

Priorización de necesidades de reemplazo de tuberías usando SIG y evaluación multicriterio

• Vivian Verduzco* • Jaime Garatuzza • Salvador Díaz •
Instituto Tecnológico de Sonora, México

*Autor de correspondencia

Resumen

Verduzco, V., Garatuzza, J., & Díaz, S. (enero-febrero, 2015). Priorización de necesidades de reemplazo de tuberías usando SIG y evaluación multicriterio. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 99-120.

El deterioro de infraestructura afecta directamente la eficiencia física del sistema, sin embargo, debido al factor económico es imposible renovar el sistema en su totalidad. Tal situación demanda el establecimiento de prioridades en acciones para el incremento de eficiencias en la red de agua potable. Uno de los principales componentes que afectan la eficiencia física de los sistemas de abastecimiento de agua son las tuberías, las cuales son afectadas por una serie de parámetros que condicionan el comportamiento hidráulico del sistema (edad de la tubería, material, rugosidad, presión, demanda y diámetro, entre otros). La integración del modelo de simulación hidráulica, mediante el sistema *Pipelinenet* basado en *ArcGis*, brinda información en tiempo real acerca de las condiciones y riesgos de la red de agua potable, considerando la componente espacial, la cual condiciona la importancia de cada elemento de la red de acuerdo con su ubicación. Esto facilita un análisis multicriterio, considerando factores endógenos y exógenos de las tuberías, tomados en cuenta por las autoridades participantes en un organismo operador en la tarea de jerarquizar actividades de rehabilitación, reemplazo y crecimiento del sistema. En el presente trabajo se pretende integrar las bondades que ofrecen los sistemas de información geográfica (SIG) en un análisis multiatributo del sistema de distribución de agua potable urbano en Providencia, Sonora, México, y proponer un método de toma de decisiones que apoye la planeación y el control de la red de agua potable.

Palabras clave: modelo hidráulico, planeación, red de agua potable, rehabilitación, toma de decisiones.

Introducción

El deterioro de infraestructura amenaza la calidad del agua proporcionada a los usuarios, además de afectar de manera directa la eficiencia física del sistema. Sin embargo, debido al factor

Abstract

Verduzco, V., Garatuzza, J., & Díaz, S. (January-February, 2015). Prioritization of Needs to Replace Piping Using GIS and Multicriteria Evaluation. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(1), 99-120.

Although the deterioration of infrastructure directly affects the physical efficiency of systems, it is financially impossible to renovate entire systems. This situation requires prioritizing actions to increase the efficiency of potable water networks. One of the primary components affecting the physical efficiency of water supply systems are pipes, which are affected by a series of parameters related to the hydraulic behavior of the system (age of piping, material, roughness, pressure, demand and diameter, among others). The development of a hydraulic simulation model using the *Pipelinenet* system in *ArcGis* provides real-time information about conditions and risks associated with potable water, considering the spatial component, which determines the importance of each element in the network according to its location. This facilitates a multicriteria analysis of factors that are endogenous and exogenous to piping, for consideration by authorities of operations entities in order to prioritize activities to rehabilitate, replace and expand the system. The present work is intended to integrate the advantages of a geographic information system (GIS) into a multi-attribute analysis of the urban potable water distribution system of Providencia, Sonora, Mexico, and to propose a decision-making method to support the planning and control of the potable water network.

Keywords: Hydraulic model, planning, water distribution systems, rehabilitation, decision making.

Recibido: 09/12/13
Aceptado: 11/09/14

económico, es imposible rehabilitar o renovar el sistema en su totalidad (Castelán, 2001; Tortajada, 2006; Yamijala, 2007). Al momento de priorizar necesidades dentro de un sistema de distribución de agua potable es necesario tomar en cuenta factores endógenos y exógenos del

sistema (Alonso-Guzmán, 2010). La evaluación en conjunto de estos factores permitirá jerarquizar actividades de rehabilitación y reemplazo.

La deficiencia en el uso del agua para el servicio urbano y la deficiente gestión en el manejo del recurso han sido identificadas como una problemática internacional (Garduño, 1994). De acuerdo con diversos análisis realizados por la Comisión Nacional del Agua (CNA), en su informe sobre el programa para la modernización de organismos operadores de agua, la eficiencia global promedio en los organismos operadores (OOs) del país es del orden de 36% y es resultado del producto entre la eficiencia física y la comercial, ambas del orden de 52.1% y 69.5%, respectivamente (CNA, 2008). Si se sigue con la inercia de los últimos años, será difícil dotar del servicio de agua permanente a ciudades con elevada tasa de crecimiento y poca eficiencia física en los sistemas, sobre todo porque al subir el nivel de cobertura implicaría incrementar la infraestructura y cantidad de agua suministrada a la red, lo que significaría más desperdicio (CEA, 2004).

El municipio de Cajeme se ubica al sur del estado de Sonora, México (figura 1). Siendo el segundo en importancia dentro de la entidad, cuenta con un organismo operador capaz de abastecer a más de 95% en el área urbana y 93% del área rural (Ayuntamiento de Cajeme, 2000). El deterioro continuo de líneas de agua potable introducidas durante inicios del siglo XX (época de mayor crecimiento económico del municipio), originan que las fugas debido a fisuras y rupturas en las líneas de agua potable representen una problemática constante. La carencia de un plan de reemplazo de tuberías lleva al organismo operador de agua potable, alcantarillado y saneamiento de Cajeme (OOMAPASC) a actuar de manera improvisada ante la presencia de fallas en las redes de distribución, lo que comúnmente conlleva altos costos y pocos beneficios en el sistema.

Hacer frente a esta severa situación es un gran desafío para la sociedad y sobre todo

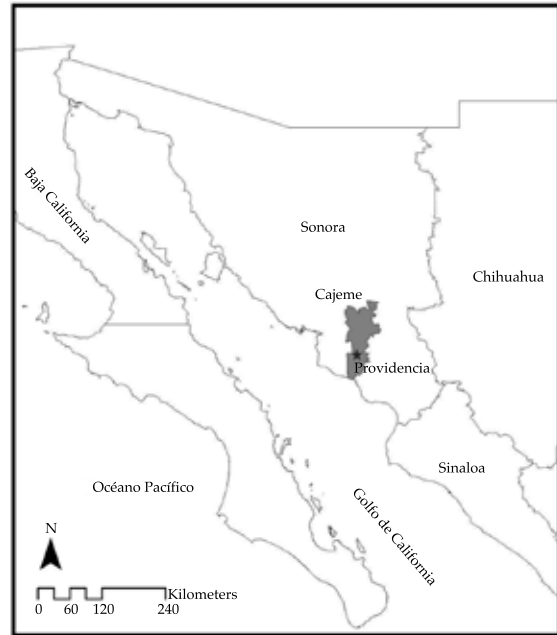


Figura 1. Localización de Providencia, Sonora, México.

para los planificadores y administradores del abastecimiento de agua potable. Esto conlleva el desarrollo de nuevas formas de abordar el problema, ampliar el uso de nuevas tecnologías y mejorar la comunicación entre los implicados en la toma de decisiones, lo que se ha convertido en una labor cada vez más necesaria (Kallis & Coccossis, 2001). Bajo este panorama, en este artículo se propone una metodología que apoya la planeación y toma de decisiones, al establecer prioridades de rehabilitación en el sistema de agua potable. Esta metodología se basa en la evaluación multicriterio de los factores endógenos y exógenos de una red de distribución, que intervienen en la priorización de necesidades de rehabilitación mediante su cálculo en un modelo de simulación hidráulica y su consideración dentro de un SIG.

Material y métodos

Para llevar a cabo el estudio se siguió una serie de procedimientos con el fin de facilitar la toma de decisiones sobre acciones de rehabilitación en un sistema de distribución de agua potable,

tomando como caso de estudio el sistema actual de Providencia, Sonora, la cual es una población situada en el municipio de Cajeme (figura 1). El objetivo de la descripción de la metodología es resaltar cómo, a través del uso de los sistemas de información geográfica (SIG), se puede mejorar la planeación de acciones en un sistema de distribución de agua potable.

