

**MODELO DE GESTIÓN Y OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL DE LOS DAÑOS EN
REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA**

SERGIO ALONSO ANAYA ESTÉVEZ



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2015**

**MODELO DE GESTIÓN Y OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL DE LOS DAÑOS EN
REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA**

SERGIO ALONSO ANAYA ESTÉVEZ

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar
al título de Magister en Tecnologías de la Información Geográfica

Presidente:

ORLANDO RIAÑO MELO

Ingeniero de sistemas – Matemático, Esp. En Sistemas de Información
Geográfica, M.Sc. en Geomática

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2015**

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Orlando Riaño Melo, Ingeniero de Sistemas, Matemático, Especialista en Sistemas de Información Geográfica, M.Sc. en Geomática y actualmente docente de planta de la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, por su tiempo, dedicación y conocimientos expresados durante el transcurrir de la maestría en aporte a este proyecto.

Luis Fernando Castañeda Galvis, Ingeniero Civil, M.Sc. en Ingeniería Civil y actualmente profesional asistente de la División Distribución del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P., por sus aportes asociados al modelamiento hidráulico de redes de distribución de agua dentro del proyecto y por su valiosa e incondicional amistad brindada estos años.

Carlos Alberto Oviedo Rueda, Ingeniero Civil, Especialista en Gerencia del Mantenimiento y actualmente profesional asistente de la División Distribución del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P., por sus aportes asociados al modelamiento hidráulico de redes y particularmente por su ayuda en el problema asociado a la optimización del algoritmo del software MOVA.

Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. y su personal, por brindar sus instalaciones, información y experiencia en beneficio de la ejecución de este proyecto.

Universidad de Manizales, a su cuerpo docente y administrativo, por brindar una educación de alta calidad y formar profesionales competentes.

Maloree Andrea Esparza Almeida, Profesional en Mercadeo y Publicidad, Asistente de Dirección FENAVI Bucaramanga, quien además es mi novia, por su paciencia, acompañamiento y apoyo durante estos años a mi lado y que espero sea la continuación de una vida juntos.

A mis padres, Ramiro Anaya Gafaro y Ana Isabel Estévez, quienes son mi razón de ser, el ejemplo a seguir y el motor de mi vida, gracias a ellos soy quien soy y espero ser la mitad de buen padre como han sido conmigo.

A Dios, por su calor, por ser ese mejor amigo, por estar en todo momento y por brindarme la posibilidad de alcanzar esta meta y allanar mi camino para una vida en su honra.

CRÉDITOS

Las personas que participaron en este proyecto fueron las siguientes:

NOMBRE COMPLETO	FUNCIÓN EN EL PROYECTO	DIRECCIÓN DE CONTACTO	CORREO ELECTRÓNICO
Sergio Alonso Anaya Estévez	Autor	Calle 20 # 32 ^a -59 Apto 705	zizou10_5@hotmail.com
Orlando Riaño Melo	Presidente		oriano@umanizales.edu.co
Luis Fernando Castañeda Galvis	Asesoría en modelamiento hidráulico / Revisor de estilo	Calle 19 # 32-59 Apto 804	luisfernadocasta@yahoo.com
Carlos Alberto Oviedo Rueda	Asesoría en modelamiento hidráulico	Calle 48 # 39-41 Apto 504	caoviedor@hotmail.com

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

<NOMBRE COMPLETO>
JURADO

<NOMBRE COMPLETO>
JURADO

<NOMBRE COMPLETO>
JURADO

Manizales, <día> de <mes> de <año>

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. ÁREA PROBLEMÁTICA	20
2. OBJETIVOS.....	21
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	21
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3. JUSTIFICACIÓN	22
4. MARCO TEÓRICO	23
4.1. ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P.	23
4.2. PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES: IDEA GENERAL	24
4.3. FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	26
4.4. MANTENIMIENTO CORRECTIVO	27
4.5. IMPORTANCIA DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS COMO HERRAMIENTA DE CONTR	28
MANTENIMIENTO CORRECTIVO	28
4.6 EL “TOOLKIT” DE EPANET.....	29
4.7 METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE SOFTWARE.....	30
4.8 MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE EN DATOS ESPACIALES	34
4.9 METODOLOGÍA PARA MANTENIMIENTO PREVENTIVO-PREDICTIVO	37
4.10 ANTECEDENTES	44
5. METODOLOGÍA	49
5.1. TIPO DE TRABAJO	49
5.2. PROCEDIMIENTO.....	49
6. RESULTADOS.....	52
6.1. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS	52
6.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	125
7. CONCLUSIONES	128
8. RECOMENDACIONES.....	131
BIBLIOGRAFÍA.....	135
ANEXOS.....	137

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura Organizacional amb S.A. E.S.P.....	24
Figura 2. Plano de Presiones 1	25
Figura 3. Plano de Presiones 2.....	25
Figura 4. Visión General de FDD	33
Figura 5. Diseño metodológico para el mantenimiento preventivo-predictivo	38
Figura 6. Ciclo de vida de una tubería instalada.....	41
Figura 7. Ubicación y distribución espacial de la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana	53
Figura 8. Esquema de mantenimiento correctivo actual del amb S.A. E.S.P.....	54
Figura 9. Algoritmo de priorización de daños.....	60
Figura 10. Distribución espacial de los daños del ejemplo hipotético 1.	62
Figura 11. Priorización geográfica de los daños con el ejemplo hipotético 1.....	65
Figura 12. Priorización por tamaño de la fuga del daño con el ejemplo hipotético 1.	68
Figura 13. Priorización según el algoritmo CIACUA-amb S.A. E.S.P. con el ejemplo hipotético 1.....	71
Figura 14. Distribución espacial de los daños en el ejemplo hipotético 2	73
Figura 15. Priorización geográfica de los daños del ejemplo hipotético 2.....	75
Figura 16. Priorización por tamaño de fuga de los daños del ejemplo hipotético 276	
Figura 17. Priorización por tamaño de fuga de los daños del ejemplo hipotético 278	
Figura 18. Priorización según el algoritmo CIACUA – amb S.A. E.S.P. del ejemplo hipotético	80
Figura 19. Distribución espacial de los daños en el ejemplo hipotético 3	82
Figura 20. Distribución espacial de los daños en el ejemplo hipotético 4	84
Figura 21. Estructura de la Personal Geodatabase de la Información Operativa del amb S.A. E.S.P.....	93
Figura 22. Modelo Hidráulico de las redes de acueducto del amb S.A. E.S.P.....	94
Figura 23. Tabla de los nodos de presión del modelo hidráulico.	94
Figura 24. Flujo de la información cartográfica en el amb S.A. E.S.P.....	95
Figura 25. Arquitectura tres capas del programa MOVA	97
Figura 26. Algoritmo de funcionamiento del software MOVA (I)	100
Figura 27. Algoritmo de funcionamiento del software MOVA (II)	101
Figura 28. Mapa de distribución de edades de las tuberías en la red de distribución	104
Figura 29. Mapa de la distribución de los tipos de suelo y amenaza en el área metropolitana	105
Figura 30. Mapa de la distribución de las presiones en la red de distribución.	106
Figura 31. Mapeo de campos al estilo del localizador de direcciones	109
Figura 32. Geocodificación de la tabla de direcciones de los eventos.....	109
Figura 33. Ubicación espacial de los daños 2012 asignado por medio del localizador de direcciones.....	110

Figura 34. Búsqueda a partir de las direcciones de los daños.....	111
Figura 35. Daños/Km/Año en la red de distribución en polígonos de 100mX100m.	112
Figura 36. Diagrama de decisión de la regresión múltiple.	113
Figura 37. Metodología de agrupamiento de datos.....	115
Figura 38. Diagrama en Model Builder para construcción de grupos homogéneos	117
Figura 39. Características del Grupo 6.	118
Figura 40. Características del Grupo 7.	118
Figura 41. Características del Grupo 8.	119
Figura 42. Distribución espacial del grupo homogéneo 11.	120
Figura 43. Capa de salida OLS para el grupo 11.....	121
Figura 44. Resultados numéricos de regresión OLS del grupo 11.....	121
Figura 45. Autocorrelación espacial I-Morans del grupo 11.....	123
Figura 46. Resultados numéricos de regresión OLS del grupo 37.....	124
Figura 47. Resultados numéricos de regresión OLS del grupo 51.....	124

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ventajas y limitaciones de modelos existentes	43

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Comparación entre metodologías ágiles y no ágiles	31
Cuadro 2. Resumen comparativo entre las principales características de RUP, XP, FDD	31
Cuadro 3. Causas típicas de fallas y daños en redes de distribución de agua potable	39
Cuadro 4. Diferencias entre roturas y fugas de tuberías.....	40
Cuadro 5. Resumen para el desarrollo del marco metodológico Fase I	49
Cuadro 6. Resumen para el desarrollo del marco metodológico Fase II	50
Cuadro 7. Resumen para el desarrollo del marco metodológico Fase III	51
Cuadro 8. Valores del Coeficiente C para los distintos tipos de fugas.....	58
Cuadro 9. Características de los daños del ejemplo hipotético 1.....	63
Cuadro 10. Caudales y costos por hora de los daños del ejemplo hipotético 1	63
Cuadro 11. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 1 de acuerdo al criterio geográfico.	66
Cuadro 12. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 1 de acuerdo con el tamaño de la fuga.....	66
Cuadro 13. Clasificación de los daños del ejemplo hipotético 1	69
Cuadro 14. Costos asociados a los daños del ejemplo hipotético 1	69
Cuadro 15. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 1 de acuerdo al algoritmo CIACUA – amb S.A. E.S.P.....	69
Cuadro 16. Características de los daños del ejemplo hipotético 2.....	74
Cuadro 17. Caudales y costos horarios de los daños del ejemplo hipotético 2	74
Cuadro 18. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 2 de acuerdo al criterio geográfico.	74
Cuadro 19. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 2 de acuerdo con el tamaño de las fugas	77
Cuadro 20. Clasificación de los daños del ejemplo hipotético 2	79
Cuadro 21. Orden de atención de los daños de acuerdo al algoritmo CIACUA – amb S.A. E.S.P. para el ejemplo hipotético 2	79
Cuadro 22. Principales características del ejemplo hipotético 3	81
Cuadro 23. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 3 de acuerdo con el criterio geográfico.....	83
Cuadro 24. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 3 de acuerdo con el tamaño de las fugas	83
Cuadro 25. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 3 de acuerdo con el algoritmo CIAUCA – amb S.A. E.S.P.	83
Cuadro 26. Principales características del ejemplo hipotético 4	85
Cuadro 27. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 4 de acuerdo con el criterio geográfico.....	85

Cuadro 28. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 3 de acuerdo con el tamaño de las fugas	85
Cuadro 29. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 4 de acuerdo con el algoritmo del CIACUA – amb S.A. E.S.P.....	86
Cuadro 30. Costos de los ejemplos hipotéticos planteados con ahorros y retrasos.	87
Cuadro 31. Resultados análisis de sensibilidad a los tiempos de viaje para los ejemplos hipotéticos.	87
Cuadro 32. Descripción de usuarios	90
Cuadro 33. Cuadro consolidado de los grupos homogéneos.	115

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A.....	138
ANEXO B.....	143
ANEXO C.....	153
ANEXO D.....	159

GLOSARIO

Agua No Contabilizada: en general es la diferencia porcentual entre el agua que ingresa a un sistema de distribución (macromedición) y el agua micromedida de los usuarios; esto ocasionado por imprecisión en los instrumentos, fugas en la red de distribución o por consumos ilegales o fraudulentos.

CIACUA: Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes.

Coefficiente del emisor: el coeficiente C es el encargado de cuantificar el tamaño del daño; C es un parámetro de entrada en unidades de $L/sm^{0.5}$

Fuga Abierta: el cálculo del valor del agua que se pierde a través de una fuga.

Fuga Contenida: se define como el costo del agua que se deja de vender mientras dura el cierre necesario para realizar las reparaciones correspondientes.

Gestión Integral de Redes: estrategias y metodologías que optimicen todos los procesos operativos, basado en suficiente información para dar respuesta a las necesidades actuales y a los acontecimientos futuros.

