

Modelo preventivo – predictivo para detección de daños en redes de distribución

Juan Saldarriaga

Ingeniero Civil, MSc.

Profesor Titular Universidad de los Andes, Director del Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA); jsaldarr@uniandes.edu.co

Natalia Romero

Ingeniera Civil, Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hídricos

Investigador CIACUA; na-romer@uniandes.edu.co

Lina Álvarez

Ingeniera Civil, estudiante de Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hídricos

Asistente graduada CIACUA; lm.alvarez81@uniandes.edu.co

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

Sociedad Colombiana de Ingenieros

Bogotá, D.C. 22, 23 y 24 de mayo de 2008

Resumen. Se presenta una metodología simplificada para el desarrollo de un modelo de predicción y prevención de daños en sistemas de distribución de agua potable que contribuye a determinar los tubos prioritarios a ser cambiados, encontrando el punto en el cual los posibles costos en reparación pueden superar la inversión en instalar una nueva tubería. Como complemento al modelo se aplicó una metodología de optimización hidráulica de la red que recomienda incrementar el diámetro de ciertos tubos facilitando la reducción del IANC y la probabilidad de generación de nuevos daños. Igualmente, se hicieron recomendaciones sobre la información de daños que debe recopilarse con el fin de generar análisis más extensos en un futuro. Esta investigación se basa en los resultados de estudios internacionales y en los conocimientos en calibración y optimización hidráulica desarrollados en el CIACUA, aplicándolos al caso colombiano del distrito Estadio de la ciudad de Bucaramanga.

Palabras clave. Costos de reparación de tuberías, daños en redes de distribución de agua potable, resiliencia.

1. Introducción

La reparación de daños en redes de distribución de agua potable es una labor de gran importancia en la gestión de las organizaciones que prestan este servicio, dadas las consecuencias económicas asociadas con dichos daños y el uso de recursos como personal, tiempo, materiales, dinero, vehículos y procesos administrativos, las cuales deben optimizarse con miras a garantizar una pronta y excelente atención al cliente. La importancia del tema de reparaciones justifica un análisis detallado de los costos de una tubería durante su vida útil y requiere un amplio conocimiento de la red, materiales, tipos de daño, deterioro, y usuarios.

La hidráulica rige el funcionamiento de los sistemas de distribución de agua potable y por lo tanto es importante desarrollar herramientas y metodologías basadas en sus principios, para facilitar la formulación de soluciones que mejoren la atención de daños y más aún, que al combinarse con información adicional como materiales, edades, historial de daños, tipo de suelo y amenaza sísmica, entre otros, permitan identificar anticipadamente aquellos sectores o tuberías de la red que deben renovarse antes de que se presenten daños, logrando así reducir los costos e inconvenientes que éstos acarrearán.

Para el diseño de la metodología propuesta se siguió principalmente el trabajo de los investigadores Kleiner y Rajani¹, quienes realizaron una recopilación completa de los diferentes procedimientos estadísticos y probabilísticos que han sido propuestos para encontrar la tasa o probabilidad de daño de tuberías o grupos de tuberías.

De acuerdo con estos investigadores, el deterioro de dichos elementos puede clasificarse como deterioro estructural, que corresponde a la disminución de la resiliencia estructural de la tubería y su capacidad de soportar los esfuerzos que se le impongan; o superficial interno, que tiene como consecuencias la reducción en capacidad y calidad del agua e incluso puede llevar al deterioro estructural. A partir de estos conceptos se construyó el diagrama que se presenta en la Figura 1 donde los cuadros resaltados en azul corresponden a los pasos considerados en la definición de la metodología propuesta. Este diagrama se obtuvo a partir de la interpretación de las causas y procesos relacionados con los daños de tuberías y además presenta las variables y aspectos a considerar en metodologías para la estimación de tasas de daños, las cuales generan recomendación de rehabilitación de la red.

