condicionado a las roturas que cuando no lo está.

En este caso del indicador de la variación de presión, el tercer tramo del corregimiento de Bethania también cuenta con el menor número

de hipótesis rechazadas, como sucedía con los dos indicadores anteriores. Sin embargo, el orden de magnitud del indicador es similar al resto de tramos, pero se debe considerar que tan sólo unos pocos valores del indicador de la variación de presión adquieren valores elevados del indicador.

De esta forma, se recomienda la implementación de una gestión de presiones en los corregimientos analizados, que considere en primer lugar la dispersión de las mediciones de presión y su ritmo de crecimiento, pero que también tenga en cuenta otros indicadores de presión, con el fin de disminuir la probabilidad de roturas. Además, sería conveniente iniciar la gestión de presión con una sectorización de los corregimientos a través de válvulas de seccionamiento, en los que se llevara a cabo un control más exhaustivo de las propiedades hidráulicas del agua, como es la presión del agua. De esta manera, se podría efectuar una gestión de presiones a nivel de sector, teniendo en cuenta los indicadores más influyentes en cada caso.

## Conclusiones

Se ha analizado de forma estadística la relación de dependencia de la presión del agua con la probabilidad de ocurrencia de las roturas a través de indicadores de presión en dos corregimientos de la red de distribución de Ciudad de Panamá, San Francisco y Bethania. Los dos corregimientos se han dividido en tramos de presiones, atendiendo a un suministro estable de agua a través de una técnica de agrupamiento de datos. Se han comparado los indicadores de presión en dos situaciones: cuando se condicionan a las roturas y cuando no, y se ha hecho un análisis de sensibilidad de los parámetros de cálculo del modelo, tiempo de anticipación y ancho de ventana. Así, se ha podido conocer qué indicadores influyen más en la probabilidad de las roturas en los corregimientos analizados.

Se ha concluido que los indicadores del rango de presión, variabilidad de presión y variación de presión son los indicadores más

influyentes en la probabilidad de las roturas en los tramos estudiados debido a que en todos los tramos, el número de hipótesis nulas rechazadas de la prueba de Komogorov-Smirnov (K-S) cuando se compara la función de distribución acumulada (FDA) condicionada a las roturas y 100 FDAs procedentes de series aleatorias supera al 60% de los casos estudiados. Se trata, por tanto, de indicadores que hacen referencia a la dispersión de los datos de presión y a su ritmo de crecimiento. Estos resultados concuerdan con los principios básicos de la gestión de presiones. Aunque el número de hipótesis rechazadas difiere de unos indicadores a otros, las funciones de distribución condicionada a las roturas se suelen comportar en la estadística de una manera similar. Por lo general, el número de hipótesis nulas rechazadas es muy elevado, por lo que se puede concluir que existe gran dependencia entre los indicadores seleccionados y la probabilidad de las roturas.

La metodología sirve de ayuda a los gestores del agua al control de las redes de distribución. Para concluir, se sugiere la implantación de la gestión de presiones que ayude al control de la persistencia de la variación de la presión, con el fin de reducir la probabilidad de las roturas de tubería.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN) de Panamá la provisión de los datos necesarios para realizar este estudio, así como su apoyo tecnológico.

## Referencias

- Alegre, H., Baptista, J. M., Cabrera, E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., & Parena, R. (2006). *Performance Indicators for Water Supply Services*. London: IWA publishing.
- Babovic, V., Drécourt, J. P., Keijzer, M., & Hasen, P. F. (2002). A Data Mining Approach to Modelling of Water Supply Assets. *Urban Water*, 4(4), 401-414.
- Berardi, L., Kapelan, Z., Giustolisi, O., & Savid, D. (2008). Development of Pipe Deterioration Models for Water Distribution Systems Using EPR. *Journal of Hydroinformatics*, 10(2), 113-126.