Hidráulica: “es la parte de la física que estudia el comportamiento mecánico del agua superficial o subterránea en las obras o máquinas de ingeniería. Esta ciencia, como parte de la física, utiliza en todas sus teorías el modelo inductivo, estadístico y experimental, que formula sus leyes tras la reunión, clasificación y numeración de hechos y fenómenos observados de un mismo orden que se repiten.”¹

Ingeniería del Software: “...establecimiento y uso de principios robustos de la ingeniería a fin de obtener económicamente software que sea fiable y que funcione eficientemente sobre máquinas reales.”²

Modelo de Regresión Lineal: “El análisis de regresión permite modelar, examinar y explorar relaciones espaciales para entender mejor los factores de los patrones espaciales observados y predecir resultados basados en ese entendimiento.”³

¹ GRUPO TAR. ESCUELA UNIVERSITARIA POLITECNICA DE SEVILLA. Hidráulica. [en línea]. Sevilla. 2007. 5p. [consulta: 15/04/2015]. Disponible en: <http://tar5.eup.us.es/tar/formatec/tagua/t01_hidraulica.pdf>

² PRESSMAN, Roger. Ingeniería del software. 5 ed. Madrid: McGraw-Hill, 2002. 14 p. ISBN 0-07-709677-8

³ BOADA, A. Notas de Clase Geoestadística, 2014

Modelo Hidráulico: "...cada vez que el ingeniero se enfrenta al problema de diseñar una estructura tiene que resolver armoniosamente un compromiso entre los aspectos de eficiencia, seguridad y costo, lo que implica establecer con un razonable grado de confianza la relación entre la estructura proyectada y el medio circundante."⁴. Entendiendo como modelo físico o matemático, la representación simplificada de un aspecto de la naturaleza, en este caso la hidráulica.

Plano Óptimo de Presiones: como aquel plano que hace minimizar las pérdidas técnicas, sin afectar en forma apreciable el volumen total de agua facturada, ni dejar de cumplir los niveles de presión mínima en los nodos, establecidos por las normas.

Prototipo: "es un sistema que funciona, desarrollado con la finalidad de probar ideas y suposiciones relacionadas con el nuevo sistema. Es la primera versión, o iteración, de un Sistema de Información; es el modelo original".⁵

Red de distribución de agua:

El proyecto de la red de tuberías que va a suministrar agua a cada uno de los puntos de consumo (diversos edificios) no es un problema fácil de resolver. Tiene infinidad de soluciones, por lo que generalmente el criterio económico será el que prevalezca en el estudio de las diversas alternativas. Toda red de distribución está compuesta por tuberías principales (arterias) que son las de mayor diámetro y alimentan al resto de conductos. Como norma general, éstas no tienen tomas de servicio. En segundo lugar, aparecen tuberías secundarias, de menor diámetro y que llevan el agua a las tuberías de distribución. Éstas son las conducciones que dan servicio a los distintos edificios o puntos de consumos en general. Y finalmente, las acometidas que es el conjunto de tuberías y válvulas que conectan la red con las instalaciones interiores de los edificios.⁶

Simulación: "implica crear un modelo que aproxima cierto aspecto de un sistema del mundo real y que puede ser usado para generar historias artificiales del sistema, de forma tal que nos permite predecir cierto aspecto del comportamiento del sistema".⁷

⁴ ROCHA, A. Los modelos como herramienta valiosa para el diseño hidráulico. [en línea]. En: Ciclo de Conferencias – Investigación en modelos físicos y matemáticos de obras hidráulicos. Perú. (Febrero de 2003). [consulta: 15/06/2015]. Disponible en

<http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/modelos_hidraulicos_de_Rocha.pdf>

⁵ SENN, James. Análisis y diseño de Sistemas de Información. 2 ed. Argentina: McGraw-Hill, 1988. 643 p. ISBN: 968-422-165-7.

⁶ UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Área de Mecánica de Fluidos. Prácticas de Instalaciones de fluidos. [en línea]. España (2005-2006). [consulta: 10/05/2015]. Disponible en <<http://web.uniovi.es/Áreas/Mecanica.Fluidos/>>

⁷ Colaboradores de Wikipedia. Simulación. [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2010. [consulta: 15/06/2015]. Disponible en <<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Simulacion&oldid=34962876>>

Sistema de Información Geográfica: constituyen el conjunto de programas, procedimientos, personas y datos que tiene referencia en el espacio.

RESUMEN

TITULO: MODELO DE GESTIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LOS DAÑOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA.*

AUTOR: SERGIO ALONSO ANAYA ESTÉVEZ**

DESCRIPCIÓN

Este documento presenta la aplicación de una metodología simplificada para el desarrollo de un modelo de gestión, que permita optimizar la atención correctiva de los eventos sobre sistemas de distribución de agua potable, haciendo uso de áreas del conocimiento tales como la modelación hidráulica y los Sistemas de Información Geográfica y estableciendo como criterio principal del algoritmo para la priorización de los daños, la cantidad y costos asociados de agua que se pierden mientras el daño no es reparado, así como la cantidad y costos del agua que se deja de vender a los usuarios mientras duran los trabajos de reparación. Como complemento a este documento se introduce un modelo de predicción de regresión lineal múltiple que sirve como herramienta operacional muy valiosa para predecir las fallas para cada tubería durante su vida. Este proyecto toma algunos trabajos previos y el conocimiento en modelación hidráulica desarrollados en el CIACUA (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados) del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes, en conjunto con el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. La herramienta desarrollada y la metodología fueron aplicadas a la red de distribución de agua de la ciudad de Bucaramanga (Colombia).

PALABRAS CLAVES: Daños en redes de distribución de agua potable, métodos y algoritmos de optimización, modelo de regresión lineal múltiple, mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo y predictivo, Sistemas de Información Geográfica.

* Proyecto de Grado de Maestría.

** Facultad de Ingeniería Universidad de Manizales, Director: Ing. Orlando Riaño M.

ABSTRACT

TITLE: MANAGEMENT AND OPTIMIZING MODEL OF DAMAGE ON WATER DISTRIBUTION SYSTEM*

AUTHOR: SERGIO ALONSO ANAYA ESTÉVEZ**

DESCRIPTION

This paper present the application of a simplified methodology for the development of a management model, that allows to optimize the corrective attention of events on potable water distribution system (WDS), by using areas of knowledge such as Hydraulic Modelling and Geographic Information Systems (GIS) and establishing as the main criteria for prioritizing damage repair algorithm the associated amount and cost of water that is lost while the damage is not fixed and the amount and cost of water required by users but not supplied to them because of the damage. Supplement this paper introduces a linear multiple regression prediction models that proved to be a valuable operational tool to predicting the failures for each individual pipe in their lifetime. This project take a look at some of previous work and knowledge in hydraulics modelling Developed by Water Distribution and Sewerage Systems Research Center – CIACUA, Civil and Environmental Engineering Department, Universidad de los Andes jointly with Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P. The developed tool and methodology was applied to the WDS of the city of Bucaramanga (Colombia).

KEY WORDS: damage in potable water distribution system, optimization algorithms and methods, linear multiple regression model, corrective maintenance, preventive and predictive maintenance, Geographic Information Systems.

* Degree Project of Master Science

** Manizales University Faculty of Engineering, Director: Eng. Orlando Riaño Melo.

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia que las ciudades crecen de una manera desmedida, los sistemas de distribución de agua potable han acelerado en tamaño y por ende en complejidad, que sumado con los elevados costos de operación de las redes y considerando a su vez la escasez del recurso vital, han generado obligaciones sobre las empresas prestadoras de servicio, orientadas a la búsqueda de estrategias y metodologías que optimicen todos sus procesos, basado en suficiente información para dar respuesta a las necesidades actuales y a los acontecimientos futuros. Este proceso se conoce como Gestión Integral de Redes.

La Gestión Integral de Redes es un concepto desconocido dentro del ámbito local, debido en gran medida a que las empresas responsables de la prestación del servicio se han concentrado en dedicar esfuerzos y recursos económicos a partir únicamente del momento en que ocurren los daños, problemas de abastecimiento por falta de capacidad o restricciones en la red, de igual manera, ya que se necesitan grandes volúmenes de información de excelente calidad que deben ser recopilados y procesados, ha relegado el manejo óptimo de los sistemas de abastecimiento de agua potable a un segundo plano.

Afortunadamente, dentro del ámbito local, han surgido algunas empresas pioneras que han gestionado recursos en planes de actualización catastral, instrumentación para la adquisición de datos y herramientas computacionales para el procesamiento de información, los cuales han permitido realizar proyectos como el presente, encaminados a la elaboración de herramientas cuyo enfoque facilite la toma de decisiones, a partir de la modelación hidráulica y las Tecnologías de la Información Geográfica, tal cual se ejemplifica en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.

Como punto de partida para alcanzar una Gestión Integral de Redes, se debe disponer de una modelación hidráulica detallada, que permita conocer la evolución de los caudales y las presiones en la red de distribución a cualquier hora del día, bajo cualquier escenario de operación. Para elaborar dicha información (modelos hidráulicos) es necesario recopilar información detallada del catastro del sistema, a través de planos, esquemas, cartillas, etc., la cual debe integrarse en un sistema de información geográfica, para generar de esa manera archivos que puedan visualizarse y modificarse desde un software de simulación hidráulica, que para objetos de este proyecto será EPANET.

Para que un modelo hidráulico pueda ser utilizado en la Gestión Integral de Redes, debe pasar primero por un proceso de ajuste de algunos de sus parámetros, el cual recibe el nombre de calibración, garantizando que se representen adecuadamente las condiciones reales en la red, de manera que los

resultados obtenidos con el modelo sean consistentes con las mediciones obtenidas en campo.

Cuando se cuenta con modelos hidráulicos calibrados, se pueden elaborar modelos estadísticos que relacionan la información geológica, de tipo y usos de suelo, así como la edad, el tamaño, el material y el tipo de tuberías, con el historial de daños y el valor de las presiones con el fin de identificar las zonas más vulnerables e intentar predecir la ocurrencia de fallas futuras, dentro del marco de las Tecnologías de la Información Geográfica.

Adicionalmente se pueden desarrollar herramientas computacionales que, haciendo uso de la hidráulica y el análisis espacial, permitan establecer los efectos y costos de la reparación de un determinado evento/daño. Este tipo de desarrollos son importantes en la búsqueda de indicadores que permitan evaluar el desempeño de las empresas tanto en la prestación del servicio como en la atención de daños.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

La reparación de los eventos/daños en redes de distribución de agua, dentro de la gestión operativa de las empresas prestadoras del servicio, se ha convertido en una labor de gran importancia, dada el impacto económico asociado a dichos eventos, lo que obliga a la optimización de los recursos de personal, económicos, de materiales; esto orientado a garantizar una pronta y excelente atención del usuario final. De igual manera, dentro de la dinámica de las empresas prestadoras del servicio de acueducto, no se considera ese punto óptimo donde económicamente es viable reemplazar dichas tuberías que seguir reparándolas. Se requiere entonces de metodologías y herramientas que permitan gestionar y optimizar la operatividad de las redes de distribución con respecto al manejo de los daños.

La investigación desarrollada se enmarcaba en el área de cobertura del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P., que corresponde a los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón., así como en el seguimiento de los procesos operativos y estructura organizacional de esta prestadora del servicio

Por ende, a partir de estos planteamientos, el proyecto se enmarca dentro del siguiente problema de investigación: ¿Cómo gestionar y optimizar la operatividad de las redes de distribución con respecto al manejo de los daños?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar algoritmos y metodologías orientadas a mejorar el conocimiento sobre el sistema de distribución del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P., a partir de información que permita optimizar la atención de daños y la implementación de modelos de mantenimiento preventivo-predictivo, como parte de una gestión integral de redes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar los conceptos de “Fuga Abierta” y “Fuga Contenida”, como mecanismo para priorizar la atención correctiva de daños en las redes de distribución de agua.
- Desarrollar una herramienta computacional que permita establecer los cierres necesarios para aislar una determinada zona, usuarios afectados y costos asociados, a partir del uso de Sistemas de Información Geográfica y modelos hidráulicos de las redes de distribución de agua.
- Implementar un modelo matemático que permita predecir la tasa de daños anual de la red de distribución, integrando los Sistemas de Información Geográfica y las características físicas de las tuberías, así como los daños históricos, a través de análisis estadístico multivariado.

3. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto es novedoso, dada la naturaleza del concepto de Gestión Integral de Redes, el cual es relativamente nuevo en el medio colombiano y latinoamericano, debido a la poca información disponible, a la falta de tecnología para procesarla y a que tradicionalmente se ha prestado principal atención a la implementación de procesos correctivos.