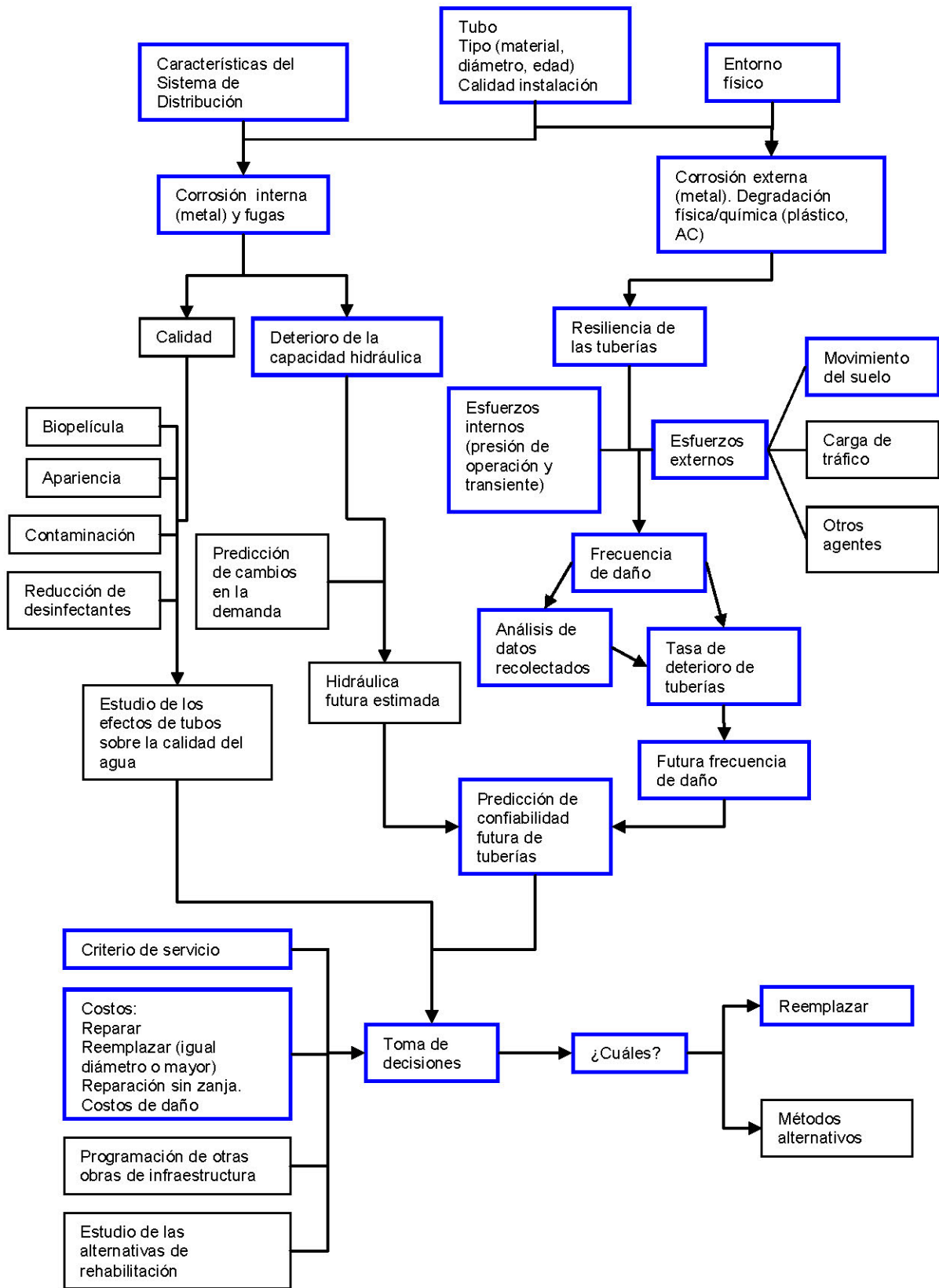


Figura 1. Cuadro de diseño para la metodología de mantenimiento predictivo-preventivo.