Toma de decisiones

La toma de decisiones se ha convertido actualmente en una ciencia matemática que formaliza el razonamiento y pensamiento humano usado para elegir una solución a un problema. De acuerdo con el proceso general propuesto por Eastman (2006), el primer paso que se debe abordar para la toma de decisiones es establecer el objetivo para tomar la decisión. Con base en la fundamentación planteada, se determinó que el objetivo en este trabajo es: “Priorizar y seleccionar las tuberías con mayor necesidad de rehabilitación en el sistema de distribución de agua potable de Providencia,

Sonora”. La figura 2 presenta la metodología propuesta para la toma de decisiones que se aplicó para las condiciones reales la red de distribución del caso en estudio.

Identificación y establecimiento de factores de decisión

El análisis del funcionamiento de la red de agua potable permite identificar los factores endógenos y exógenos que describen el deterioro de las tuberías y la manifestación del envejecimiento (Alonso-Guzmán, 2010; Alonso-Guzmán, Pérez-García, Izquierdo-Sebastian, & Herrera-Fernández, 2013). Se realizó un análisis de información para establecer los criterios de selección, en los cuales se consideraron elementos o evidencias cuantificables que pueden ser utilizados para la toma de decisión de acuerdo con el objetivo planteado anteriormente.

De acuerdo con la experiencia del organismo operador, se establecieron los factores de decisión que influyen en la priorización de la rehabilitación de infraestructura. De esta manera

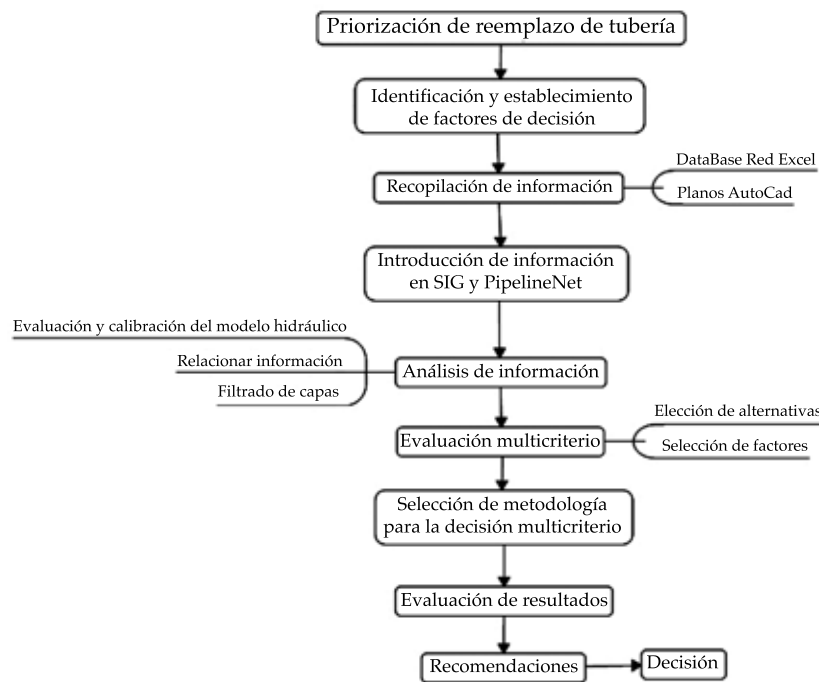


Figura 2. Pasos en la toma de decisiones adaptado de Morais y Almeida (2006).

se propuso una selección fundamentada en la identificación de aquellos criterios ya no sólo técnicos tradicionales, sino además espaciales, económicos y sociales fundamentales a la hora de seleccionar la tubería para su reemplazo. Ello implica la consideración de factores endógenos y exógenos que puedan proporcionar información relativa a la problemática y estado de la red de distribución. Para dar cumplimiento al objetivo planteado y de acuerdo con la información disponible para el caso en estudio, se establecieron los factores presentados en la figura 3.

Los factores tomados en cuenta y el criterio aplicado para establecer los estados de prioridad se muestran en el cuadro 1.

El índice de fugas fue calculado de acuerdo con reportes del OOMAPASC, considerando el número de fugas para cada tubería entre la longitud de la tubería para los años de historial de fugas:

$$IF = \text{núm. de fugas} / \text{longitud} / \text{años}$$

Para el número de años se tomaron en cuenta años con información de reportes de fugas por parte del OOMAPASC. También se consideró si la tubería había sido reemplazada recientemente y se tomó el año de reemplazo como el primero de información, así se evita

estimar un índice alto para una tubería que presentó un gran número de fugas en el pasado, pero que ya ha sido reemplazada.

Por su parte, el índice de significancia es un índice propuesto por Arulraj y Rao (1995), el cual se calcula para cada tubería de la siguiente manera:

$$SI = LQ / (CD)$$

Donde L = longitud de la tubería (m); Q = descarga de la tubería (m^3/s); D = diámetro de la tubería (m); C = coeficiente de Hazen-William. A partir de este índice se calculó la importancia relativa de cada una de las tuberías de la red.

Recopilación de información necesaria para la toma de decisiones

Localización y características de la zona de estudio

El proyecto está ubicado en el poblado de Providencia, municipio de Cajeme, estado de Sonora, México. Providencia tiene 4 510 habitantes y se encuentra en la longitud $109^{\circ} 59' 36''$ y latitud $27^{\circ} 30' 37''$, a un promedio de 30 metros de altitud (INEGI, 2005). Limita al este por la cabecera municipal, que es Ciudad Obregón.

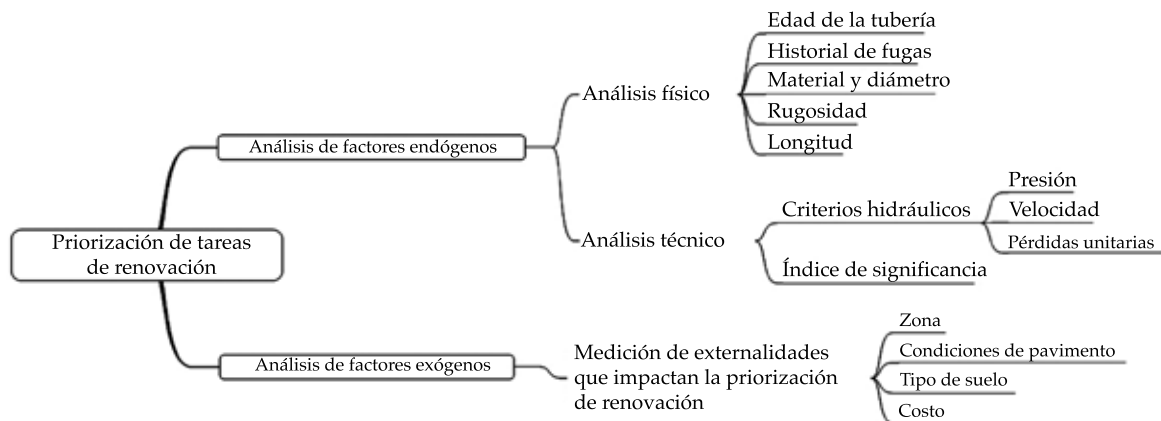


Figura 3. Clasificación de factores que influyen la priorización de tareas de renovación.

Cuadro 1. Listado de factores o atributos en el sistema de distribución.