El proyecto desarrollado se enmarca dentro de la Fase II de la Metodología para la definición de Plano Óptimo de Presiones y Reducción de Agua No Contabilizada, la cual es una investigación adelantada desde el año 2004 hasta el 2008, de manera conjunta entre el amb S.A. E.S.P. y el Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados – CIACUA, de la Universidad de los Andes y corresponde a un proyecto pionero a nivel regional y representa un gran avance en el conocimiento y manejo de las redes de distribución; además que permitió el desarrollo de herramientas y metodologías innovadoras que permiten mejorar sustancialmente la respuesta del amb S.A. E.S.P. frente a cualquier suceso en las redes de distribución.

Se debe considerar que debido a la naturaleza del proyecto dentro de las empresas prestadoras del servicio de acueducto, de integrar las Tecnologías de la Información Geográfica y la modelación hidráulica, ayudará a reducir el tiempo de respuesta de los requerimientos de los clientes (usuario final), optimizar el seguimiento a la gestión operativa por medio de indicadores de gestión, crear programas para reducir las pérdidas de agua con base en información detallada y localizada, entre otros. Así mismo, lleva como beneficio que la información de la empresa sea conocida dentro de la misma y con otras entidades, que se comparta entre usuarios, evitando duplicidades y apareciendo sinergias entre distintas unidades. Al disminuir la redundancia se aumenta la productividad y se mejora la eficiencia general de la empresa. Una vez que el modelo de gestión está implementado y bien estructurado, debido a su carácter de integración y relacional, las inversiones son rentabilizadas a corto-mediano plazo.

En este sentido un modelo de gestión del daño, realizado a partir de un planteamiento de las necesidades presentes y futuras de la operación de la red, de sus características físicas y de unas condiciones de operatividad adecuadas, puede ser clave para garantizar en el futuro una gestión más eficiente del sistema. De igual manera el mantenimiento correctivo/preventivo/predictivo respaldado con herramientas de simulación, monitoreo y de gestión de la información, genera un valor agregado, tales como: aprovechar racional y equitativamente el recurso.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P.⁸

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P., es una Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios, de nacionalidad colombiano, de carácter mixto, estructurada bajo el esquema de sociedad por acciones.

El Acueducto se encuentra regulado por la Ley 142 de 1994, por las disposiciones que a sustituyan, modifiquen o reglamenten; por los estatutos del Acueducto y por las normas del Código de Comercio en lo pertinente a las sociedades anónimas. Su nombre está seguido por las letras E.S.P., que significan Empresa de Servicios Públicos.

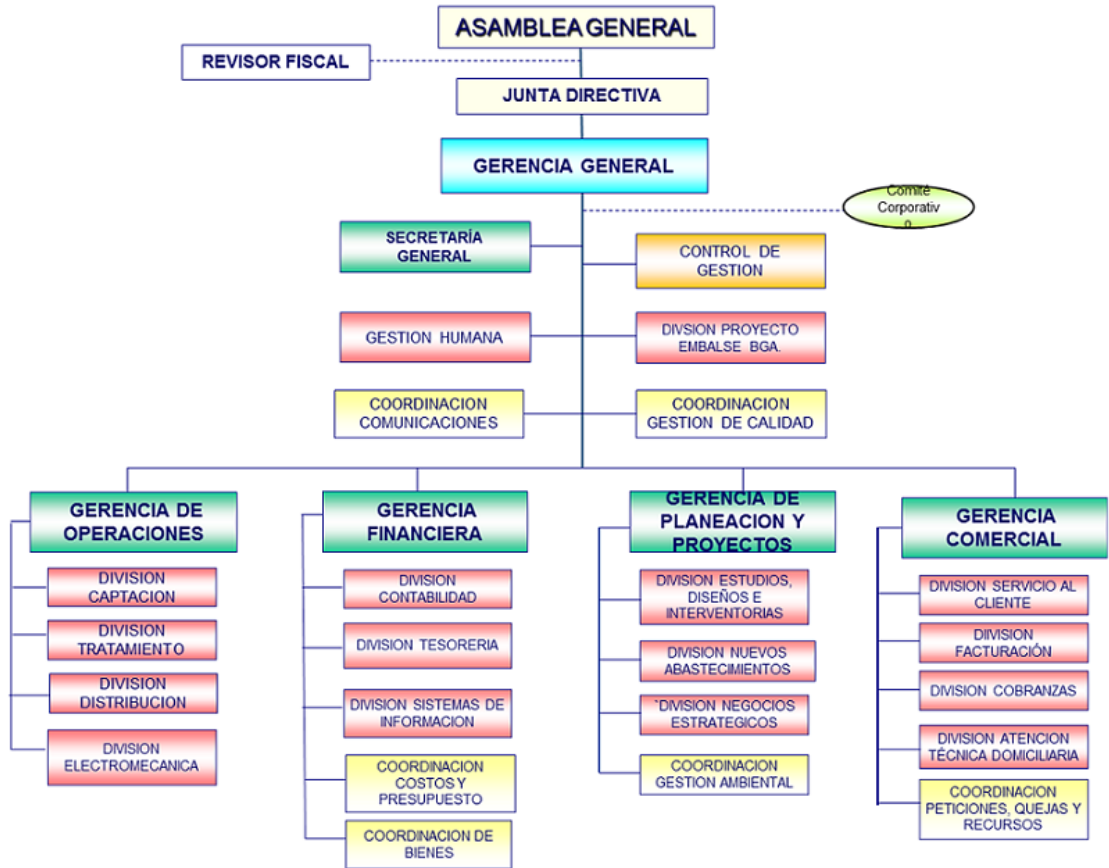
Su duración será de carácter indefinido, pero podrá disolverse y liquidarse en los casos y bajo los procedimientos establecidos por la Ley y en los estatutos del Acueducto.

4.1.1 Propósito Empresarial. El propósito del amb S.A. E.S.P. se centra en la prestación de los servicios domiciliarios de acueducto y saneamiento básico, así como las actividades complementarias al mismo en las localidades que integran el Área Metropolitana de Bucaramanga y demás municipios vecinos a los cuales se extienda la prestación de estos servicios, y, en general, en cualquier lugar del país o del exterior, que por vía contractual, se convenga en esta gestión.

4.1.2 Estructura Organizacional. La estructura organizacional del amb S.A. E.S.P., se ajusta a la conceptualización de áreas funcionales que comprenden los resultados de la gestión comunes, agrupados en unidades como producto de la ejecución de los procesos y procedimientos propios de las mismas.

⁸ ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA. [en línea]. Bucaramanga. 2006. [consulta: 20/06/2015]. Disponible en: <www.amb.com.co>

Figura 1. Estructura Organizacional amb S.A. E.S.P.



Fuente: ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA. Manual de Calidad M SGC 402-001 amb S.A. E.S.P.

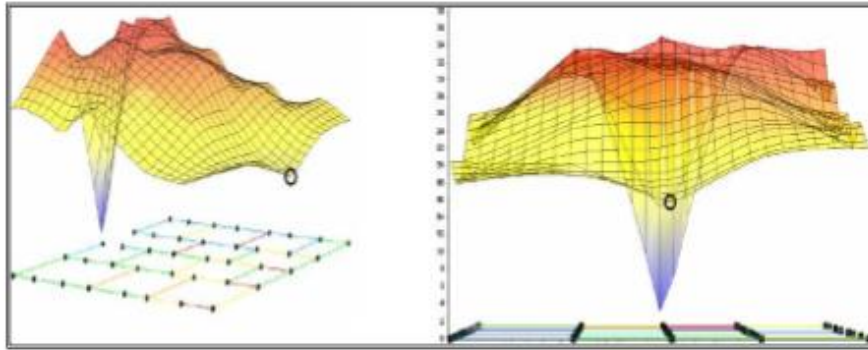
4.2 PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES: IDEA GENERAL

El Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), creó el concepto de plano óptimo de presiones y una metodología para su determinación. Se conoce como plano (aunque en realidad es una superficie) de presiones de una red a aquella superficie imaginaria que contiene todos los puntos (x,y,z) tales que z es la presión en el nodo de coordenadas (x,y) de la red. Obviamente para cada instante de tiempo la red refleja un determinado plano de presiones.

Con base en la premisa que los ingresos máximos para las empresas prestadoras del servicio se obtienen cuando se minimizan las pérdidas técnicas de agua (causadas por las fugas no visibles, estallidos y conexiones clandestinas), se define el plano óptimo de presiones como aquel plano que hace minimizar las pérdidas técnicas, sin afectar en forma apreciable el volumen total de agua facturada, ni dejar de cumplir los niveles de presión mínima en los nodos, establecidos por las normas.

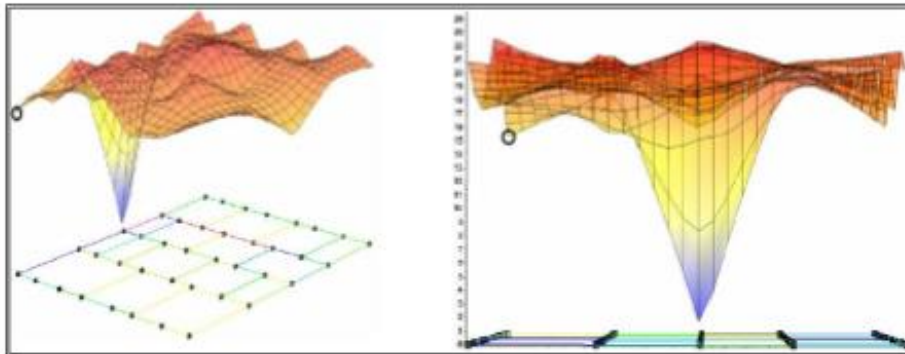
Así, el plano óptimo de presiones de una red de distribución se caracteriza por presentar valores de presión reducidos y uniformes en cada uno de sus sectores, ya que de esta forma se minimizan las pérdidas técnicas.

Figura 2. Plano de Presiones 1



Fuente: ARAQUE FUENTES, Diego A. Optimización de redes con el fin de uniformizar el estado de presiones. Bogotá, 2006. Trabajo de grado (Magíster en Ingeniería Civil). Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Disponible en el catálogo público en línea de la Biblioteca de la Universidad de los Andes <<http://biblioteca.uniandes.edu.co>>

Figura 3. Plano de Presiones 2



Fuente: ARAQUE FUENTES, Diego A. Optimización de redes con el fin de uniformizar el estado de presiones. Bogotá, 2006. Trabajo de grado (Magíster en Ingeniería Civil). Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Disponible en el catálogo público en línea de la Biblioteca de la Universidad de los Andes <<http://biblioteca.uniandes.edu.co>>

De acuerdo con lo anterior, la figura 3 muestra un plano de presiones que está más cercano a ser el plano óptimo de presiones de la red en cuestión. Obsérvese que ambas redes aseguran que la mínima presión (círculos negros) coincide con la permitida (15 m.c.a.)*. Partiendo de esta consideración, es evidente que la red más uniforme alcanzará una presión promedio más baja y en consecuencia menos fugas, lo que se traduce en una idea más cercana del concepto de plano óptimo.

* Un metro de columna de agua (m.c.a.) es una unidad de presión.

La metodología para la determinación del plano óptimo de presiones es la columna principal de una serie de metodologías específicas que se deben seguir para obtener los resultados esperados. Determinar el plano óptimo de presiones tiene como objetivo reducir y uniformizar la presión en cada sector en el que está dividida la red de distribución, sin afectar en forma apreciable el volumen facturado (consumos de los usuarios) y garantizando el valor mínimo reglamentario de presión.

4.3 FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

“Dejar escapar” el agua es un problema para la empresa prestadora del servicio, el usuario y el entorno. La magnitud de dicho “escape” se cuantifica con el índice de agua no contabilizada (IANC),

$$IANC[\%] = \frac{V_{ap} - V_{af}}{V_{ap}} * 100$$

Donde V_{ap} y V_{af} son los volúmenes de agua que la empresa produce y factura, respectivamente. En Colombia el IANC para el año 2008 se estimó en un promedio de 45%⁹, un valor considerablemente superior a la meta regulatoria de 30% establecida por la comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico (CRA). En contraste en Estados Unidos y Europa, el IANC normalmente está en el rango del 10% al 20%. Como valores promedio en Latinoamérica 42%, Asia 42%, África 39%¹⁰. En Colombia, del valor del IANC, aproximadamente un 40% es debido a errores de medición, un 35% corresponden a fugas y el restante aproximado 25% es debido a conexiones clandestinas, fraudes o robos.¹¹

Este trabajo considera el concepto de fugas como parámetro de priorización en la atención correctiva de daños sobre la redes de distribución. Desde la perspectiva del manejo de presiones como estrategia de reducción de fugas la premisa es, a mayores presiones mayores fugas. Las altas presiones, (i) promueven la generación de orificios y (ii) aumentan el caudal que sale por orificio ya formado.