2. Información recolectada

La implementación de la metodología definida en esta investigación implica la recolección de información topológica, de edades y ubicación de las tuberías; información del comportamiento hidráulico (principalmente distribución de presiones, lo que a su vez requiere un modelo hidráulico calibrado de la red) y base de datos histórica de daños. Esta información se analizó agrupando los datos en función del material, edad y presión y se organizó en diferentes archivos manipulables en Sistemas de Información Geográfica, para facilitar su manipulación y visualización.

La información topológica corresponde a los datos sobre los materiales y los diámetros de las tuberías que conforman la red del distrito Estadio. La información sobre las edades de estas tuberías corresponde al promedio de años desde su instalación asociado con cada material. Para el caso de estudio se supusieron los siguientes valores: 40 años para las tuberías de asbesto-cemento y hierro fundido; 20 años para las tuberías de concreto reforzado, 30 años para las tuberías de hierro galvanizado, 8 años para los tubos de hierro dúctil y 5, 10 y 15 años para las tuberías de PVC.

En cuanto a la ubicación de la red, se organizaron dos archivos con la disposición de las tuberías, diferenciando en uno de ellos, el tipo de suelo donde se encuentran ubicadas y en el otro, la amenaza sísmica de la zona. La información sobre el comportamiento hidráulico del sistema corresponde a los coeficientes de fuga, presiones promedio y presiones máximas en cada tubo. La información recopilada sobre los daños históricos registrados en el sector estudiado de la red, se obtuvo de dos bases de datos suministradas por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P (**amb**). El primer grupo de datos se recopiló entre junio de 1996 y julio de 2003 mientras que los datos del segundo grupo se registraron en el período comprendido entre agosto de 2004 y febrero de 2006.

Como resultado del procesamiento y análisis de la información recolectada, se identificaron varias consideraciones para el registro y selección de la información a utilizar, las cuales hacen referencia al conocimiento de la red que debe ser lo más preciso posible. Para ello, además de la información de la red, se debe contar con información detallada respecto a los daños que en ella se presentan. Entre la información referente a daños en los sistemas de distribución de agua potable que puede ser útil para el análisis de su operación y mantenimiento, se encuentran el identificador del daño, identificador del tubo, tipo de daño, fecha del daño, hora de reporte del daño, hora de atención del daño, hora de cierre de daño, coordenadas exactas, nombre de la calle, referencia a algún mapa, longitud de tubería, técnica de reparación, costo de la reparación, tiempo de reparación, relación de inundación debido al daño, costo total del daño, usuarios regulares afectados, usuarios industriales afectados y observaciones precisas.

Para determinar el tipo de daño es importante considerar el tipo de falla, pues esta información permite agrupar y analizar mejor los registros, así como profundizar en el conocimiento del comportamiento estructural de la red, facilitando la vinculación del daño con su causa. De acuerdo con Kettler & Goulter, dichas causas están asociadas con la calidad y edad del tubo y conectores, con el tipo de suelo y condiciones externas, con la calidad del proceso de instalación y con las condiciones de servicio¹. En la

¹ Kettler & Goulter, 1985.

literatura se recomienda considerar los siguientes tipos de falla en el análisis: estallido de parte, perforación, falla en circunferencia, falla longitudinal, fuga de junta, ladeamiento y fuga antigua.

3. Agrupamiento de datos

Debido al tipo de información disponible sobre los eventos de fallas en la red estudiada se seleccionaron modelos basados principalmente en la calidad de agrupamiento de datos que pueda lograrse, para lo cual fue necesario analizar las variables que ejercen mayor influencia sobre la condición de las tuberías. Para el caso de estudio la agrupación de los datos se hizo según el material, el diámetro y la presión de las tuberías y se localizaron los daños ocurridos en toda la red por km de tubería en un año, obtenidos como el valor promedio del período incluido en los datos de daños. A partir de esta información se construyó, sobre la red, un plano de polígonos con un área de una hectárea, el cual se cruzó con los mapas de microzonificación y amenaza sísmica. Por último se creó un mapa con información sobre los daños por km de tubería en un año y los diámetros correspondientes a cada tubo.