Factor, F	Factores de decisión	Criterio
F1	Zona	Zonas vulnerables, es decir, áreas cercanas a hospitales, albergues, escuelas, centros deportivos, zona comercial, etc., con mayor importancia de rehabilitación.
F2	Material y diámetro	Orden en relación con material y diámetro de la tubería. Según bibliografía revisada, un diámetro más pequeño representa más riesgo de fallo. Importancia de acuerdo con si es línea de distribución principal o línea de distribución secundaria.
F3	Coefficiente de rugosidad	Para la creación del modelo se utilizan valores predeterminados de tablas de fabricante. Después, estos coeficientes son determinados y tomados de la calibración del modelo. El criterio será adjudicar mayor prioridad a un coeficiente de rugosidad alto. Se establecieron rangos de valores para cada material.
F4	Zona pavimentada	De acuerdo con criterio del OO, se aplica prioridad a la zona en relación con este factor, ya que impacta de manera directa en el costo de reparación.
F5	Índice de fugas	Líneas con un alto índice de fugas, calculado a partir de reportes y experiencia de los supervisores (ver ecuación (1)). Mayor índice conlleva a una mayor prioridad de reemplazo (Bourguett, 2001).
F6	Importancia	De acuerdo con el índice de significancia (ver ecuación (2)). A mayor índice de significancia, mayor importancia en el sistema (Arulraj & Rao, 1995).
F7	Precio de reparación	Con base en el valor promedio unitario para la reparación de cada tipo de tubería.
F8	Longitud	A partir de información de la red. Criterio establecido por medio de análisis bibliográfico, a mayor longitud, mayor riesgo de fuga.
F9	Velocidad	Las tuberías deben tener una velocidad máxima de 5.0 m/s y mínima de 0.3 m/s (CNA, 2009).
F10	Pérdidas de carga unitarias	Las pérdidas de carga por fricción entre tramos no deberán sobrepasar los 5 m/km (CNA, 2009). Mayor que 5 m/km representa baja eficiencia, por lo tanto mal funcionamiento.
F11	Presión	Las presiones deben estar comprendidas entre 1.5 y 5 kg/cm ² . Para localidades urbanas pequeñas se puede admitir una presión mínima de 1.0 kg/cm ² (CNA, 2009). De acuerdo con bibliografía revisada, mayor presión representa mayor riesgo de fallo.
F12	Antigüedad	Para redes de distribución primaria se considera de 20 a 40 años de vida útil. Para redes de distribución secundaria, se considera de 15 a 30 años (CNA, 2009). Tuberías antiguas representan mayor riesgo.

La recopilación e integración de información constituyó una parte fundamental de la metodología planteada. El cuadro 2 presenta la información que se recopiló y el paquete computacional en el cual se encontraba al ser incorporada al SIG.

Integración y análisis de información en el SIG

Se integró información concerniente al área de estudio. La metodología empleada para montaje de la información fue la siguiente:

Cuadro 2. Información integrada y analizada en el SIG.

Formato original	Información
Planos AutoCad	Diámetros de tuberías
	Conexiones de tuberías
	Trazo y ubicación de tuberías
	Curvas de nivel
	Lotificación
	Ubicación de tomas nuevas
	Información catastral
Base de datos Excel	ID
	Localización
	Antigüedad de la tubería
	Diámetro
	Material
	Rugosidad
	Índice de significancia
	Flujo
	Fugas
	Precio unitario
	Nudos

1. Montaje físico, transferencia de los planos existentes de la red de agua de un formato de AutoCAD al sistema de Información geográfica (SIG) usando *Arcview*.
2. Se integró al SIG la información en planos AutoCAD sobre las líneas e información del poblado, como lotificación, manzanas, ubicación de la tubería, etc. Para esto fue necesario realizar una inspección detallada sobre la información contenida en cada capa ("layer") de AutoCAD, verificando que cada elemento del plano cuente con su identificador y capa ("layer") correspondiente.
3. Una vez contenida la información, se hizo el filtrado de información en cada capa. Se extrajo la información a utilizarse en "shapes" de acuerdo con sus atributos (ver cuadro 3). En el cuadro 4 se especifica la información obtenida de archivos del municipio.

Los datos de ID de la tubería, localización, antigüedad, longitud, diámetro, material, ru-

gosidad, índice de significancia, fugas, precio unitario y nudos previamente colocados en una base de datos (*MS-Excel*) fueron insertados en el SIG. Esto se realizó una vez clasificada la información contenida en el archivo SIG, es decir, asignando ID a cada una de los datos (tuberías, nudos y demás elementos) en el SIG para poder después correlacionarlos con los datos recopilados en la base de datos *MS-Excel*, ligando la información con el comando "Join".

Pipelinenet

Una vez recopilados los datos de la red de distribución se procedió a armar y calibrar un modelo de simulación del comportamiento hidráulico de la red de agua potable por medio de *Pipelinenet*. *Pipelinenet* es un sistema basado en *ArcGIS* que permite la modelación hidráulica y de calidad de agua. A continuación se describen los pasos realizados en el análisis, evaluación y calibración del modelo hidráulico en *Pipelinenet*.

Cuadro 3. Campos formados a partir de la información contenida en el plano AutoCAD.

Nombre de la capa	Tipo	Información
TuberíasProv	Polyline	Localización de las tuberías que conforman el sistema de distribución de AP de acuerdo con datos de campo e información proporcionada por el OO.
NudosProv	Point	Localización de los nudos en el sistema de distribución por datos de campo e información proporcionada por el OO.
Lotificación actual	Polyline	Lotes de la comunidad. Información obtenida de plano AutoCAD de restitución fotográfica de Providencia. Departamento de Catastro del municipio.
Curvas de nivel	Polyline	Líneas de elevación del terreno natural con base en información obtenida del archivo de catastro del municipio.
Tomas nuevas	Point	Tomas dadas de alta en el periodo 2006-2010 obtenida por información del organismo operador de agua potable (OOMAPASC).
Zonas vulnerables	Polygon	Áreas de hospitales, albergues, escuelas, centros deportivos, parques, zona comercial, etc. (información obtenida en campo y archivo de catastro del municipio).

Cuadro 4. Campos formados a partir de información del Departamento de Catastro, municipio de Cajeme.

Nombre de la capa	Tipo	Información
Colonias	Polygon	Área de localización de las colonias que integran la comunidad.
Manzanas	Polygon	Delimitación y localización de las manzanas del poblado.
Calles Providencia	Polyline	Localización, longitud y condiciones de pavimento de las calles y vialidades del poblado de acuerdo con información del archivo de catastro del municipio e información obtenida en campo.
OBR106,OBR107,OBR108, OBR95,OBR96,OBR97, OBR84,OBR85,OBRE86.tif	“raster”	Imágenes fotográficas en formato *.tif de muy buena calidad georreferenciadas en archivos *.tfw.

Modelo de simulación hidráulica

Análisis

El modelo hidráulico en *Pipelinet* fue alimentado con información proveniente del organismo operador e información obtenida en campo, como por ejemplo, diámetro, material y edad de las tuberías, rugosidad, topografía del terreno, localización de bomba, gasto proporcionado por la bomba, altura de bombeo, funcionamiento de la red y tanque.

El modelo de simulación hidráulica se realizó bajo el régimen de simulación estático y dinámico. La ecuación empleada para la pérdida de carga fue Darcy-Weisbach.

Calibración

El tipo de calibración fue por escenarios. La calibración del modelo se realizó básicamente mediante la comparación y el análisis de los datos de campo, los cuales se obtuvieron del montaje de un sistema de medición para obtener datos de presión en 23 puntos de la red de distribución durante dos periodos de tiempo (hora pico en la mañana y en la tarde) por dos días, contra los predichos por el modelo. La ubicación de los puntos de calibración se muestra en la figura 4 y sus coordenadas se presentan en el cuadro 5. Este es un proceso iterativo, en el cual se hicieron sucesivos y razonables ajustes al modelo, de modo que

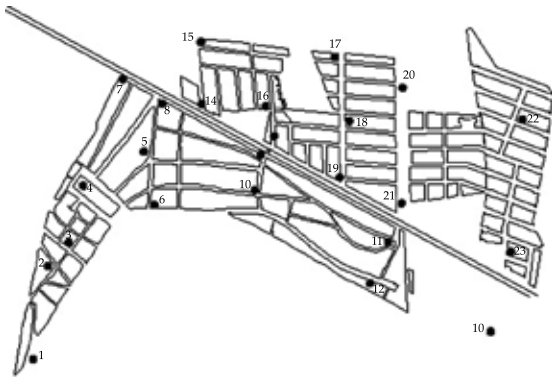


Figura 4. Localización en coordenadas de los puntos de calibración.