La expresión general para el caudal de fuga descargado a la atmósfera a través de un orificio de área A, de pequeñas dimensiones y pared fina es,

⁹ Informe Anual de Servicios Públicos 2008. Superintendencia de servicios públicos domiciliarios.

¹⁰ Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua y del Saneamiento (PCM). Informe sobre la Evaluación Mundial del Abastecimiento de Agua y el Saneamiento en 2000. [consulta: 17/06/2015]. Disponible en: <http://whgqlibdoc.who.int/publications/2000/9243562029_5_spa.pdf>

¹¹ Artículo sig. [consulta: 17/06/2015]. Disponible en: <http://www.usaambiental.com/pdf/servicios_usa_change.pdf>

$$Q_f = C_d A \sqrt{2gH}$$

Siendo C_d el coeficiente de descarga (adimensional), g la aceleración y H la cabeza piezométrica que actúa sobre el orificio.

ROSSMAN Lewis (2000), el autor de Epanet*, sugiere que las fugas en redes de distribución sean modeladas a través de una ecuación de orificio que agrupa los parámetros $C_d, A, \sqrt{2g}$ en un único coeficiente C denominado coeficiente de emisor, para obtener:

$$Q_f = CH^a$$

Donde a es llamado exponente del emisor. De esta manera un valor de $a = 0.5$ representa una ecuación de orificios que tienen un área de sección constante. En caso contrario representará una ecuación de un orificio que tiene un área variable.

El coeficiente de emisor (C) refleja la dimensión y forma del orificio, y el exponente del emisor (a) refleja la elasticidad entre el área efectiva del orificio y la presión actual en él. En la literatura se encuentran muchas referencias sugiriendo utilizar un valor de $a=0.5$, sin embargo esa es una aproximación simple que admite un área de sección constante para el orificio. Se asocian valores de $a=0.5$ o al menos cercanos a los materiales más rígidos o menos flexibles, como el hierro, el acero o el asbesto cemento; y valores superiores cercanos a 2.5 para los más flexibles, como los materiales plásticos.

Hoy en día los emisores son fuertemente empleados para la simulación de fugas en las redes de distribución. No obstante, la asignación del coeficiente y exponente a un nodo de una red con buena exactitud, no es para nada una tarea fácil, pues el coeficiente de emisor de un nodo en una red, está relacionado con el número de fugas (o el área de fugas) por unidad de longitud de tubería, de todas las tuberías que llegan al nodo. Determinar y/o calibrar el coeficiente y el exponente de emisor en los nodos de una red de distribución, es una de las tareas previas base, para estimar razonablemente las fugas con el empleo de emisores.

4.4 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

En una red de distribución de agua potable, el mantenimiento correctivo se define como aquellas acciones que toman los operadores de dichas redes, para arreglar las fugas u otros daños que ocurran sobre las tuberías y demás elementos de la red, con el objetivo de mantener en operación el sistema. Se debe considerar que

* Es un software de modelación de redes hidráulicas de agua

muchas veces, estos daños son causados por el deterioro de los materiales, presiones altas, cambios en la operación del sistema, trabajos de construcción, desplazamiento del suelo y que cuyo árbol de llamadas inicia por intermedio de vecinos o personas afectadas directamente por el evento.

En el mantenimiento correctivo, los trabajos son planeados y realizados después de la ocurrencia del evento, por lo tanto siempre se debe contar con personal, vehículos y disponibilidad de materiales para realizar las operaciones. De igual manera algunas empresas prestadoras del servicio cuenta para dicho propósito con metodologías de optimización de tiempos y recursos. A partir de esto, se considera muy importante el uso de herramientas computacionales que combinen el conocimiento del personal experto y la modelación hidráulica junto con las Tecnologías de la Información Geográfica, de tal manera que se implementen algoritmos que den respuestas rápidas y precisas, para ayudar al personal de oficina a clarificar decisiones y realizar trabajos más óptimos.

4.5 IMPORTANCIA DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS COMO HERRAMIENTA DE CONTROL AL MANTENIMIENTO CORRECTIVO¹²

Cualquier herramienta computacional que sea desarrollada con el fin de dar soporte a las actividades de mantenimiento correctivo, debe incorporar como núcleo fundamental un modelo hidráulico del sistema, lo que permite ejecutar algoritmos que busquen entender y predecir el comportamiento de la red al realizar un cambio en el esquema operacional.

Los Modelos hidráulicos son esenciales tanto para el diseño como para la operación de las redes de distribución de agua; esto debido a que si las características y los estados de los elementos no son conocidas, no se puede plantear tomar decisiones optimas de operación. Uno de los componentes más importantes dentro de mantenimiento correctivo y que afecta el comportamiento hidráulico, son las válvulas, ya que permiten aislar tuberías que sufrieron un daño y que necesitan ser reparadas.

El software que se desarrolló como objetivo de esta problemática y de la presente tesis, asume que se tiene un completo conocimiento de cada válvula (en cuanto a su ubicación) y sus características.

De igual manera, para obtener resultados adecuados desde un modelo hidráulico, este último debe estar calibrado, lo que significa que las series de caudal y la presión medidas en campo deben representarse apropiadamente en el modelo.

¹² SALDARRIAGA J.G, OCHOA-RODRIGUEZ S, NIÑO CA, et al., 2009, Water distribution system corrective maintenance supported by real-time use of hydraulic models, Kansas City, USA, World Environmental & Water Resources Congress 2009: Great Rivers, Pages 1-11

Esto a partir del ajuste de parámetros del modelo como las demandas, fugas, pérdidas menores y coeficientes de rugosidad, entre otros; todos son específicos de cada modelo hidráulico.

El proceso de calibración debe ser completado con un excelente registro de los suscriptores, teniendo claro con ubicación espacial y las mediciones de la demanda, permitiendo no solo tener una localización acertada del consumo de agua, sino a su vez determinar la magnitud del daño en un elemento de la red y las afectaciones por ejemplo a nivel de la comunidad.

Cuando se tiene modelos completos y calibrados, se puede pensar en desarrollar e implementar algoritmos, metodologías y protocolos con el fin de mejorar la operación, mejorar la eficiencia, productividad y reducir costos, entre otras ventajas.

4.6 EL “TOOLKIT” DE EPANET

Epanet 2.0 es un programa de dominio público desarrollado por el Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos para realizar simulaciones hidráulicas y de calidad del agua en periodo extendido, en redes de tuberías presurizadas. Este paquete computacional es distribuido gratuitamente en dos formas: Ejecutable y código fuente (toolkit)¹³. La forma ejecutable es recomendable para estudios que envuelven simulaciones hidráulicas solamente.

El “kit de herramientas del programador de Epanet”, o simplemente toolkit de Epanet, es la biblioteca de enlace dinámico (DLL)¹⁴ epanet2.dll que distribuye gratuitamente la EPA. Dicha biblioteca contiene las funciones que ejecutan las más importantes tareas de Epanet, y que pueden ser llamadas o incorporadas en aplicaciones Windows escritas en C/C++, Delphi (Pascal), Visual C++, Visual Basic, o cualquier otro lenguaje de programación que pueda llamar funciones dentro de una DLL. Fue pensado para permitir desarrollar aplicaciones personalizadas que quieran hacer uso del motor de cálculo de Epanet.

Siguiendo las palabras del creador de Epanet, Lewis Rossman, epanet2.dll es una colección de funciones que pueden ser llamadas externamente, y que permiten personalizar la manera en que Epanet realiza sus cálculos. Esta biblioteca de funciones permite leer un INP*, cambiar y ajustar parámetros, hacer simulaciones múltiples bajo diferentes condiciones (tal como los problemas de optimización en

¹³ Disponibles en <<http://epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>>

¹⁴ Colaboradores de Wikipedia. DLL [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2009. [consulta: 01/04/15]. Disponible en <<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=DLL&oldid=31700027>>

* “Un INP” es un archivo con extensión .INP que contiene los datos que describen a una red.

la atención operativa de los daños), acceder a los resultados sobre la marcha mientras son computados y permiten generar reportes personalizados, etc.

4.7 METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE SOFTWARE

En los últimos años ha aumentado la cantidad y variedad de los procesos de desarrollo de software y se ha marcado una diferencia en el avance de dos corrientes en lo referente a las metodologías de desarrollo, las llamadas metodologías pesadas o ingenieriles y las metodologías ligeras o ágiles. A continuación se presentarán las metodologías de desarrollo ágiles, comenzando con sus inicios, características y diferencias con las metodologías pesadas.

4.7.1 La Alianza Ágil. Los valores que se enuncian en El Manifiesto Ágil, inspiraron los doce principios del manifiesto que se encuentran a continuación:

- Se le da la bienvenida a cambios en los requerimientos, incluso avanzado el desarrollo. Los procesos ágiles utilizan el cambio para la ventaja competitiva del cliente.
- Entregar software funcional frecuentemente, desde un par de semanas hasta un par de meses, con una preferencia a la escala de tiempo más corta.
- Las personas de negocios y los desarrolladores deben trabajar juntos diariamente durante todo el proyecto.
- Se debe construir proyectos con individuos motivados, darles el ambiente y la ayuda que necesitan y confiar en que terminarán el trabajo.
- El método más eficiente y efectivo de comunicación hacia y dentro del equipo de desarrollo es la conversación cara a cara.
- El software funcional es la principal medida de progreso.
- Los procesos ágiles promueven el desarrollo sostenible. Los patrocinadores, desarrolladores y usuarios deben ser capaces de mantener un paso constante indefinidamente.
- La atención continua a la excelencia técnica y el buen diseño mejoran la agilidad.
- Simplicidad – el arte de maximizar la cantidad de trabajo no hecho – es esencial.
- Las mejores arquitecturas, requerimientos y diseños emergen de equipos que se organizan a sí mismos.
- A intervalos regulares, el equipo reflexiona sobre cómo ser más efectivo, entonces ajusta su comportamiento.

4.7.2 Diferencias entre metodologías ágiles y no ágiles. Las metodologías tradicionales o ingenieriles imponen una disciplina de trabajo sobre el proceso de desarrollo del software, con el objetivo de conseguir un software más eficiente y predecible, para ello, se hace un especial hincapié en la planificación total de todo el trabajo a realizar y una vez que está todo detallado, comienza el ciclo de desarrollo del producto software.

El uso de estas metodologías se ha llevado a cabo desde hace tiempo y no ha habido en ningún caso ninguna experiencia traumática acerca de su uso. Pero aun así, han recibido diversas críticas, y la más común hace referencia a su carácter excesivamente burocrático.

Cuadro 1. Comparación entre metodologías ágiles y no ágiles

Metodologías Ágiles	Metodologías Tradicionales
Basadas en heurísticas provenientes de prácticas de producción de código.	Basadas en normas provenientes de estándares seguidos por el entorno de desarrollo.
Especialmente preparados para cambios durante el proyecto.	Cierta resistencia a los cambios.
Impuestas internamente (por el equipo)	Impuestas externamente.
Procesos menos controlados, con pocos principios.	Proceso mucho más controlado, con numerosas políticas/normas.
No existe contrato tradicional o al menos es bastante flexible.	Existe un contrato prefijado
El cliente es parte del equipo de desarrollo.	El cliente interactúa con el equipo de desarrollo mediante decisiones.
Grupos pequeños (menor de 10 integrantes) y trabajando en el mismo sitio.	Grupos grandes y posiblemente distribuidos.
Pocos roles	Más roles
Pocos artefactos	Más artefactos
Menos énfasis en la arquitectura del software	La arquitectura del software es esencial y se expresa mediante modelos.