Las tuberías se agruparon según su material y a su vez, cada material se subdividió en varios grupos dependiendo de algunas combinaciones de diámetro y presión definidas según los rangos de variación observados. Las tuberías cuyo material es asbesto-cemento se subdividieron en ocho grupos, las de hierro galvanizado en tres, y las de PVC en diez, para un total de 21 grupos. La información sobre daños ocurridos en tuberías de concreto reforzado, hierro dúctil y hierro fundido no se tuvo en cuenta en la organización y agrupamiento de datos debido a la escasez de registros, pues ésta dificulta los análisis posteriores.

4. Frecuencia de daños

Para el análisis de los datos históricos de daños se utilizaron modelos determinísticos, como el lineal y el exponencial y probabilísticos, como el modelo para encontrar concentraciones de daños, seleccionándose los grupos que podían generar un indicador de incremento de tasa de daños a través de los años analizados. También se realizó un estudio para determinar la necesidad de rehabilitación de las tuberías y se estimó el costo de inversión asociado a los tubos que ameritan reposición y que presentan gran cantidad de registro de daños en los años considerados en el análisis, los cuales se identificaron mediante las metodologías de Resiliencia y Potencia.

En la determinación de la frecuencia de daños se tuvo en cuenta la abstracción del ciclo de vida de una tubería propuesta por Kleiner y Rajani, la cual se definió en términos de la tasa de daño y deterioro de las tuberías, presentando las tres fases que se ilustran en la Figura 2. La primera se denomina “ajuste” y corresponde al período después de la instalación donde los daños ocurren principalmente como resultado de defectos constructivos o problemas de los tubos. Después de que el sistema sufre estos daños, comienza la fase en la cual la tubería opera sin mayores problemas, donde los pocos daños se deben a circunstancias extremas, exceso de cargas, interferencias, etc. La tercera fase corresponde al “desgaste” y se caracteriza por un incremento en la tasa de daños asociados con el deterioro y edad de la tubería. De acuerdo con los mismos autores no todas las tuberías sufren estas fases y no es igual para todos los tipos.

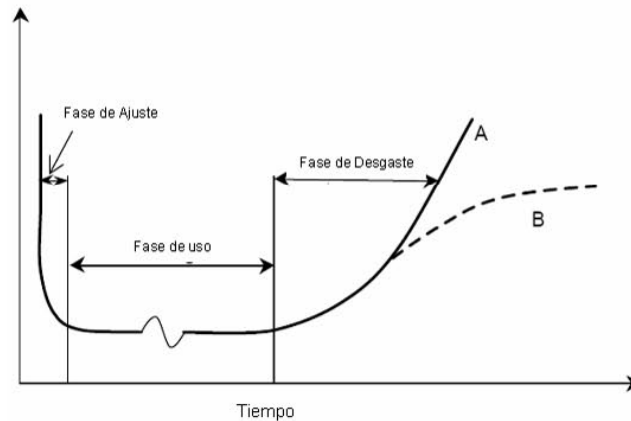


Figura 2. Ciclo de vida de una tubería instalada.²

A continuación se describen las principales características de los modelos determinísticos utilizados en el análisis de los registros históricos de daños.

Modelo lineal: requiere información sobre longitud de tubería, fecha de instalación e historia de daños. Dada su simplicidad es esencial contar con la previa formación de grupos homogéneos a partir de información sobre el tipo de tubería, diámetro, suelo, tipo de daño, etc. La ecuación del modelo es la siguiente:

$$N = k_0 \cdot \text{Edad} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde k_0 corresponde al parámetro de regresión y N al número de daños al año.