éste responda a la realidad, con el grado de exactitud esperado. Los parámetros que se modificaron dentro de la red de *Pipelinenet* para la calibración del modelo fueron: 1) los escenarios de consumo (variación de caudales asignados a nudos), suponiendo posibles fugas por el deterioro de la red; 2) los valores de rugosidad, suponiendo incrustaciones de minerales que pueden llegar a reducir el diámetro interno de la tubería; 3) capacidades de bombeo, suponiendo una baja eficiencia en la bomba. El modelo fue calibrado hasta que los resultados fueron satisfactorios de acuerdo con lo recomendado por la CNA (2009).

Mediante la instalación de cinco sensores de presión manométrica con *data-loggers* en cinco puntos del poblado se obtuvo el registro de la variación de presiones en la red durante el día. Se monitorearon de lunes a domingo durante una semana. Las coordenadas de ubicación de los *data-loggers* se presentan en el cuadro 6. Estos datos se utilizaron para la calibración del modelo dinámico.

Curva de demanda

Para el análisis del modelo en modo dinámico se utilizó la información referente a variación del gasto horario para poblaciones pequeñas de la CNA (2007). La figura 5 muestra los valores de variaciones de consumo promedio, expresados como porcentajes horarios del gasto máximo diario.

Pipelinenet fue utilizado para integrar la curva de demanda, de esta manera se corrió el modelo de simulación hidráulica con variación horaria.

Resultados del modelo

Con los resultados del modelo calibrado se obtuvo información referente al comportamiento operacional del sistema, como presiones en la red de distribución, pérdida unitaria en líneas,

Cuadro 5 Localización en coordenadas de los puntos de calibración.

Punto	Coordenadas		Punto	Coordenadas	
	N	W		N	W
1	27° 30' 42.1"	109° 59' 79.0"	13	27° 30' 29.8"	109° 58' 56.2"
2	27° 30' 57.0"	109° 59' 74.0"	14	27° 30' 80.4"	109° 59' 44.7"
3	27° 30' 60.6"	109° 59' 69.5"	15	27° 30' 89.7"	109° 59' 39.3"
4	27° 30' 66.4"	109° 59' 69.0"	16	27° 30' 86.5"	109° 59' 36.4"
5	27° 30' 64.8"	109° 59' 57.6"	17	27° 30' 89.2"	109° 59' 22.1"
6	27° 30' 75.8"	109° 59' 57.1"	18	27° 30' 81.5"	109° 59' 20.2"
7	27° 30' 87.8"	109° 59' 63.1"	19	27° 30' 70.4"	109° 59' 20.9"
8	27° 30' 82.5"	109° 59' 55.1"	20	27° 30' 82.7"	109° 59' 10.8"
9	27° 30' 72.3"	109° 59' 38.6"	21	27° 30' 69.4"	109° 59' 11.1"
10	27° 30' 68.2"	109° 59' 39.4"	22	27° 30' 74.7"	109° 58' 91.8"
11	27° 30' 60.2"	109° 59' 11.3"	23	27° 30' 59.6"	109° 58' 89.2"
12	27° 30' 54.0"	109° 59' 15.8"			

Cuadro 6. Coordenadas de puntos de toma de presiones para calibración.

Punto	Norte	Oeste
1	27° 30.808'	109° 59.447'
2	27° 30.836'	109° 59.610'
3	27° 30.757'	109° 59.510'
4	27° 30.641'	109° 59.739'
5	27° 30.890'	109° 59.211'

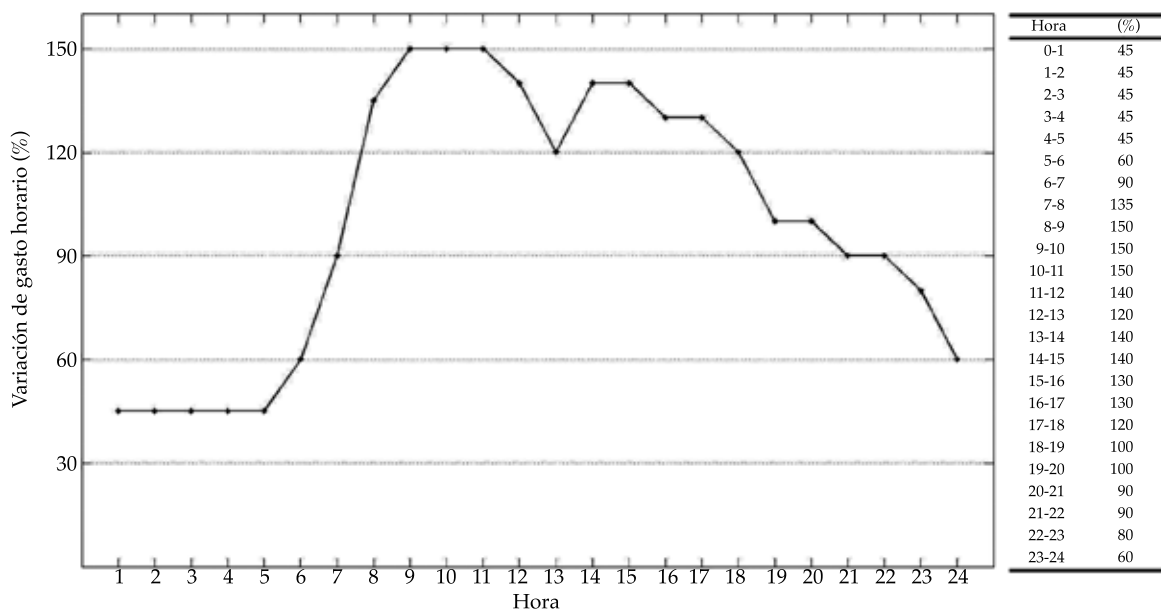


Figura 5. Curva de demanda (CNA, 2007).

gasto que conduce la red, velocidad en cada tubería, coeficiente de rugosidad (calibrado) e índice de fugas estimado en cada línea, entre otros.

La corrida del modelo hidráulico en SIG por medio de *Pipelinenet* clasifica de forma automática los resultados, dividiéndolos en subcapas de acuerdo con el cuadro 7.

Evaluación multicriterio

Teniendo dentro del sistema de información geográfica la información necesaria, se procedió a su análisis. La evaluación multicriterio maneja problemas de toma de decisiones, considerando varios criterios para establecer

prioridades entre las opciones que se presentan al tomar una decisión (Zeleny & Cochrane, 1982). La propuesta metodológica está basada de modo fundamental en la aplicación de criterios de selección, en función de parámetros, como son la cercanía a elementos de interés o la caracterización operacional de las líneas (tuberías) y de cada punto (nodo); todo ello desde el análisis de información asociada con cada elemento de estudio.

Primero se definió qué opciones de análisis de información pueden realizarse de acuerdo con prioridades establecidas. Para tomar una decisión acerca de cuál línea tiene prioridad alta o baja de rehabilitación, se establecieron tres opciones de evaluación con base en el

Cuadro 7. Información manejable y presentada mediante *Pipelinenet*.

Nombre del campo	Descripción	Parámetros
Junctions Reservoirs Tanks	Node	Elevación
		Demanda base
		Calidad inicial
		Demanda
		Altura
		Presión
Pipes Pumps Valves	Links	Calidad
		Longitud
		Diámetro
		Rugosidad
		Bulkcoeff
		Walkcoeff
		Estado inicial
		Gasto
		Factor de fricción
		Pérdida de carga unitaria
		Tasa de reacción
		Velocidad
Calidad		

establecimiento de prioridades entre los factores, de acuerdo con el criterio y las necesidades del organismo. Los factores de peso de cada variable de decisión quedan a consideración de la dirección y los técnicos del organismo operador de agua potable.

Opciones de evaluación

Los escenarios de evaluación propuestos conllevan la integración de distintos factores de decisión en su análisis, mostradas posteriormente, y son los siguientes:

- Probabilidad de fallo.
- Condiciones operacionales.
- Costo.