Fuente: MOLPECERES, Alberto. Procesos de desarrollo: RUP, XP, FDD. 2003. [consulta: 10/02/2015]. Disponible en <<http://www.willydev.net/descargas/articulos/general/cualxpfdrrup.PDF>>

Cuadro 2. Resumen comparativo entre las principales características de RUP, XP, FDD

	RUP	XP	FDD
Tamaño de los equipos y proyectos	Proyectos y equipos muy grandes	Proyectos cortos y equipos más pequeños	Proyectos cortos y equipos más pequeños
Carga de trabajo	Pesada. Basada en la documentación	Ligera. Muy poca documentación	Intermedia. Más documentación que XP pero menos que RUP.
Relación con el cliente	Se presentan al cliente los artefactos del final de una fase y se valorarán las precondiciones par la siguiente (definición de riesgos, aceptación del plan de iteración, prototipos, etc.) y solo después de que el cliente acepte los artefactos generados	No se basa en formalismos en la documentación, sino en controles propios y una comunicación fluida con el cliente. A través de un ciclo de iteración corto (pocas semanas) el cliente está informado constantemente sobre la situación del proyecto y puede	No se basa en formalismos en la documentación, sino en controles propios y una comunicación fluida con el cliente. A través de un ciclo de iteración corto (pocas semanas) el cliente está informado constantemente sobre la situación del proyecto y puede

	RUP	XP	FDD
	se pasará a la siguiente fase.	intervenir rápidamente si el desarrollo se aleja de sus necesidades.	intervenir rápidamente si el desarrollo se aleja de sus necesidades.
Desarrollo	Basado en un proceso iterativo. Iteraciones largas.	Basado en un proceso iterativo. Iteraciones cortas.	Basado en un proceso iterativo. Iteraciones cortas.
Conocimiento sobre la arquitectura	Se intenta reducir la complejidad del software a producir a través de una definición y planificación intensiva.	Se consigue a través de la programación por parejas y se espera que la buena conexión entre ambos desarrolladores genere discusiones e intercambio de impresiones que lleven a mejores estructuras y algoritmos.	Se usan las sesiones de trabajo conjuntas en fase de diseño para intentar conseguir una arquitectura sencilla y sin errores y están más enfocadas al trabajo en conjunto que al intercambio de impresiones.
Código fuente	El código fuente tiene desarrolladores propietarios aunque definen grupos y sesiones de trabajo conjuntos de forma que los propietarios relacionados trabajen juntos, y la comunicación es directa.	Se comparte el código entre los desarrolladores ya que está pensado para equipos pequeños que trabajan conjuntamente y con comunicación constante e inmediata.	El código fuente tiene desarrolladores propietarios aunque definen grupos y sesiones de trabajo conjuntos de forma que los propietarios relacionados trabajen juntos, y la comunicación es directa.
Tamaño de los equipos y proyectos	Proyectos y equipos muy grandes	Proyectos cortos y equipos más pequeños	Proyectos cortos y equipos más pequeños

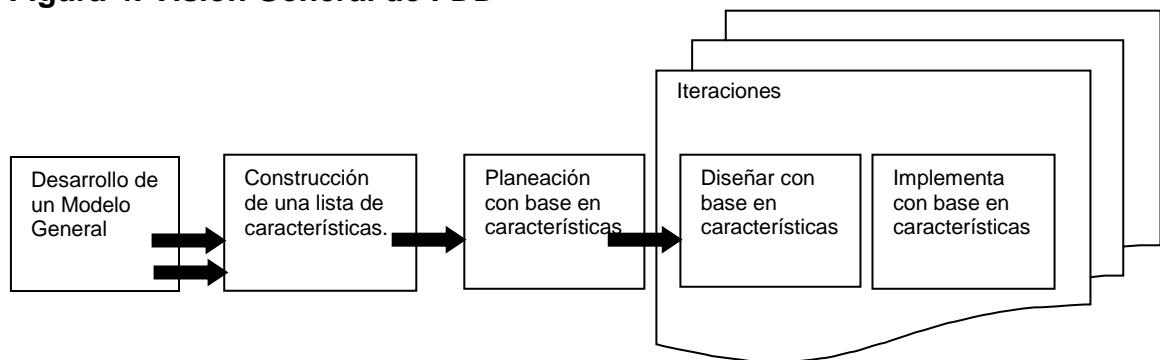
Fuente: MOLPECERES, Alberto. Procesos de desarrollo: RUP, XP, FDD. 2003. [consulta: 10/02/2015]. Disponible en <http://www.willydev.net/descargas/articulos/general/cualxpfdrrup.PDF>

4.7.3 Feature-Driven Development (FDD) o Desarrollo guiado por características. FDD fue diseñado y propuesto por Meter Coad, Jeff De Luca y la colaboración de Erich Lefebvre, y está orientado para ser utilizado en proyectos que posean un tiempo de desarrollo relativamente corto. Consta de un proceso iterativo con iteraciones cortas (aproximadamente de dos semanas) que producen un software funcional que el cliente puede ver y monitorear.

Las iteraciones se definen en base a features o características (también se suelen denominar como funcionalidades), que son pequeñas partes del software con significado para el cliente. FDD usa un modelo de cinco fases con la aceptación del cambio y la flexibilidad propia de las metodologías ágiles:

- Desarrollo de un modelo general: Esta es una fase breve. En ella se estructura de manera general el sistema y esto se realiza usando un sistema de notación de modelamiento común. La idea de esta fase es evitar profundizar mucho en los detalles del análisis. La finalidad de esta fase es proporcionar un modelo general que sirva como guía para la planeación de las características y su desarrollo.
- Construcción de una lista de características: Es la segunda fase, el modelo general realizado en la primera fase y la información obtenida con la alimentación del cliente produce una lista de características también llamadas funcionalidades. El alcance de estas características se debe diseñar de tal manera que se requieran aproximadamente dos semanas para desarrollarse. Si el desarrollo de las características es muy complejo, debe ser descompuesto.
- Planeación con base en características: En esta tercera fase, se utiliza el conjunto de características obtenidas en la fase anterior, y este es usado para crear el orden y los ciclos de desarrollo de las mismas.
- Diseñar con base a las características: Para cada conjunto de características o funcionalidades obtenidas como resultado de las fases anteriores, el programador principal desarrolla los diseños correspondientes. Estos deben ser una guía para el desarrollo de las características llevándolas a código según el lenguaje y tecnología que se utilice.
- Implementar con base en características: En esta última fase, el equipo de desarrollo implementa las características según fueron planeadas y esto debe incluir la inspección del código y su depuración, probando esa cada parte desarrollada y su integración con el sistema que se encuentre a cada momento construido.

Figura 4. Visión General de FDD



Fuente: MOLPECERES, Alberto. Procesos de desarrollo: RUP, XP, FDD. 2003. [consulta: 10/02/2015]. Disponible en <http://www.willydev.net/descargas/articulos/general/cualxpfddrup.PDF>

Las primeras tres fases se ejecutan secuencialmente al inicio y las dos últimas se ejecutan de manera iterativa durante la mayor parte del desarrollo del proyecto, tiempo durante el cual las tres primeras fases también se ejecutan según las

necesidades de realización de un proceso de refinamiento de los resultados obtenidos en las mismas.

En el proceso de implementar las características también se contemplan como partes del mismo la preparación y ejecución de pruebas, así como revisiones del código e integración de las partes que componen el software.

4.8 MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE EN DATOS ESPACIALES¹⁵

El análisis de regresión permite modelar, examinar y explorar relaciones espaciales para entender mejor los factores de los patrones espaciales observados y predecir resultados basados en ese entendimiento.

Las regresiones múltiples son un procedimiento de ajuste general de un modelo que represente una relación entre una variable dependiente (f), y unas variables independientes (X_1, X_2, \dots, X_n) usadas para la predicción. La forma general de este modelo es:

$$f = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n$$

Donde, f es la variable que representa el proceso que se está intentando modelar o predecir y que aparece al lado izquierdo del signo igual.

Las variables $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, son los coeficientes de regresión y reflejan la relación y fuerza de cada variable exploratoria con respecto a la variable dependiente y son estimados usando funciones de costo.

Las variables $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, son conocidas como independientes/explicativas/predictoras e influyen o explican la variable dependiente f y son usadas al lado derecho del signo igual.

El signo (+/-) asociado con el coeficiente (uno para cada variable explicatoria) indican si las relaciones son positivas o negativas. Si se estuviera modelando el consumo de agua residencial y se obtiene un coeficiente negativo para la variable "número de personas que viven allí", por ejemplo, significaría que a medida que el número de personas que habitan el inmueble disminuye el consumo de agua igualmente disminuye.

La estimación por mínimos cuadrados es una de las funciones de costo cuyo objetivo es minimizar la suma de variaciones cuadradas de los valores reales de la

¹⁵ ABDELWAHAB M.; ELSHAFIE A y JAAFAR O. Performance improvement for pipe breakage prediction modeling using regression method. En: International Journal of the Physical Sciences. Malasia. 6 Vol. (23 Octubre de 2011); p. 6025-6035. ISSN 1992-1950. Disponible en: <<http://www.academicjournals.org/IJPS>>

variable dependiente con respecto a los valores predichos por el modelo. Sin embargo, no se puede obtener una predicción perfecta y usualmente hay diferencias entre el valor actual (y) y el valor predicho (f). Esta falta de precisión se atribuye a la gran cantidad de variables inciertas que afectan el proceso de predicción. Esta variación o error en la predicción es conocida como “residual”*. El ajuste del modelo depende de los residuales y es medido usando el coeficiente de ajuste (R^2), definido de la siguiente manera:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{err}}{SS_{tot}}$$

En el cual,

$$SS_{tot} = \sum_i (y_i - y^-)^2,$$

$$SS_{err} = \sum_i (y_i - f_i)^2,$$

$$y^- = \frac{1}{n} \sum_i^n y_i,$$

Donde SS_{tot} es la suma total de los cuadrados y SS_{err} es la suma de los cuadrados de los residuales. y_i y f_i son el valor observado o actual y el valor predicho, respectivamente, n es el número de valores observados. y^- es el promedio de los valores observados.

La estimación por mínimos cuadrados asume las variaciones de los residuales alrededor de la línea de regresión** es la misma a través de todos los valores de la variable independiente.

En muchas ocasiones, los modelos de regresión no se ajustan a los datos y el proceso iterativo falla. En dichos casos, existen algoritmos y criterios que pueden ser utilizados para minimizar la función de costo, a fin de establecer los coeficientes que se ajusten de mejor manera.

Finalmente y después de estimar los coeficientes de regresión, es necesario examinar el ajuste del modelo en su totalidad y esto se puede realizar trazando los valores actuales versus los valores predichos, es una manera de inspeccionar el modelo. El Coeficiente de Correlación, Error Medio Cuadrático (MSE) y el Coeficiente de Determinación (R^2) son usados ampliamente como evaluadores del desempeño del ajuste de los modelos predictivos.

* La porción de la variable dependiente que no es explicada por el modelo, el error del modelo lo que está por debajo o por encima de las predicciones, denotado como error aleatorio

** permite pronosticar la puntuación que alcanzará cada sujeto en una variable Y conociendo su puntuación en otra variable X. A la variable Y se le denomina criterio y a la variable X predictor. La recta de regresión es la línea que mejor se ajusta a la nube de puntos para dos variables X e Y, es decir, la que permitiría minimizar el error medio cometido al hacer los pronósticos como si la nube de puntos tuviera una forma lineal.

Además de cumplir los supuestos del modelo de regresión simple, se deben cumplir los siguientes supuestos:

- Puede existir relación de dependencia lineal entre las variables independientes pero su correlación no debe ser perfecta, es decir, no debe haber multicolinealidad.
- El número de observaciones de la muestra supera el número de variables independientes o explicativas.

A continuación se presenta un resumen de los principales aspectos de algunos de los supuestos del modelo de regresión, los problemas que ocasiona el incumplimiento de ellos, y la forma de detectarlos.

- Los errores tienen distribución normal, con media cero y varianza constante. Este supuesto no es esencial si el objetivo es únicamente la estimación. Independientemente que se cumpla este supuesto o no los estimadores son insesgados. No obstante, con el supuesto de normalidad, los estimadores de regresión tienen distribución normal y se pueden utilizar las pruebas t y F para evaluar las diferentes hipótesis estadísticas, independientemente del tamaño de la muestra.

Si los errores no tienen distribución normal, las pruebas t y F continúan siendo válidas para muestras grandes, no así para muestras pequeñas.