Modelo exponencial: ampliamente utilizado en análisis de rehabilitación; la ecuación que lo caracteriza se presenta a continuación.

$$N(t) = N(T_0) \cdot e^{A(t-T_0)} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde t es el tiempo en años, t_0 es el año en que la tubería fue instalada o el primer año en que se tiene información disponible, N(t) es el número de daños por km de longitud de la tubería en el año t y A es la tasa de crecimiento, con unidades 1/año.

4.1. Selección de datos

Para precisar los datos que se emplean en la metodología propuesta se analizó la información digital histórica sobre los daños registrados en diferentes años con el fin de definir el período de análisis, que para el caso de estudio corresponde al año calendario debido a que los períodos de análisis deben ser años completos, ya que los regímenes de consumo varían a lo largo de un año al igual que los regímenes de presión. Al revisar la base de datos se constató el estado incompleto en que se encuentran los registros históricos de daños para toda la red. Para determinar qué tan incompleta se encontraba la base de datos se revisaron los daños en cada año y en cada uno de sus meses. En la Figura 3 se muestra la cantidad de daños en cada año y la cantidad de daños al completar la base de datos con el promedio de éstos registrado en el año incompleto.

² Kleiner y Rajani (2001)

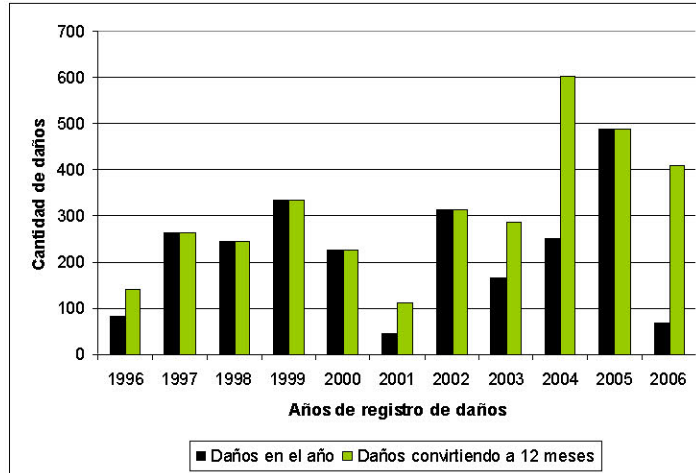
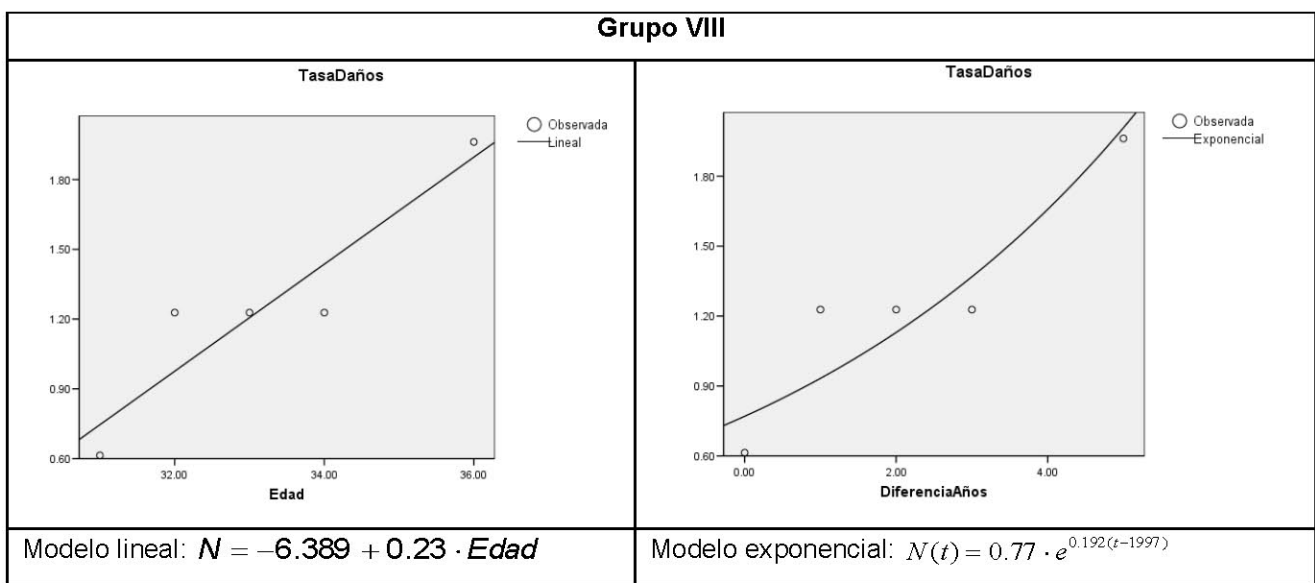