Como se verá más adelante, estos criterios son de difícil aplicación mediante métodos tradicionales, siendo relativamente sencillos de establecer utilizando las capacidades de los SIG.

Selección heurística de factores

Teniendo una base de información recopilada y analizada se seleccionaron aquellos criterios que influyen en la priorización de acuerdo con la alternativa de ponderación. El SIG utilizado permite construir filtros sobre los datos espaciales, con el fin de prescindir de la información que no se requiera visualizar. Los criterios tomados en cuenta para cada variable de decisión se presentan en el cuadro 8.

Para analizar la información dentro del SIG fue necesario primero establecer una reclasificación del formato "raster" formado para cada variable de decisión en cada una de las alternativas de evaluación propuestas. Como ya se mencionó antes, el peso adjudicado en la reclasificación para cada atributo se asignó de acuerdo con la experiencia, bien sea adquirida con el paso de los años o por conocimientos de casos similares en otras compañías de los gestores de la red de agua potable del municipio.

Cuadro 8. Criterios de jerarquía según el atributo.

Factor, F	Factores de decisión	Criterio
F1	Zona	Zonas vulnerables, es decir, áreas cercanas a hospitales, albergues, escuelas, centros deportivos, zona comercial, etc., con mayor importancia de rehabilitación.
F2	Material y diámetro	Orden en relación con el material y diámetro de la tubería. Según bibliografía revisada*, un diámetro más pequeño representa más riesgo de fallo. Importancia de acuerdo si es línea de distribución principal o línea de distribución secundaria.
F3	Rugosidad	El criterio será adjudicar mayor prioridad a un coeficiente de rugosidad alto. Estos coeficientes de rugosidad absoluta son determinados y tomados de la calibración del modelo. Sus unidades son en milímetros (mm).
F4	Zona pavimentada	De acuerdo con el criterio del OO, se aplica prioridad a la zona en relación con este factor, ya que impacta de manera directa en el costo de reparación.
F5	Índice de fugas	Líneas con un alto índice de fugas calculado con reportes y experiencia de los supervisores conlleva una mayor prioridad.
F6	Importancia	De acuerdo con el índice de significancia. A mayor índice de significancia, mayor importancia en el sistema.
F7	Precio de reparación	De acuerdo con el valor promedio unitario para la reparación de cada tipo de tubería.
F8	Longitud	Con base en información de la red. Criterio establecido por análisis bibliográfico, a mayor longitud, mayor riesgo de fuga.
F9	Velocidad	Las tuberías deben tener una velocidad máxima de 5.0 m/s y mínima de 0.3 m/s (CNA).
F10	Pérdidas de carga unitarias	Las pérdidas de carga por fricción entre tramos no deberán sobrepasar los 5 m/km (CNA). Mayor que 5 m/km representa baja eficiencia, por lo tanto mal funcionamiento.
F11	Presión	Las presiones deben estar comprendidas entre 1.5 y 5 kg/cm ² . Para localidades urbanas pequeñas se puede admitir una presión mínima de 1.0 kg/cm ² (CNA). De acuerdo con bibliografía revisada, mayor presión representa mayor riesgo de fallo.
F12	Antigüedad	Para redes de distribución primaria se considera de 20 a 40 años de vida útil. Para redes de distribución secundaria se considera de 15 a 30 años (CNA). Tuberías antiguas representan mayor riesgo.

Utilizando las herramientas que ofrece el sistema de información geográfica se aplicaron distintos operadores según las necesidades de información de acuerdo con las alternativas de análisis-ponderación. La herramienta utilizada fue la calculadora "raster", con la cual se utilizó el método de evaluación multicriterio "Combinación lineal ponderada" o WLC (por sus siglas en inglés, Weighted Linear Combination). Este procedimiento permite retener la variabilidad de los factores de decisión continuos, al mismo tiempo que ofrece la habilidad de la combinación e intercambio entre los factores. Además permite

una ponderación asignada a los factores de decisión que indican la relativa importancia de cada variable. Este análisis ofrece un panorama alejado de los extremos del riesgo; en cambio posiciona el análisis en un riesgo medio y permite la combinación total entre factores (Eastman, 2006) (ver figura 6).

Como se muestra en la figura 6, en el método de evaluación multicriterio WLC, el riesgo de la decisión es intermedio cuando la combinación de factores es máxima (máxima combinación de criterios). Esto se debe a que este tipo de evaluación permite ponderar la relativa importancia de los factores de decisión, facilitan-

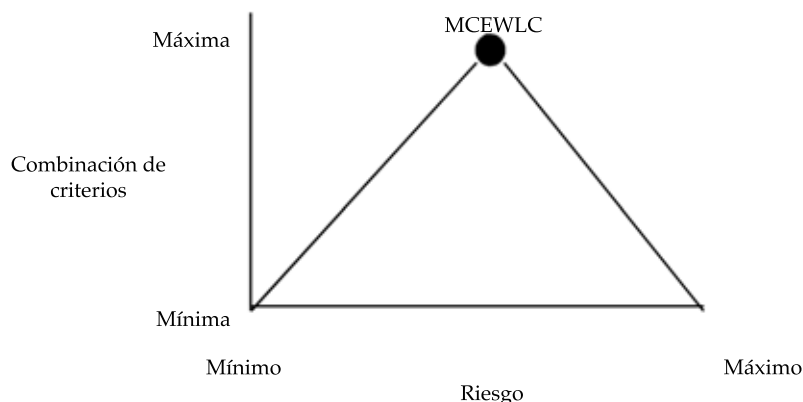


Figura 6. Intercambio de criterios versus Riesgo (adaptada de Eastman, 2006). Evaluación multicriterio con combinación lineal ponderada (Multicriteria Evaluation with Weighted Linear Combination, MCEWLC).

do la inclusión máxima de factores de decisión y así obtener una puntuación total alejada de los extremos de riesgo para cada alternativa.

La evaluación para cada uno de los escenarios fue:

$$\text{Prioridad de rehabilitación} = \frac{\sum \text{Factores de decisión}}{\text{Número de factores}}$$

Donde el numerador representa la suma de los valores obtenidos de acuerdo con la escala presentada en el cuadro 10 para cada uno de los factores de decisión considerados en la alternativa de evaluación. El denominador representa el número de factores de decisión incluidos en la alternativa de evaluación. A continuación se muestran las alternativas de evaluación planteadas y los factores de decisión tomados en cuenta para cada una de ellas.

- *Alternativa de evaluación 1. Probabilidad de fallo*

La probabilidad de fallo de una tubería puede ser consecuencia del deterioro estructural de ésta, lo que disminuye su elasticidad/resistencia estructural y su habilidad para soportar los distintos tipos de esfuerzos aplicados sobre ella. El deterioro también puede ser de la superficie interna de la tubería, lo que resulta

en una disminución directa de la capacidad hidráulica, degradación de la calidad del agua y algunas veces afecta la capacidad estructural en casos de corrosión extrema.

Para determinar la prioridad de reemplazo de una tubería y que a la vez esta priorización demuestre una opción efectiva con respecto al costo, es crítico reemplazar tuberías con alta probabilidad de fallo. Mientras que la mayoría de las tuberías nuevas de PVC (polyvinyl chloride) y PE (polyethylene) tienen poca probabilidad de falla, la tarea de encontrar tuberías con mayor probabilidad de falla es más complicada, pues intervienen varios factores.

Datos geográficos, como tipo de suelo, características de carga (desarrollo demográfico, tráfico vehicular), historial de prácticas de instalación, fluctuaciones de agua subterránea, también pueden ayudar a explicar la incidencia y variaciones de probabilidad de fallo (Kleiner, Rajani, & Wang, 2007).

De acuerdo con lo anteriormente planteado, a la bibliografía revisada y a la información disponible, el análisis para determinar las tuberías con mayor probabilidad de falla se basó en la siguiente información:

Factores de decisión: antigüedad, índice de fugas, presión, longitud, coeficiente de rugosidad, zona, precio de reparación.