- Boxal, J. B., O'Hagan, A., Pooladsaz, S., Saul, A., & Unwin, D. (2007). Estimation of Burst Rates in Water Distribution Mains. *Water Management*, 160, 73-82.
- 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.
- Conover, W. J. (1980). *Practical Nonparametric Statistics*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Davies, J. P., Clarke, B. A., Whiter, J. T., & Cunningham, R. J. (2001). Factors Influencing the Structural Deterioration and Collapse of Rigid Sewer Pipes. *Urban Water*, 3(1-2), 73-89.
- Khan, M. S., Coulibaly, P., & Dibike, Y. (2006). Uncertainty Analysis of Statistical Downscaling Methods. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 357-82.
- Lambert, A., & Fantozzi, M. (2010). *Recent Developments in Pressure Management*. IWA Specialized Conference Water Loss 2010, Sao Paulo, Brazil, June 2010.
- Lambert, A., & Thornton, J. (2011). The Relationship Between Pressure And Burst – A 'State-of-the-Art' Update. *Journal of Water Reuse and Desalination Water*, 21,13(2), 37-38.
- Martínez-Codina, Á., Castillo, M., González-Zeas, D., & Garrote, L. (2013). Pressure as Predictor of Pipe Breaks in Water Distribution Networks. In *Proc. 8th International Conference of European Water Resources Association (EWRA)*. Porto.
- Martínez-Codina, Á. (2015a). *Metodología de análisis estadístico de roturas en redes de distribución de agua*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Martínez-Codina, Á., Castillo, M., González-Zeas, D., & Garrote, L. (2015b). Pressure as Predictor of Occurrence of Pipe Breaks in Water Distribution Networks. *Urban Water Journal*, doi: 10.1080/1573062X.2015.1024687.
- Martínez-Codina, Á., Cueto-Felgueroso, L., Castillo, & M., Garrote, L. (2015c). Use of Pressure Management to Reduce the Probability of Pipe Breaks: A Bayesian Approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000519.
- Pelletier, G., Mailhot, A., & Villeneuve, J. P. (2003). Modelling Water Pipe Breaks-Three Case Studies. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(2), 115-123.
- Thornton, J., & Lambert, A. (2005). Progress in Practical Prediction of Pressure: Leakage, Pressure: Burst Frequency and Pressure: Consumption Relationships. *Proceedings of IWA Specialist Conference 'Leakage 2005'*. Halifax.
- Thornton, J., & Lambert, A. (2007). *Pressure Management Extends Infrastructure Life and Reduces Unnecessary Energy Costs*. IWA Specialized Conference Water Loss 2007, Bucarest.
- Xu, Q., Chen, Q., Li, W., & Ma, J. (2011). Pipe Break Prediction Based on Evolutionary Data-Driven Methods with Brief Recorded Data. *Reliability Engineering and System Safety*, 96(8), 942-948.
- Yamijala, S., Guikema, S. D., & Brumbelow, K. (2009). Statistical Models for the Analysis of Water Distribution System Pipe Break Data. *Reliability Engineering and System Safety*, 94(2), 282-293.

## Dirección institucional de los autores

*Dra. Ángela Martínez-Codina*

Canal de Isabel II Gestión  
Subdirección de I+D+i  
Calle Santa Engracia, 125  
28003 Madrid, ESPAÑA  
Teléfono: +34 (91) 5451 000  
angelamartinezcodina@gmail.com

*Dra. Casilda Saavedra*

Universidad Tecnológica de Panamá  
Facultad de Ingeniería Civil  
Cátedra de Gestión Ambiental  
Campus Víctor Levi Sasso  
Vía Centenario, Ancón, Panamá, PANAMÁ  
Teléfono: +507 5603 000  
casilda.saavedra@utp.ac.pa

*Dr. Luis Cueto-Felgueroso*

Universidad Politécnica de Madrid  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos  
Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y  
Medio Ambiente  
Calle Profesor Aranguren  
28040 Madrid, ESPAÑA  
Teléfono: +34 (91) 336 6672  
luis.cueto@upm.es

*Dr. Luis Garrote*

Universidad Politécnica de Madrid  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos  
Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y  
Medio Ambiente  
Calle Profesor Aranguren  
28040 Madrid, ESPAÑA  
Teléfono: +34 (91) 336 6672  
garrote@caminos.upm.es