Figura 3. Ciclo de vida de una tubería instalada.

Al analizar la evolución de la cantidad de daños en cada mes durante los 11 años registrados se identifican datos faltantes en la información para los años 1996, 2001, 2003, 2004, y 2006 y se observa un elevado incremento de los registros de daños para el año 2005. Finalmente se identificaron los años ideales para el análisis de los registros de daños que corresponden a 1997, 1998, 1999, 2000, y 2002, ya que pertenecen a una misma base de datos y además, durante estos años, ciertos grupos de tubos presentan el comportamiento esperado así como la información más completa.

4.2. Generación de tasas de daño

Se seleccionaron aquellos grupos que podían generar un indicador de incremento de tasa de daños a través de los años seleccionados. Estos grupos fueron: V, VII, VIII, XIX, XX, XVI, la combinación del grupo XII con el grupo XIII y del grupo XIX con el grupo XX. Estos grupos se analizaron con el programa SPSS 14.0 bajo una regresión lineal y otra exponencial donde cada una incluyó un análisis ANOVA (Análisis de Varianza). En la Figura 4 se presentan los resultados de los grupos con grados de significancia por debajo del 5% o por lo menos cercanos a éste límite.



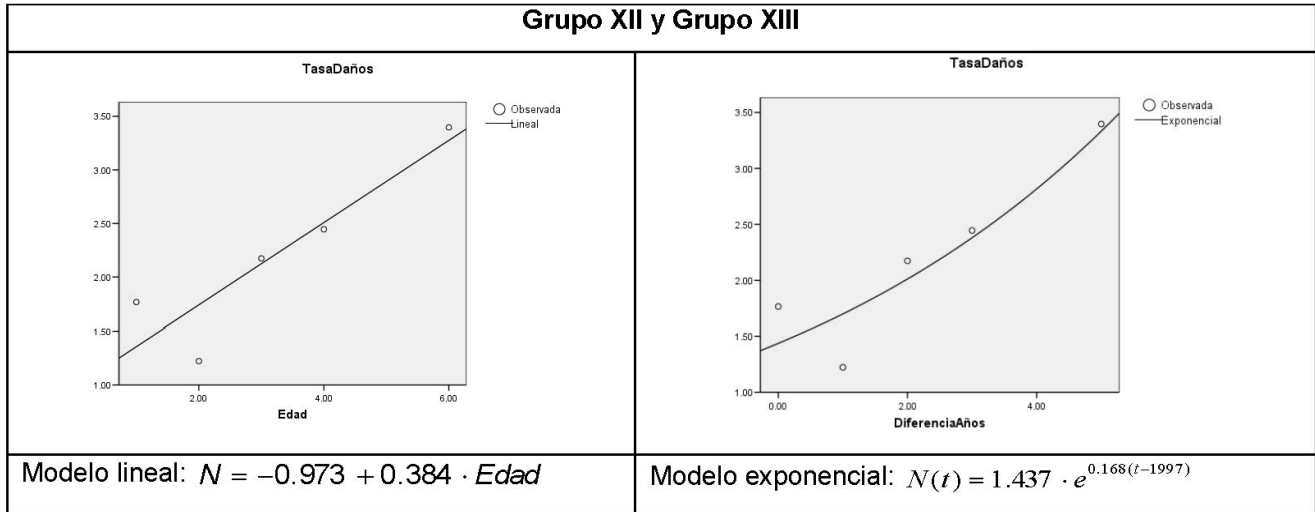


Figura 4. Tasas de daño estimadas aplicando regresiones lineales y exponenciales de los datos.