Cuadro 9. Resumen de características de las tuberías del sistema de distribución en Providencia, Sonora.

Característica		Núm. de tuberías	Longitud (m)	% longitud
Diámetro	<= 75 mm	70	8 389.1	58.3
	100 mm	25	2 176.2	15.1
	150 mm	39	3 395.8	23.6
	200 mm	4	428.0	3.0
	Total	138	14 389.2	100.0
Edad	<=5	45	5 816.3	40.4
	5 a 10	58	5 483.8	38.1
	15	8	947.6	6.6
	20	4	178.4	1.2
	30	23	1 963.1	13.6
	Total	138	14 389.2	100.0
Material	PVC	131	13 868.6	96.4
	AC	7	520.6	3.6
	Total	138	14 389.2	100.00
Comunidad	Providencia	82	9 565.67	66.48
	Severo Girón	44	4 118.4	28.62
	A. López Nogales	12	705.1	4.90
	Total	138	14 389.2	100.00

- *Alternativa de evaluación 2. Condiciones operacionales*

El comportamiento hidráulico proporciona un indicador fiable de la capacidad hidráulica de la red de distribución cuando las tuberías están alcanzando su capacidad hidráulica máxima para proporcionar los gastos necesarios.

De acuerdo con lo anterior y con la información disponible en el organismo operador, el análisis para determinar las tuberías con mayor necesidad de cambio en relación con su capacidad hidráulica se basó en la siguiente información:

Factores de decisión: pérdidas de carga unitarias, velocidad, coeficiente de rugosidad, índice de significancia, zona.

- *Alternativa de evaluación 3. Costo*

Mientras la tubería se deteriora con los años de uso, la resistencia de la tubería se reduce, incrementando su vulnerabilidad a las cargas y representando mayor riesgo de falla. Los

costos de reparación y consecuencias de falla de cada línea son diferentes. En el cálculo de qué falla representa mayor costo para el organismo operador intervienen varios factores. El costo de reparación será mayor en tuberías de mayor diámetro y los costos de las consecuencias variarán de acuerdo con la localización de la tubería. Se puede esperar que las consecuencias sean mayores para zonas vulnerables (áreas cercanas a edificios públicos, hospitales, comercios, etc.), así como también para tuberías difíciles de sectorizar, es decir, con mayor cantidad de usuarios dejados sin servicio tras una falla o durante una reparación, pues la interrupción en el servicio acarrea inconformidad y mayores costos a los usuarios, lo que se reflejará en quejas al organismo operador.

El costo de la reparación puede variar de acuerdo con la ubicación de la línea también. La reparación de una línea en una calle recién pavimentada representa maltrato al pavimento nuevo y, por lo tanto, pérdida de dinero e inconformidad por parte de los usuarios.

Con base en lo anterior y a la información disponible, el análisis para determinar las tuberías con mayor necesidad de cambio con respecto a su costo-beneficio se basó en la siguiente información.

Factores de decisión: antigüedad, presión, índice de fugas, zona, condiciones de pavimento, precio de reparación.

Selección de metodología para la decisión multicriterio

Una vez establecida la reclasificación mostrada en el cuadro 10 para los factores de decisión mencionadas para cada alternativa de evaluación, se procedió a utilizar la calculadora "raster" con la función de promedio lineal ponderado. En este caso, el valor de cada uno de los factores se consideró con la misma ponderación. La función de prioridad de rehabilitación (PR) se definió de la siguiente manera:

Alternativa de evaluación 1

$$PR = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{antigüedad} + \text{índice de fugas} + \text{presión} \\ + \text{longitud} + \text{rugosidad} + \text{zona} \\ + \text{precio de reparación} \end{array} \right)}{7}$$

Alternativa de evaluación 2

$$PR = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{pérdidas unitarias} + \text{velocidad} \\ + \text{rugosidad} + \text{zona} + \text{precio de reparación} \end{array} \right)}{5}$$

Alternativa de evaluación 3

$$PR = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{antigüedad} + \text{índice de fugas} + \text{presión} \\ + \text{zona} + \text{condiciones de pavimento} \\ + \text{precio de reparación} \end{array} \right)}{6}$$

Donde las tuberías con mayor valor de prioridad de rehabilitación para cada escenario visualizado en *ArcGis* son las primeras en la lista para su rehabilitación; es decir, se realizó una clasificación de las mismas de acuerdo con los valores obtenidos del cálculo "raster". Con el resultado se realizó una última reclasificación para establecer cuáles valores resultantes del cálculo se establecen como con prioridad alta, media o baja.

Por último, se realizó la conversión de la capa "raster" resultante a formato vector, con lo que se puede realizar una selección de las tuberías en relación con el resultado "raster". Para esto se utilizó la interfaz de cuestionamiento (QUERY, seleccionar por localización) que ofrecen los SIG. Esta herramienta permite al usuario visualizar y reducir su búsqueda de acuerdo con los parámetros indicados por él mismo para establecer las tuberías candidatas a reemplazo y visualizarlas en una lista. Teniendo la lista de las tuberías con mayor prioridad de reemplazo se ordenaron con base en algún atributo de interés para los gestores de la red de agua potable ejemplo: costo.

- *Alternativa de evaluación 4. Factores internos*

De acuerdo con la información operacional existente sobre la red de agua potable se realizó una nueva priorización, que incluye únicamente los factores de decisión que impactan en el comportamiento hidráulico. Esto, con el objetivo de organizar prioritariamente los grupos de tuberías que presentan deficiencias hidráulicas e impactan de manera directa en la eficiencia física del sistema.

Factores de decisión: pérdidas de carga unitarias, velocidad, coeficiente de rugosidad, índice de significancia.

La evaluación de la función se realizó de manera similar a las anteriores opciones de evaluación. Una vez obtenidos los resultados, se realizaron los cambios en el modelo de simulación hidráulica *Pipelinenet* para régimen dinámico en la hora más crítica del día (hora pico: 8 a.m.), de las tuberías marcadas como

Cuadro 10. Reclasificación de factores de decisión formato "raster".

Factor/F	Factores de decisión	Reclasificación	Criterio (prioridad)
F1	Vulnerabilidad de la zona	10	Zonas a menos de 50 m de un punto vulnerable.
		5	Zonas entre 51 y 100 metros.
		3	Zonas que se encuentran entre 100 y 150 metros.
		2	Zonas que se encuentran entre 150 y 250 metros.
		1	Zonas que se encuentran a más de 250 metros.
F2	Material y diámetro	10	Diámetro menor igual que 3 pulgadas
		5	Diámetro mayor que 3 pulgadas y menor que 6
		9	Diámetro mayor que 6 pulgadas
F3	Rugosidad (mm)	10	Mayor que 5 mm
		9	De 3 a 5 mm
		5	De 1 a 3 mm
		3	De 0.025 a 1 mm
		1	De 0.0015 a 0.025 mm
F4	Zona pavimentada	10	Sin pavimento (0)
		9	Pavimento antiguo 2 (3)
		5	Pavimento antiguo (2)
		2	Pavimento nuevo (1)
		1	Fuera de calle (1)
F5	Índice de fugas	10	Más de 20 reportes
		8	Entre 10 y 20 reportes
		5	Entre 5 y 10 reportes
		3	Entre 1 y 5 reportes
		1	Sin reportes
F6	Importancia	10	Índice de significancia mayor que la media
		5	Índice de significancia menor que la media
F7	Precio de reparación	10	Menor que \$130 000.00
		8	Entre \$130 000.00 y \$260 000.00
		6	Entre \$260 000.00 y \$380 000.00
		4	Entre \$380 000 y \$500 000
		2	Mayor que \$500 000.00
F8	Longitud	1 a 10	De 1 a 1 000 m de longitud
F9	Velocidad	10	Velocidad mayor que 5.0 m/s y menor que 0.3 m/s
		1	Velocidad dentro de rango
F10	Pérdidas de carga unitarias	10	Las pérdidas de carga por fricción entre tramos que sobrepasen los 5 m/km (CNA)
		1	Pérdidas dentro de rango
F11	Presión	10	Depende del tipo de análisis
F12	Antigüedad	10	Mayor que 30 años de vida útil
		8	De 15 a 30 años de vida útil
		3	De 10 a 15 años de vida útil
		2	De 5 a 10 años de vida útil
		1	De 0 a 5 años de vida útil

con alta prioridad de rehabilitación para este escenario según la evaluación.