- No debe existir multicolinealidad entre las variables explicativas o independientes, lo que implica la existencia de una relación lineal “perfecta o exacta” entre algunas o la totalidad de las variables independientes de un modelo de regresión.
- Homocedasticidad. Significa que todos los errores de la función de regresión tienen la misma varianza.
- Uno de los supuestos importantes del modelo de regresión lineal es que los errores (e_i) son aleatorios o no correlacionados. Si se viola este supuesto, se tiene el problema de correlación serial o autocorrelación*. A través de la herramienta *Spatial Autocorrelation (Morans I)* del paquete de software ArcGIS, la autocorrelación espacial se calcula en base a las ubicaciones de las entidades y los valores de atributos, evaluando si el patrón expresado está agrupado, disperso o aleatorio.

* Se define como la correlación entre los miembros de una serie de observaciones ordenadas en el tiempo o en el espacio.

4.9 METODOLOGÍA PARA MANTENIMIENTO PREVENTIVO-PREDICTIVO¹⁶

Independientemente de los esfuerzos a nivel mundial con el transcurrir de los años, orientados a mejorar los materiales y las técnicas constructivas de los sistemas de distribución y transporte de agua potable, la presencia de eventos tales como los daños es una realidad que se encuentra lejos de desaparecer. Hay que considerar que a medida que la población y las demandas de agua aumentan, las redes se exigen cada vez en mayor proporción y se hacen más vulnerables. A partir de esta premisa, se hace énfasis en la implementación de programas de manejo predictivo-preventivo de daños, como tarea prioritaria dentro de las actividades de una empresa prestadora del servicio de acueducto, dado que permitirá anticiparse a los eventos, lo que hará posible minimizar la tasa de daños en la red.

Sin embargo, como se verá más adelante, el desarrollo de modelos predictivo-preventivos es una labor que apenas comienza a nivel mundial. Es por esta razón, que durante algún tiempo será necesario corregir los daños una vez sucedan, esquema que se conoce como atención correctiva.

La tasa de daños en las tuberías de la red de distribución tienden a incrementarse con el tiempo al igual que decrece la capacidad y calidad del sistema, trayendo consigo consecuencias de orden económico para las prestadoras del servicio y que se representan a través de pérdidas por agua tratada y no consumida, inconformidad de clientes, sobrecostos de reparación, etc.

Dentro de los proyectos se encuentran grandes problemas en la información con la que se cuenta; como consecuencia en la literatura se proponen metodologías simplificadas que contribuyen a determinar los tasa de daños sobre las tuberías.

Según KLEINER y RAJANI (2001), el deterioro de tuberías se puede clasificar en: 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; y el deterioro en la superficie interna, que tiene como consecuencia la reducción en capacidad, calidad del agua e incluso el deterioro estructural. Estos conceptos llevaron al desarrollo del cuadro presentado a continuación.

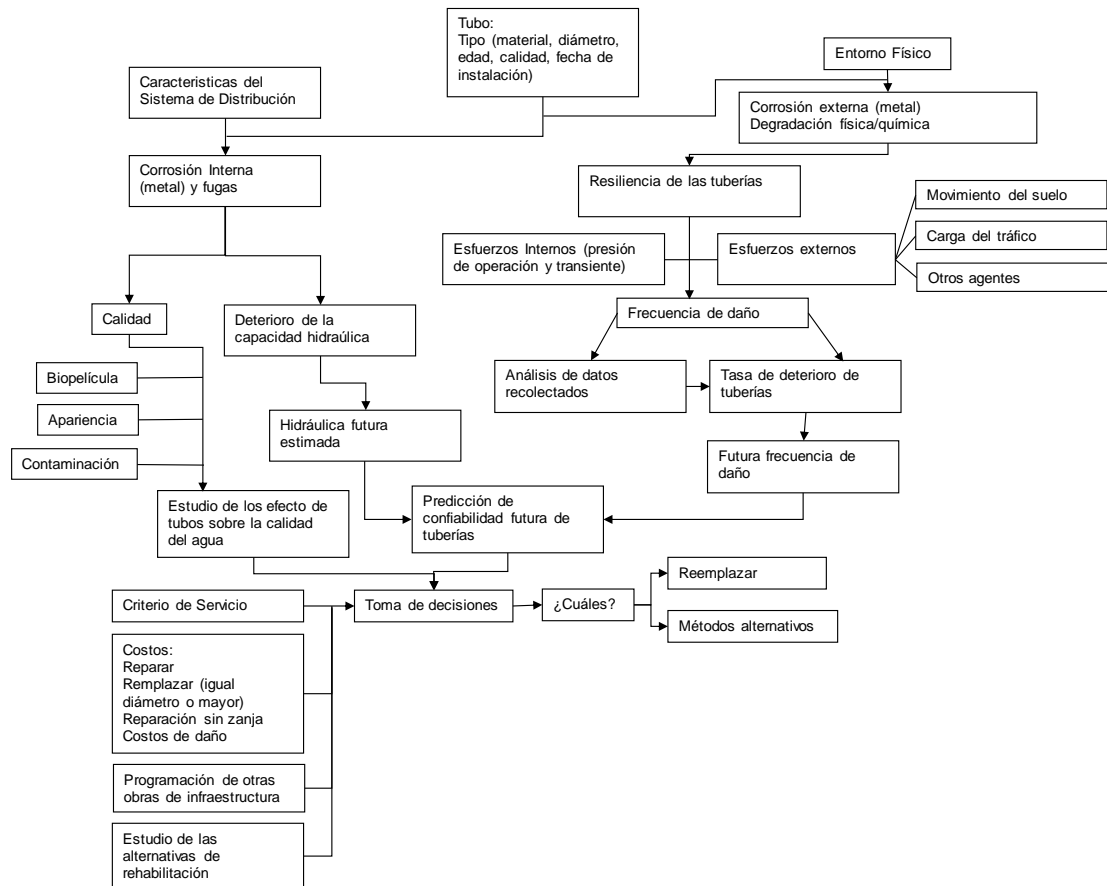
Corresponde a la interpretación de las causas y procesos que se encuentran alrededor de los daños de tuberías, además de las variables y aspectos a

¹⁶ "Metodología para la definición de plano óptimo de presiones y reducción de agua no contabilizada". Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Tomo I. 2008

* La resiliencia es una medida de confiabilidad hidráulica

considerar en metodologías que estimen tasas de daños y generen recomendación de rehabilitación de la red.

Figura 5. Diseño metodológico para el mantenimiento preventivo-predictivo



Fuente: KLEINER; RAJANI. Diseño Metodológico para el mantenimiento preventivo-predictivo. 2001. En: "Metodología para la definición de plano óptimo de presiones y reducción de agua no contabilizada". Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Tomo I. 171 p. 2008

4.9.1. Causas de las fallas en las tuberías¹⁷. Existen factores físicos muy importantes que contribuyen al fallo en las tuberías. Los cuales se consideran pueden ser determinados por una simple inspección en el material de la tubería, sin embargo hay otros factores que requieren un análisis más profundo. La siguiente tabla presenta un resumen de las causas más comunes de los fallos en las redes de distribución de agua potable.

Cuadro 3. Causas típicas de fallas y daños en redes de distribución de agua potable

Criterio de Fallo	Ejemplos
Tipo de material	Hierro Fundido vs PVC
Dimensiones de la tubería	Longitud, diámetro y forma
Construcción	Defectos e irregularidades
Edad de las tuberías	Años de servicio y fecha de instalación
Fuerzas Externas	Carga de edificios, cobertura del suelo, nieve y tráfico.
Fuerzas Internas	Presión y Flujo dentro del sistema de tuberías
Variaciones del clima	Expansión y contracción debido a cambios de temperatura
Ambiente del suelo	Alcalinidad
Localización	Relacionado a otras utilidades estructurales o fallas sísmicas activas

Fuente: SHRIDHAR YAMIJALA. Statistical Estimation of Water Distribution System Pipe Break Risk. Texas (USA), 2007. Trabajo de Grado de Maestría. Universidad de Texas A&M. [Consulta: 18/05/2015]. Disponible en el catálogo público en línea de la Biblioteca de la Universidad de Texas A&M. <<http://reposotory.tamu.edu.co>>

Hay estudios que muestran que existen otros mecanismos que pueden contribuir a los fallos de las tuberías. Por ejemplo el reporte titulado “Predicting the Failure Performance of Individual Water Mains” escrito por Ken Mavin en 1996, menciona otras causas asociadas, tales como:

- Pobre almacenamiento y manipulación, que da como resultado en la deformación, agrietamiento y otros daños físicos al revestimiento de la tubería antes de la instalación.
- Instalación mal realizada, que trae como resultado una incorrecta colocación, montaje y cobertura de suelo.
- Impacto del daño, resultante desde la instalación del equipamiento hasta la carga de la variable de tráfico.
- Erosión del suelo que causa pérdidas en la cobertura de suelo como un resultado de inundaciones de aguas subterráneas o lluvias.

¹⁷ SHRIDHAR YAMIJALA. Statistical Estimation of Water Distribution System Pipe Break Risk. Texas (USA), 2007. Trabajo de Grado de Maestría. Universidad de Texas A&M. [Consulta: 18/05/2015]. Disponible en el catálogo público en línea de la Biblioteca de la Universidad de Texas A&M. <<http://reposotory.tamu.edu.co>>

4.9.2. Clasificación de las fallas de tuberías¹⁸. Las redes de distribución de agua potable normalmente experimentan dos maneras de falla bajo una operación normal. Aunque la magnitud de la falla de la tubería puede variar dependiendo el caso, se puede decir que típicamente ocurren en forma de rotura o de fuga a través de la estructura física de la tubería. Acorde con una publicación de la Universidad Texas A&M, se usa el término “break” (Rotura) y “leak” (Fuga), para distinguir los niveles de urgencia entre diferentes fallas de las tuberías.

Cuadro 4. Diferencias entre roturas y fugas de tuberías.

	Roturas	Fugas
Detección	Fácil de identificar por las condiciones a nivel del suelo y la presión del agua.	Difícil de detectar, se requiere equipo especializado para ello.
Impacto en el servicio	Alta probabilidad de la interrupción del servicio	Baja probabilidad de la interrupción del servicio
Ocurrencia	Típica alrededor de la longitud de la tubería.	Usualmente encontrado en los accesorios de la tubería.
Urgencia en la reparación	Requiere atención inmediata	Las reparaciones pueden ser programadas

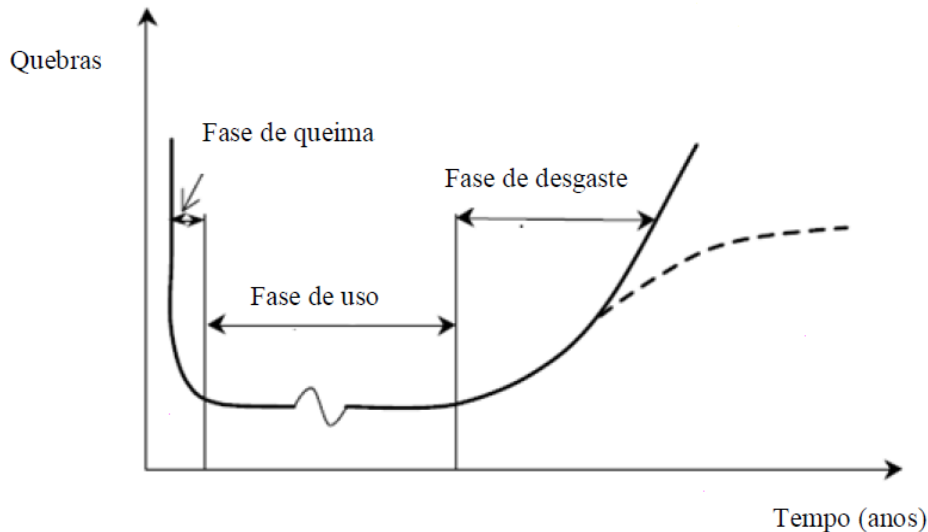
Fuente: Mays, W.L. 2000. Water Distribution Systems Handbook. American Water Works Association. New York: McGraw-Hill

El objetivo es desarrollar e implementar un modelo de gestión que puede pronosticar satisfactoriamente la ocurrencia de las fallas en las tuberías antes de que ocurran, con el fin de evitar catástrofes e interrupciones en el servicio de acueducto.