5. Análisis de costos

Para el análisis de costos es necesario conocer las técnicas empleadas para la rehabilitación y reparación de tuberías, de manera que puedan estimarse los costos unitarios y por unidad de longitud de los diferentes elementos, horas laborales, etc., requeridos en los procedimientos de mantenimiento de la red. Para estimar los costos de rehabilitación se tuvieron en cuenta las consideraciones planteadas por Moglia³, según las cuales dentro de los costos de reparación se debe considerar la rehabilitación de tubería, la inserción de válvulas, la reparación de tubería, la interrupción del servicio y las consecuencias del daño. Además, se incluyeron las siguientes recomendaciones de experiencias de análisis de costos que son importantes el mantenimiento predictivo-preventivo en sistemas de distribución de agua potable⁴:

1. Las zonas donde un daño tiene consecuencias mayores deben reemplazarse más rápidamente.
2. Para hacer más efectiva la inversión se debe mejorar la información disponible sobre la red, la historia de daños y técnicas óptimas de rehabilitación.
3. Una práctica que hace más rentable la inversión es combinar las obras de mantenimiento con obras futuras, futuros requerimientos en capacidad y calidad del agua, etc.
4. UNA ESTRATEGIA DE SÓLO REPARAR DAÑOS NO ES ECONÓMICAMENTE VIABLE.

5.1. Información suministrada

El **amb** suministró información sobre los costos de reparación de tuberías para diferentes materiales y diámetros. Esta información incluye los costos de materiales, labores de instalación y obras públicas para reparación de tuberías ubicadas en zonas de diferentes presiones. Para el análisis de costos asociados a los tubos que deben repararse o reemplazarse se utilizaron los precios de las tuberías de PVC, debido al aumento creciente de su empleo.

³ Moglia, 2006

⁴ Male & Walski, 1990.

5.2. Análisis de costos de inversión

Se fijaron algunos parámetros como el valor de la inflación, la rentabilidad esperada de la empresa, los años de análisis, el costo del agua, etc. El análisis de daños históricos se hizo para el grupo de tubos de Asbesto Cemento de diámetros mayores a 254 mm (10 pulgadas) y bajo presiones entre 40 m.c.a. y 70 m.c.a. Este análisis tiene como principal objetivo detectar el momento en que para una tubería es ideal dejar de realizar reparaciones sobre los daños abruptos y mejor planear un reemplazo total o parcial del grupo o zona en cuestión. El tiempo de reemplazo ideal se estimó como el momento en que el gasto acumulado en reparaciones desde el inicio es igual al costo de reparación del tubo en valor presente. Para el grupo de tubos analizado, se estimó que el reemplazo planificado de éste grupo debe estar cercano a los próximos 10 años.

5.3. Análisis de energía e IANC

Este análisis se llevó a cabo sobre un modelo hidráulico calibrado del sistema de tuberías que considera el IANC y la energía de la red permitiendo la aplicación de los conceptos de Resiliencia y Potencia, los cuales están relacionados con el grado de vulnerabilidad de la red.

El análisis por Resiliencia se basa en la relación entre el poder por unidad de peso disipado por la red de distribución y el poder por unidad de peso disponible para ser disipado. Partiendo de esta relación puede calcularse el índice de resiliencia cuyo rango de posibles valores oscila entre 0 y 1. Para la red estudiada se minimizó el incremento en el índice de resiliencia producido al cambiar los diámetros de las tuberías, determinando así las tuberías que deben ser reemplazadas y el diámetro con el cual debe hacerse su reemplazo. Con este análisis se encontró que la mayoría de los cambios requeridos para la rehabilitación de la red se presentaron en tuberías de diámetros menores a 254 mm (10 pulgadas) los cuales se incrementaron al doble.