Hechos los cambios, se comparó el estado de funcionamiento hidráulico del sistema anterior y con modificaciones. Para esto se basó en los factores considerados más significativos para este propósito, como son la velocidad, presión y pérdidas de carga unitarias.

Resultados y discusión

Según la metodología presentada, se obtuvo y analizó la información disponible de la red de distribución de agua potable de Providencia, Sonora. Para la evaluación multicriterio dentro del SIG fue necesario primero la recopilación de datos y la realización del modelo hidráulico de la red de Providencia. Este apartado merece especial cuidado, pues la calidad de las decisiones tomadas depende en gran parte de la calidad de los datos ingresados.

El sistema de distribución de Providencia está localizado en un área de aproximadamente 150 ha, incluye 107 nudos, con un gasto promedio suministrado a la red de 28.9 lps, 138 tuberías, dos fuentes de abastecimiento (principal y secundaria) y un tanque. El sistema opera con una sola fuente de abastecimiento a la vez, dependiendo de la disponibilidad y condiciones de la fuente. La entrega de agua desde la fuente de abastecimiento principal es a la red y al tanque. El resumen de la información de la red de distribución se presenta en el cuadro 9.

El cuadro 12 muestra el resumen de los resultados del modelo dinámico analizado a una hora pico (8 a.m.).

Se reclasificaron los factores de decisión en formato "raster" dentro de *ArcGis*, a partir del criterio de prioridad asignado por los administradores del sistema de distribución (ver el cuadro 10). Los valores cercanos a 0 son dados a aquellos atributos que tienen menor prioridad de rehabilitación y el valor 10 fue determinado a atributos con la mayor prioridad.

Con los criterios de ponderación asignados a los factores, se utilizó la calculadora "raster"

para hacer una combinación lineal de criterios. Las figuras 7, 8, 9 y 10 presentan el escenario obtenido.

Los resultados muestran un promedio de 20 tuberías identificadas como con alta prioridad de rehabilitación en los cuatro escenarios. En el resultado del escenario 4 se observaron 20 tuberías con alta prioridad de rehabilitación. El cuadro 11 muestra un resumen de las tuberías que resultaron con prioridad alta de rehabilitación. Fue simulado el reemplazo de estas tuberías en *Pipelinenet*. Para esto se supuso que la tubería reemplazada consta con una rugosidad de PVC nuevo de acuerdo con cuadros de fabricante y se eliminó el incremento de demanda en los escenarios de consumo (variación de caudales asignados a nudos) debido a fugas en los nudos correspondientes a las tuberías "reemplazadas". El resumen de los resultados de la red final (con cambios realizados) se presenta en el cuadro 12.

Se puede observar que los porcentajes de número de tuberías que cumplen con las especificaciones de la CNA se incrementan de 83 a 87% en el caso de las pérdidas de carga unitarias y de 37 a 99% en el caso de la presión después de haber realizado los cambios en el modelo. Tal incremento se debe a la mejora inmediata del modelo del sistema de distribución por el óptimo reemplazo de tuberías con base en los criterios establecidos para la alternativa de evaluación 4. Las tuberías reemplazadas fueron tuberías antiguas en su mayoría, con alto índice de significancia para la red, altas pérdidas de carga unitaria y alto coeficiente de rugosidad. El porcentaje alto de incremento en el caso de la presión puede ser considerado un reflejo del reemplazo de tuberías con probables fugas y el reemplazo de líneas significativas para la red de distribución de acuerdo con el índice de significancia lo que mejora de forma significativa las presiones.

Conclusiones

La toma de decisiones por parte de los gestores del sistema de distribución de agua potable

Cuadro 11. Resumen de tuberías clasificadas como con alta prioridad de rehabilitación, escenario 4.

Característica		Núm. de tuberías	Longitud	% longitud
Diámetro	<= 75 mm	14	952.2	57.60
	100 mm	3	476.8	28.90
	150 mm	3	223.6	13.50
	Total	20	1 652.6	100.00
Edad	20	1	82.7	5.00
	30	19	1 569.9	95.0
	Total	20	1 652.6	100.00
Material	PVC	19	1 566.7	94.80
	AC	1	85.9	5.20
	Total	20	1 652.6	100.00
Comunidad	Providencia	20	1 652.6	100.00
	Total	20	1652.6	100.00



Figura 7. Escenario alternativo de evaluación 1. Probabilidad de fallo.

juega un papel fundamental en los controles de eficiencia comercial, física, hidráulica y energética, entre otras, del organismo operador. La pérdida de agua potable debido a fugas es una problemática recurrente en México

y se han propuesto diferentes metodologías para facilitar la toma de decisiones en esta área (Tzatchkov, Hansen, & Ramírez, 2010). La metodología propuesta para priorizar necesidades de rehabilitación proporciona una



Figura 8. Escenario alternativo de evaluación 2. Condiciones operacionales.



Figura 9. Escenario alternativo de evaluación 3. Costo.



Figura 10. Escenario alternativo de evaluación 4. Factores internos

Cuadro 12. Resumen de resultados para el análisis en modo dinámico a las 8 a.m. (hora crítica de demanda) de la red de Providencia. Porcentaje de un total de 138 tuberías y 108 nudos del poblado de Providencia, que cumple con las condiciones de velocidad, pérdidas de cargas unitarias y presión de acuerdo con lo requerido por el manual de la CNA, 2009.

Parámetro	Red inicial	Red final
Velocidad	34%	36%
Pérdidas de carga unitarias	83%	87%
Presión*	35%	99%

*Para las presiones se consideran los nudos existentes en la red; es decir, las uniones entre tuberías.

herramienta práctica que puede ser utilizada como base para la toma de decisiones de renovación de tuberías dentro del sistema de agua potable. Esta metodología permite organizar de forma prioritaria los grupos de tuberías que necesitan rehabilitación de acuerdo con criterios de prioridad establecidos por el organismo operador.

Los cuatro escenarios propuestos muestran visualmente las tuberías clasificadas como con baja, media y alta necesidad de rehabilitación, lo cual depende totalmente de los

factores de decisión y los criterios tomados en consideración. Estos criterios cuentan con respaldo de investigaciones posteriores (Alonso-Guzmán, 2010; Alonso-Guzmán *et al.*, 2013; Francisque, Rodriguez, Sadiq, Miranda, & Proulx, 2009; Kleiner *et al.*, 2007; Rostum, 2000), algunos de naturaleza matemática sobre jerarquización de las tuberías de la red o de estudio del deterioro hidráulico. La ponderación de criterios se basa en un método heurístico, en el cual se utiliza mayormente la opinión de un experto.

El riesgo es la verosimilitud de cometer un error en el proceso de toma de decisiones (Fallas, 2002). En este trabajo se manejó un intercambio completo de factores de decisión con un riesgo medio en la toma de decisión. Este tipo de análisis permite la integración ponderada de la totalidad de los factores que influyen en la priorización de reemplazo de tuberías a partir de la alternativa de evaluación utilizada. Esto representa una ventaja para el analista, pues se da una compensación entre factores; valores bajos de un factor pueden ser compensados con valores altos en otros factores. El método “combinación lineal ponderada” supone la aceptación de un cierto nivel de riesgo y ofrece resultados más ricos que los aportados por la intersección booleana (Vega & Lou, 2003). Por tanto, las tuberías pueden ser ordenadas con base en diferentes grados de necesidad de ser renovadas.