4.9.3 Teoría de frecuencia de daños. De acuerdo con Kleiner y Rajani, el ciclo de vida de una tubería en términos de su tasa de daño y deterioro presenta tres fases (Ver Figura). La primera se denomina “ajuste” y corresponde al periodo después de la instalación, donde los daños ocurren principalmente, como resultado de problemas de instalación o problemas en las tuberías. Después de que el sistema es “purgado” de estos daños, se entra a la fase en la que la tubería opera sin mayores problemas. Los pocos daños se deben a circunstancias extremas, exceso de cargas, interferencias, etc. La tercera fase es el “desgaste”, se caracteriza por un incremento en la tasa de daños que se deben al 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.

¹⁸ SHRIDHAR YAMIJALA. Statistical Estimation of Water Distribution System Pipe Break Risk. Texas (USA), 2007. Trabajo de Grado de Maestría. Universidad de Texas A&M. [Consulta: 18/05/2015]. Disponible en el catálogo público en línea de la Biblioteca de la Universidad de Texas A&M. <<http://repository.tamu.edu.co>>

Figura 6. Ciclo de vida de una tubería instalada



Fuente: KLEINER; RAJANI. Curva de comportamiento del ciclo de vida de tuberías cerradas. 2001. En: GUATÉRIO, F. Determinación del tiempo óptimo de sustitución de tuberías en sistemas de abastecimiento de agua. Brasil. 2009. 20 p. Trabajo de grado (Ingeniería Sanitaria y Ambiental). Universidad Federal de Santa Catarina, Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Disponible en: <<http://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/124386/97.pdf?sequence=1>>

Para el análisis de los datos históricos de daños se emplean modelos determinísticos que buscan predecir las tasas de daños. Se fundamentan en factores operacionales, de la ubicación, tipo de tubería, etc. Para el análisis que se debe hacer previamente "... estos grupos deben ser homogéneos y uniformes con respecto a dichos factores..."¹⁹. Otros modelos son probabilísticos multivariados; estos pueden considerar explícitamente todas las variables en el análisis. Como consecuencia, son más certeros, sin embargo, requieren mejor grado de información. Por último, existen los modelos probabilísticos de una variable, que utilizan análisis probabilísticos sobre datos agrupados para estimar la probabilidad de vida de una tubería, probabilidad de daño y probabilidad de concentraciones en zonas específicas.

4.9.4 Modelo Lineal. El modelo lineal fue inicialmente empleado por Kettler & Goulter en 1985. Requiere la siguiente información: longitud de tubería, fecha de instalación e historia de los daños. Dada su simplicidad es esencial contar con la previa formación de grupos homogéneos a partir de: tipo de tubería, diámetro, suelo, tipo de daño, etc.

¹⁹ KLEINER; RAJANI. Diseño Metodológico para el mantenimiento preventivo-predictivo. 2001. En: "Metodología para la definición de plano óptimo de presiones y reducción de agua no contabilizada". Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Tomo I. 171 p. 2008

La ecuación del modelo es la siguiente:

$$N = k_0 \text{Edad}$$

Donde K_0 corresponde al parámetro de regresión y N al número de daños al año.

4.9.5 Modelo Exponencial. El modelo exponencial fue inicialmente desarrollado por Shamir & Howar en 1979 y sigue siendo empleado en nuevos análisis de rehabilitación; la ecuación se presenta a continuación.

$$N(t) = N(T_0) * e^{A(t-t_0)}$$

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].

4.9.6 Otros modelos²⁰. Jacobs and Karney (1994), aplicaron un modelo de predicción de la tasa de ocurrencia de daños, teniendo como zona de estudio la ciudad de Winnipeg, Canadá, estimando la probabilidad de ocurrencia de un día sin daños en las tuberías. A partir de esto desarrollaron una ecuación de regresión lineal haciendo uso de información de 390 km de tuberías, en este caso de 150 mm de diámetro y Hierro Fundido, clasificadas por grupos homogéneos según las edades de dichas tuberías (0-18,19-30 y >30 años), para un total de 3550 daños. La ecuación que explica el desarrollo del modelo es la siguiente:

$$P' = a_0 + a_1 \text{lenght} + a_2 \text{Age}$$

Donde P' , es la probabilidad recíproca de un día sin daños en la red y a_0 , a_1 , y a_2 son los coeficientes de regresión.

El modelo de Clark Et al. en 1982, incluye un modelo que parte del número de eventos por mantenimientos y reparaciones con el objeto de determinar la edad de la tubería hasta la primera reparación; para desarrollar el modelo se parte de dos premisas: a) entre la instalación de la tubería y el primer evento por mantenimiento, transcurrirá un largo periodo de tiempo, b) el número de eventos tiende a incrementarse exponencialmente después del primer evento. Las dos ecuaciones desarrolladas son:

$$NY = 4.13 + 0.338D - 0.22P - 0.265I - 0.0983RES - 0.0003LH + 13.28T$$

²⁰ WANG, Y.; MOSELHI O.; ASCE F. y ZAYED T. Study of the suitability of existing deterioration models for water mains. 2009. En: Journal of performance of constructed facilities. [consulta: 18/05/2015]

Donde NY, es el número de años desde la instalación hasta la primera reparación, D es el diámetro de la tubería en pulgadas, P es la presión absoluta dentro de la tubería, I es el porcentaje de tubería cubierta por desarrollos industriales en un camino censado, RES es el porcentaje de tubería cubierta por desarrollos residenciales en un camino censado, LH representa la longitud de tubería en un suelo altamente corrosivo y T es el tipo de tubo (1 = metálico, 0 = concreto).

$$REP = (0.1721)(e^{0.7197})^T(e^{0.0044})^{PRD}(e^{0.865})^A(e^{0.0121})^{DEV}SL^{0.014}SH^{0.069}$$

Donde REP es el número de reparaciones, PRD la presión diferencial, A es la edad de la tubería desde el primer daño, DEV es la porción de tierra sobre el tubo con suelo calificado en baja o moderada corrosión, SL es el área de la superficie de la tubería en suelo corrosivo bajo y SH es el área de la superficie de la tubería en suelo corrosivo alto.

Estas ecuaciones deben ser aplicadas a cada tubería con el fin de estimar el número de daños para un periodo de tiempo, aunque en los casos de estudio aplicados, los resultados muestran un coeficiente de determinación R^2 del 0.23 y 0.47 para NY y REP respectivamente.

Adicionalmente a los citados modelos, existen otros trabajos orientados al deterioramiento de las redes de distribución de agua, y aunque no sean discutidos en este documento, la siguiente tabla muestra las limitaciones de algunos de ellos.

Tabla 1. Ventajas y limitaciones de modelos existentes

Tipo	Uso y Ventajas	Limitaciones
Shamir and Howard 1979	<ol style="list-style-type: none"> Es usado para predecir la tasa de daños en grupos homogéneos de tuberías. Fácil de implementar si los grupos homogéneos pueden ser formados, y sirve para análisis económicos 	<ol style="list-style-type: none"> Solo considera el tiempo como una variable independiente. Se asume la homogeneidad de los grupos de tuberías, lo cual no es fácil de formar.
Walski and Pelliccia 1982	<ol style="list-style-type: none"> Similar a Shamir & Howard 1979 	<ol style="list-style-type: none"> Similar a Shamir & Howard 1979
Jacobs and Karney 1994	<ol style="list-style-type: none"> Usado para estimar la probabilidad de una día sin daños en la red. 	<ol style="list-style-type: none"> Necesita tener información precisa de las fechas de los daños. Solo fue aplicado en la ciudad de Winnipeg (Canadá)

Tipo	Uso y Ventajas	Limitaciones
Clark et al. 1982	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identifica dos estados de deterioramiento: número de años hasta la primera reparación. 2. Determina el número acumulado de reparaciones luego del primer evento. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Un R^2 relativamente bajo de (0.23 y 0.45) 2. Aplicado a tuberías de grandes longitudes.
McMullen 1982	<ol style="list-style-type: none"> 1. Considera la corrosión del suelo, el pH en la predicción del número de años hasta el primer año. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Los datos normalmente no están disponibles. 2. Las condiciones del suelo cambian con el tiempo 3. El monitoreo continuo de dichos parámetros no sería práctico.

Fuente: WANG, Y.; MOSELHI O.; ASCE F. y ZAYED T. Study of the suitability of existing deterioration models for water mains. 2009. En: Journal of performance of constructed facilities. [consulta: 18/05/2015]

4.10 ANTECEDENTES

4.10.1 Antecedentes en el amb S.A. E.S.P. Se ha hecho hincapié en el concepto de Gestión Integral de Redes y lo novedoso del mismo dentro del ámbito colombiano y latinoamericano, acusado esto a la falta de información disponible, a no disponer de tecnología para procesarla y a que tradicionalmente se ha prestado principal atención a la implementación de procesos correctivos dentro de las empresas prestadoras del servicio de acueducto.

El presente proyecto se enmarca en una investigación desarrollada de manera conjunta entre el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. y el Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados – CIACUA de la Universidad de los Andes y corresponde a un proyecto pionero que representa un gran avance en el conocimiento y manejo de las redes del Área Metropolitana de Bucaramanga; a partir del desarrollo de metodologías y herramientas innovadoras que mejoran sustancialmente la respuesta de la Empresa frente a cualquier evento en dichas redes.

Los esfuerzos conjuntos entre el amb S.A. E.S.P. y la Universidad de los Andes se remontan al mes de febrero de 2004, cuando la Gerencia de Operaciones, a través su Gerente, el Ingeniero William Ibañez y el Ingeniero Juan Saldarriaga, Profesor Titular de la Universidad de los Andes, iniciaron una serie de reuniones en las cuales se fijó un plan de trabajo de acuerdo a las principales necesidades de la empresa para ese entonces, enmarcadas en el proyecto “Metodología para

la definición del Plano Óptimo de Presiones y Reducción de Agua No Contabilizada- Fase I”.

Durante la Fase I del proyecto se centraron todos los esfuerzos en un sector de la ciudad de Bucaramanga, conocido como Distrito Estadio, el cual está delimitado al norte por la Calle 1, al sur por las calles 45 y 53, al oriente por las carreras 22 y 17 y al occidente por las laderas.

El distrito Estadio alberga en su interior aproximadamente 20.111 suscriptores* pertenecientes a todos los estratos socioeconómicos, que lo convierten en una de las zonas más grandes de la ciudad. Las redes de distribución en esta zona alcanzan unos 48 km de tubería**, en diámetros que van desde 1” hasta 24”, en distintos materiales como el PVC, el polietileno, hierro fundido, hierro galvanizado, asbesto cemento, entre otros.

La primera labor realizada durante la Fase I fue la construcción de un grupo de modelos hidráulicos preliminares a partir de los planos topológicos y los consumos históricos de la zona. A partir de actividades como la instalación de estaciones reguladoras se lograron controlar eficazmente las presiones de gran parte de la ciudad, lo que se vio reflejado en una disminución de daños y de pérdidas de tipo técnico.

Posteriormente se realizaron ciclos de macromedición de caudales y presiones en todo el distrito, que sincronizados con lecturas de micromedidores, permitieron establecer el Índice de Agua No Contabilizada en la zona.

Mediante el ajuste del estado de las estaciones reguladoras de presión, se disminuyeron de forma paulatina las presiones en todo el sistema, hasta llegar al punto mínimo, en el cual era posible brindar un servicio adecuado a todos los suscriptores.

Todo este proceso se basó en los resultados alcanzados durante la simulación hidráulica, para lo cual fue necesario realizar un proceso de calibración con las mediciones obtenidas. A través del proceso de calibración se encontraron y corrigieron algunas inconsistencias en el catastro de redes y demás problemas considerables de pérdidas técnicas y comerciales.

Una vez concluida la Fase I del proyecto, el amb S.A. E.S.P. vio la necesidad de investigar a fondo los procesos relacionados con la gestión y atención de los daños, al mismo tiempo que se buscaba expandir la modelación hidráulica a la totalidad de la ciudad y la Red Matriz. Fue de esta forma que a mediados del mes

* Suministrados por el Sistema Integrado de Información SII++ del amb S.A. E.S.P.

** Suministrado por el Sistema Integrado de Información y Digitalización de Redes SIIDAR del amb S.A. E.S.P.

de Julio de 2006 se dio inicio a la Fase II del convenio conocida como Gestión Integral de Redes, fundamento del presente proyecto.