En el análisis por potencia, se calculó la potencia de cada tubería multiplicando su caudal por las pérdidas en ella y se incrementó el diámetro del tubo con mayor potencia al siguiente según la lista comercial. Con este cambio se corrió la hidráulica de la red, seleccionando la tubería con mayor potencia disipada e incrementando su diámetro y se repitió el proceso escogiendo el siguiente tubo con mayor potencia.

6. Análisis de optimización hidráulica y operativa

6.1. Calibración y análisis histórico de daños

Se compararon los coeficientes de fuga y los sectores en los cuales se identificó una mayor presencia de daños durante los últimos años. Los resultados derivados de esta comparación son consistentes con el comportamiento observado durante el proceso de calibración de la red del distrito Estadio, pues las zonas con alta presencia de fugas coincidieron con las zonas con mayor frecuencia histórica de fugas reportadas.

6.2. Selección combinada de tubos que puede ser recomendable reemplazar

Para determinar la necesidad de rehabilitación de las tuberías, se estimó el costo de inversión asociado a las tuberías identificadas mediante las metodologías de Resiliencia y Potencia como elementos que ameritan reposición y que históricamente presentan alta tasa de daños. Los resultados del análisis señalaron un aumento de la Resiliencia de la red, es decir, de su capacidad para atender los requerimientos de ésta al ocurrir un daño en cualquiera de sus elementos, siendo más adecuada la primera metodología. Con el aumento de la Resiliencia de la red se logró una distribución más uniforme en las presiones; sin embargo debido a que no se modificaron muchos tubos dentro de la red y a la topografía del distrito, este efecto no es perceptible.

7. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados de esta investigación señalan la importancia de organizar y complementar la información histórica de daños, buscando generar análisis con fundamentos de causalidad y estimaciones más precisas. Así mismo es importante invertir en el control de los procedimientos de reparación, pues el procedimiento seguido por empresa de acueducto para reparar daños es costoso y no aporta los beneficios en extensión de ciclo de vida y mejoramiento del funcionamiento de la red. Por último, se encontró que la información con la que se cuenta no arroja resultados certeros para herramientas predictivas que permitan desarrollar políticas de planeación y prevención a largo plazo.

Para la rehabilitación de la red estudiada se recomienda aplicar técnicas diferentes a las convencionales utilizadas por empresas de acueducto, tales como *Revestimientos no estructurales*, *Revestimientos estructurales*, *Pipe Bursting*, *HDD o perforación horizontal* y *Reemplazo de tubería con zanja*.

8. Referencias bibliográficas

- Ketler, A.J. & I.C. Goulter. "An Analysis of Pipe Breakage in Urban Water-Distribution Networks" *Can. Journal of Civil Engineering*, 12. 1985: 286 – 293.
- Kleiner, Y., and B.B. Rajani. "Comprehensive Review of structural Deterioration of Water Mains: Statistical Based Models" *Urban Water*, Vol. 3, No. 3. October 2001: 131 – 150.
- Kleiner, Y., B.J. Adams & J.S. Rogers. "Water Distribution Network Renewal Planning" *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE Vol. 15, No. 1. January 2001: 15 – 26.
- Moglia, M., S. Burn and S. Meddings. "Decision Support System for Water Pipeline Renewal Priorisation" *ITcon* Vol. 11, Special Issue: Decision Support Systems for Infrastructure Management: 237 – 256. <<http://www.itcon.org/2006/18>>
- Todini, Ezio. "Looped Water Distribution Networks Design Using a Resilience Index Based Design" *Urban Water*. Vol. 2. September 2000: 115 – 122.
- CIACUA – Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados. "Metodología para la definición de plano óptimo de presiones y reducción del agua no contabilizada". Universidad de los Andes – Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Octubre 2006.