El sistema de información geográfica facilita el manejo, almacenamiento y filtrado de la información de acuerdo con las necesidades que se presenten cuando la toma de decisiones sea necesaria (Malczewski, 2006). La metodología propuesta puede ser utilizada para cualquier red de distribución, pues ofrece la ventaja de manejar la información que cada organismo operador considere necesaria y encuentre a su alcance, considerando la gran variedad que se presenta en los datos disponibles de una empresa de agua a otra, y el amplio rango en cuanto a la cantidad de información.

Los factores que intervienen en la toma de decisiones para la priorización de renovación de las tuberías son muy diversos. Por este motivo se deben considerar, hasta donde sea posible, todos los factores que de acuerdo con investigaciones y experiencia de los gestores de la red intervienen en la toma de decisiones, con el objetivo de organizar de forma prioritaria los grupos de tuberías, en función de la premura con que urge una intervención técnica. La calidad de las decisiones tomadas depende en gran parte del número de factores utilizados y sobre todo de la calidad de los datos ingresados.

La manera ideal de aplicar la evaluación multicriterio empleada es asignar ponderaciones a cada uno de los criterios tomados en cuenta (Ozturk & Batuk, 2011). De esta manera se valora la influencia de cada variable de decisión en diferente grado de importancia. Para esto es recomendable utilizar estadísticas, información de otras investigaciones o metodologías, como el proceso de jerarquía analítico aplicado heurísticamente o con datos comprobados estadísticamente, que pueden derivarse de programas de recopilación de datos implementados por el mismo organismo operador.

La técnica de evaluación multicriterio empleada (combinación lineal ponderada) dentro del SIG representa un riesgo e incertidumbre considerada al momento de tomar la decisión. El riesgo puede ser disminuido con la aplicación de diferentes técnicas de evaluación multicriterio, como la de promedio ordenado ponderado (Ordered Weighted Averaging). Con esta técnica es posible moverse a un riesgo mayor o menor, al mismo tiempo que se realizan diferentes grados de intercambio de criterios.

Agradecimientos

Los autores agradecen ampliamente a Robert Janke por haber facilitado el *software Pipelinet*. Además se agradece a Conacyt por el apoyo recibido durante este proyecto. La información técnica requerida para la realización del proyecto fue proporcionada directamente por el Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cajeme, al que se agradece de manera especial por su disponibilidad, tiempo y apertura.

Referencias

- Alonso-Guzmán, C. D. (2010). *Modelo híbrido para la toma de decisiones en programas de rehabilitación de tuberías para sistemas de abastecimiento de agua: aplicación a la ciudad de Celaya, Gto. (México)*. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Alonso-Guzmán, C. D., Pérez-García, R., Izquierdo-Sebastian, J., & Herrera-Fernández, M. (2013). Factores de fiabilidad y eficiencia en la toma de decisiones para la rehabilitación de tuberías. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14, 489-498.

- Arulraj, G., & Rao, H. (1995). Concept of Significance Index for Maintenance and Design of Pipe Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(11), 833-837, doi: doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:11(833)
- Ayuntamiento de Cajeme (2000). *Plan Municipal de Desarrollo 1997-2000*. Recuperado de <http://www.infocajeme.com/cajeme.php>.
- Bourguett, V., & Rodriguez, J. M. (2001). Evaluación económica de proyectos de reducción de pérdidas. En: *Reducción integral de pérdidas de agua potable* (Vol. 2, pp. 85-98). México, DF: Instituto Mexicano de Agua Potable.
- Castelán, E. (2001). *Water Management in the Mexico City Metropolitan Area: The hard Way to Learn*. Paper presented at the Proceedings from the Symposium Frontiers in Urban Water Management: Deadlock or Hope, Marseille, France.
- CEA (2004). *Programa estatal de mediano plazo, aprovechamiento sustentable del agua 2004-2009*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/sonara04.pdf>.
- CNA (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- CNA (2008). *Programa de Modernización de Organismos Operadores de Agua (Promagua)*. Recuperado de http://www.cmic.org/comisiones/sectoriales/infraestructurahidraulica/varios/Ejecucion_de_proyectos/Promagua_lineamientos.pdf.
- CNA (2009). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos Básicos*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- Eastman, J. R. (2006). IDRISI Andes Guide to GIS and image Processing. *Clark University, Worcester*, 87-131.
- Fallas, J. (2002). *Toma de decisiones y sistemas de información geográfica*. Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre y Escuela Deficiencias Ambientales. Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional.
- Francisque, A., Rodriguez, M., Sadiq, R., Miranda, L., & Proulx, F. (2009). Prioritizing Monitoring Locations in a Water Distribution Network: A Fuzzy Risk Approach. *Journal of Water Supply: Research and Technology, AQUA*, 58(7), 488-509.
- Garduño, H. (1994). *Uso eficiente del agua: un enfoque multidimensional*. Montevideo: Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Programa Hidrológico Internacional UNESCO-ORCYT.
- INEGI (2005). *Conteo de población y vivienda 2005. Indicadores del Censo General de Población y Vivienda*. México, DF: INEGI.
- Kallis, G., & Coccossis, H. (2001). Sustainable Management of Water Supplies for Developed Urban Areas: Issues, Perspectives and a Vision. In I. Publishing (Ed.). *Frontiers in Urban Water Management: Deadlock or Hope* (Vol. 45, pp. 269-264). Paris: Technical Documents in Hydrology.
- Kleiner, Y., Rajani, B., & Wang, S. (2007). Consideration of Static and Dynamic Effects to Plan Water Main Renewal. *Middle East Water*, 1-13.
- Malczewski, J. (2006). GIS-Based Multicriteria Decision Analysis: A Survey of the Literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703-726, doi: 10.1080/13658810600661508.
- Morais, D. C., & Almeida, A. T. (2006). Water Supply System Decision Making Using Multicriteria Analysis. *Water SA*, 32(2), 229-236.
- Ozturk, D., & Batuk, F. (2011). Implementation of GIS-Based Multicriteria Decision Analysis with VB in ArcGIS. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 10(6), 1023-1042.
- Rostum, J. (2000). *Statistical Modelling of Pipe Failures in Water Networks*. Doctoral thesis. Norwegian University of Science and Technology. Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:no:ntnu:diva-504>.
- Tortajada, C. (2006). Water Management in Mexico City Metropolitan Area. *Water Resources Development*, 22(2), 353-376.
- Tzatchkov, V., Hansen, M. P., & Ramírez, H. (2010). A Practical Approach for Prioritizing The Replacement of Water Pipes in Mexico City. *MRS Online Proceedings Library*, 1278/2010. XIX International Materials Research Congress, Cancún, México. <http://dx.doi.org/10.1557/PROC-1278-S07-5>.
- Vega, J. M., & Lou, M. A. M. (2003). *Métodos para la planificación de espacios naturales protegidos* (Vol. 2). Editorial CSIC-CSIC Press, España.
- Yamijala, S. (2007). *Statistical Estimation of Water Distribution System Pipe Break Risk*. Texas A&M University. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1969.1/ETD-TAMU-1471>.
- Zeleny, M., & Cochrane, J. L. (1982). *Multiple Criteria Decision Making* (Vol. 25). New York: McGraw-Hill.

Dirección institucional de los autores

M.C. Vivian Verduzco

Instituto Tecnológico de Sonora
Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente
5 de Febrero 818 Sur, Centro
85000 Ciudad Obregón, Sonora, MÉXICO
Teléfono: +52 (644) 4109 000, extensión 2302
vivian.verduzco@gmail.com

Dr. Jaime Garatuzá

Instituto Tecnológico de Sonora
Dirección Académica de la División de Recursos Naturales
5 de Febrero 818 Sur, Centro
85000 Ciudad Obregón, Sonora, MÉXICO
Teléfono: +52 (644) 4109 000, extensión 2588
garatuzal@gmail.com

M.I. Salvador Díaz

Instituto Tecnológico de Sonora
Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente
5 de Febrero 818 Sur, Centro
85000 Ciudad Obregón, Sonora, MÉXICO
Teléfono: +52 (644) 4109 000, extensión 2099
sdiaz@itson.edu.mx