Durante la Fase II se realizó un completo diagnóstico a todos los elementos que componen la gestión del daño dentro de la empresa, buscando estrategias y alternativas para mejorar el proceso, como un primer paso importante para alcanzar la Gerencia Integral de la Red.

Por otro lado, se introdujeron nuevos conceptos como el del modelo predictivo-preventivo de mantenimiento, que combina toda la información relacionada con el suelo en que se encuentran instaladas las redes, con las características físicas de las mismas y sus presiones. A través de análisis estadísticos multivariados, se establecen relaciones que permitan determinar las zonas que requieren de manera prioritaria acciones correctivas o de mantenimiento.

De igual forma orientar los procesos hacia el uso de las Tecnologías de Información Geográfica y la modelación hidráulica, para definir la prioridad en la que deben atenderse los daños.

4.10.2 Antecedentes del CIACUA con otras empresas prestadoras de servicios públicos. A pesar de lo novedoso del presente proyecto, durante la última década algunas de las principales empresas prestadoras del servicio de agua potable han adelantado diversos proyectos de la mano con la Universidad de los Andes, encaminados a alcanzar las primeras etapas necesarias para lograr una Gestión Integral de Redes. A través de dichos trabajos, se han logrado avances significativos en el manejo y en la transformación de archivos topológicos planos en modelos hidráulicos, que son alimentados por la información de macro y micromedición. Igualmente, se desarrollaron programas y metodologías encaminadas a la calibración de modelos hidráulicos, que permitan ajustar sus resultados de acuerdo con las mediciones de campo, a la vez que se obtiene una idea aproximada de la naturaleza y la ubicación de las pérdidas de grandes volúmenes de agua.

Los principales proyectos relacionados son:

- Diseño de implementación de un plan estratégico de manejo de redes de distribución de agua potable de los municipios de Andalucía, Ansermanuevo, Bolivar, Bugalagrande, Candelaria, Ginebra, Guacarí, La Cumbre y Toro. Entidad Financiadora: Empresa de Acueductos y Alcantarillado del Valle del Cauca - ACUAVALLE. 2003-2005
- Determinación del plano óptimo de presiones en los sectores 8 y 35 de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Bogotá. Entidad Financiadora: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. EAAB. 2002-2003

- Determinación del plano óptimo de presiones en redes de distribución de agua potable y control de agua no contabilizada. Entidad Financiadora: Agua de Manizales S.A. E.S.P. 2002-2003
- Estudio para la revisión de la metodología de inclusión de los activos involucrados en el valor de rehabilitación de activos (VRA) y el valor de la presente inversión (VPI) de acueducto y alcantarillado. Entidad Financiadora: Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA).
- Desarrollo de una aplicación para la modelación, análisis y diseño de redes internas de distribución de agua potable. Entidad Financiadora: COLCIENCIAS 2011-2012.

4.10.3 Antecedentes de otros trabajos. En la búsqueda de soluciones, los investigadores plantean metodologías que buscan dar mejoría a los grandes objetivos generales del problema de predicción de daños a través de modelos de regresión lineal y exponencial en redes de distribución de aguas. A manera de ejemplo se citan varias metodologías, distinguiendo sus objetivos, y resultados obtenidos.

En el trabajo desarrollado por Carlos Daniel Alonso Guzmán para la Universidad Politécnica de Valencia (España) en el año 2008, titulado “Programación óptima de la renovación de tuberías en un sistema de abastecimiento urbano: Análisis de los factores de influencia” se analizan los principales factores de influencia en el deterioro de las tuberías y se propone un método de apoyo a la toma de decisiones, con el objetivo de priorizar las necesidades de renovación de las redes de distribución de agua, mediante el uso del sistema soporte a la toma de decisión de las sumas ponderadas. Se presenta y analiza asimismo las herramientas y la información necesaria para el desarrollo de dicha metodología, detallando las matrices de ponderación de alternativas y valoración de resultados.

Juan Saldarriaga, profesor titular de la Universidad de los Andes, en su trabajo de investigación “Renovación priorizada de redes de distribución utilizando el concepto de potencia unitaria” en el año 2010, presenta un algoritmo que, con base en el concepto de potencia unitaria, permite priorizar los tubos por renovar, de tal modo que se reduzca la potencia disipada y el IANC, se mantenga el plano de presiones nivelado y se encuentre la situación ideal para realizar la renovación en términos de beneficios económicos.

Weifeng Li, entre otros autores, en el año 2011, proponen en su trabajo “Development of systems for detection, early warning, and control of pipeline leakage in drinking water distribution: A case study.” un método basado en Sistemas de Información Geográfica ha sido propuesto para optimizar rápida y automáticamente la instrumentación que detecta fugas. De igual manera es propuesto un método para estimar la probabilidad de fuga en cada segmento de tubería (basándose en su historial de daños).

J. Canto Ríos, entre otros autores, proponen en el año 2013 una simple y económica metodología para cuantificar las pérdidas aparentes por medio de Sistemas de Información Geográfica en su trabajo "Methodology for the identification of apparent losses in water distribution networks". De esta misma naturaleza Jackson Kong, Michael Martin, Ian D. Moore, y H.P. Hong en el año 2008 para la Universidad de Western Ontario, Londres (Inglaterra) proponen "Integration of Geographic Information System and Probabilistic Analysis for Optimized Pipe Infrastructure Decisions".

Abdelwahab M. Bibtiena, Ahmed H. ElShafie y Othman Jaafar en el año 2011, trabajando para la Universidad de Malasia presentan una simple técnica para mejorar la precisión en modelos de predicción no lineales de regresión múltiple. El método propuesto fue aplicado para predecir el número de daños de tuberías usando 7 predictores para una red de distribución de agua. "Performance improvement for pipe breakage prediction modeling using regression method".

Flavio Trojan y Danielle Costa Morais, desarrollarán en el año 2012 para la Universidad Federal de Pernambuco (Brasil), un estudio que se enfoca en el uso racional del recurso agua y la reducción de pérdidas sobre el mismo, basado en la premisa de que es más económico desarrollar y mejorar los sistemas existentes que construir sistemas en paralelo, denominado "Prioritising alternatives for maintenance of water distribution networks: A group decision approach".

5. METODOLOGÍA

5.1 TIPO DE TRABAJO

Dentro del marco de este proyecto y dada las características del mismo, se realizará una investigación cuyo tipo de innovación es de desarrollo tecnológico, esto ya que dentro de los objetivos definidos se busca mejorar procesos operativos de atención de daños, mediante la aplicación de un desarrollo computacional de carácter innovador.

De igual manera también se califica como un tipo de investigación aplicada, que representa la generación de nuevo conocimiento en respuesta a un problema o necesidad identificada, como lo es la optimización operacional dentro del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.

5.2 PROCEDIMIENTO

5.2.1 Fase I. Desarrollar una herramienta computacional que permita establecer los cierres necesarios para aislar una determinada zona.

Desarrollar una herramienta computacional orientada a mejorar el proceso de atención de daños en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P., a partir de determinar las válvulas que deben ser operadas (cerrar/abrir) para que un tubo identificado como afectado por un daño o cierre a realizar, quede sin agua. Para lograrlo, es necesario contar un modelo hidráulico calibrado que represente de manera precisa la topología de la red y de igual manera los usuarios del sistema, para determinar cuál es la afectación que puede causar un daño o cierre específico. La plataforma tecnológica, se limita a una aplicación de escritorio que utiliza un Sistema de Información Geográfica para desplegar gráficamente cada componente de la red de distribución.

Cuadro 5. Resumen para el desarrollo del marco metodológico Fase I

Fase	Actividades	Fuentes de Información		Métodos de Investigación					Herramientas	Entregables
		Primarias	Secundarias	Análítico-Sintético	Inductivo-Deductivo	Experimental	Estadístico	Observación		
Desarrollar una herramienta computacional que permita establecer los cierres necesarios para aislar una determinada zona	1. Fase de Planeación	Entrevistas	Bibliografías, Tesis, Manuales. PMI 2008						Juicios de Expertos, entrevistas y herramientas computacionales. Lenguajes de programación: Toolkit EPANET, Base de Datos PostgreSQL y Microsoft Access, Aplicación de Modulo PostGis, Servidor Apache/MapServer, Java Script, Php, Visual Basic 6.0	Software MOVA (Modelación y Operación de Válvulas de Acueducto), Visor Geográfico
	1.1 Recopilación de datos									
	1.2 Validación de datos									
	1.3 Definir el alcance de la solución									
	1.4 Identificar usuarios y roles									
	2. Fase de Análisis									
	2.1 Inventario de datos									
	2.2 Definir Flujo de Información									
	3. Fase de Diseño									
	3.1 Definir Arquitectura									
	3.2 Diagrama del modelo relacional									
	3.3 Diccionario de Datos									
	3.4 Definir algoritmo de funcionamiento									
	4. Fase de desarrollo									
	5. Fase de Mantenimiento									
	6. Realizar el manual de usuario									

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Fase II. Implementación del concepto de "Fuga Abierta" y "Fuga Contenida" en la atención de daños. La priorización es el proceso a través del cual se establece el orden de importancia en el que deben atenderse los daños que se presentan en un determinado período de tiempo dentro de las redes de distribución. Basados en la experiencia que tiene el CIACUA en proyectos de investigación de redes de distribución, y en conjunto con el amb S.A. E.S.P., se estableció como principal criterio para la priorización de los daños los costos asociados tanto al agua que se pierde por el daño (Fuga Abierta), como el agua que se deja de vender mientras duran los trabajos de reparación (Fuga Contenida).

Cuadro 6. Resumen para el desarrollo del marco metodológico Fase II

Fase	Actividades	Fuentes de Información		Métodos de Investigación					Herramientas	Entregables	
		Primarias	Secundarias	Análítico-Sintético	Inductivo-Deductivo	Experimental	Estadístico	Observación			
Implementación del concepto de "Fuga Abierta" y "Fuga Contenida" en la atención de daños	1. Definir el concepto de "Fuga Abierta"	Metodología Fase II del Plano Óptimo de Presiones. Sistema Integrado de Información (SII++). Entrevistas	Bibliografías, Tesis, Manuales						Juicios de Expertos, entrevistas y herramientas computacionales	Aplicación del algoritmo de priorización de atención de daños. Ejemplos de Aplicación	
	2. Definir el concepto de "Fuga Contenida"										
	3. Definir el algoritmo de priorización CIACUA-amb S.A. E.S.P.										
	4. Levantamiento de información										
	5. Desarrollo de ejemplos de priorización por criterio geográfico										
	6. Desarrollo de ejemplos de priorización por tamaño de la fuga										
	7. Desarrollo de ejemplos de priorización por el algoritmo CIACUA-amb S.A. E.S.P.										
	8. Análisis de sensibilidad a los tiempos de recorrido										

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Fase III. Implementar modelos geoestadísticos preventivos-predictivos. Se presenta una metodología simplificada para el desarrollo de un modelo de predicción y prevención de daños en sistemas de distribución de agua, que contribuye a determinar la tasa de ocurrencia de daños sobre las tuberías y contribuye a priorizar la renovación del elemento físico. Dicha metodología se aplica a partir de un modelo de regresión por mínimos cuadrados ordinarios, con el fin de utilizar variables como el suelo, edad, y características implícitas de la tubería (diámetro, longitud, etc.), para explicar el comportamiento de los eventos sobre la red de distribución.

Cuadro 7. Resumen para el desarrollo del marco metodológico Fase III

Fase	Actividades	Fuentes de Información		Métodos de Investigación					Herramientas	Entregables
		Primarias	Secundarias	Análítico-Sintético	Inductivo-Deductivo	Experimental	Estadístico	Observación		
Implementar modelos geostatísticos preventivos-predictivos	1. Definir zona de estudio	Bibliografías. Sistema Integrado de Información SII+, Sistema Integrado de Información y Digitalización de Redes - SIIDAR	Manuales						Juicios de Expertos, entrevistas y herramientas computacionales.	Geolocalizador de direcciones en ArcGIS. Modelo de regresión lineal múltiple para predicción de la tasa de daños de acueducto
	2. Lectura de metodologías existentes de									
	3. Recolección de Información									
	4. Crear geolocalizador de direcciones									
	5. Georeferenciar listado de daños									
	6. Aplicación del Modelo de Regresión									
	7. Validación del Modelo									

Fuente: Elaboración propia.

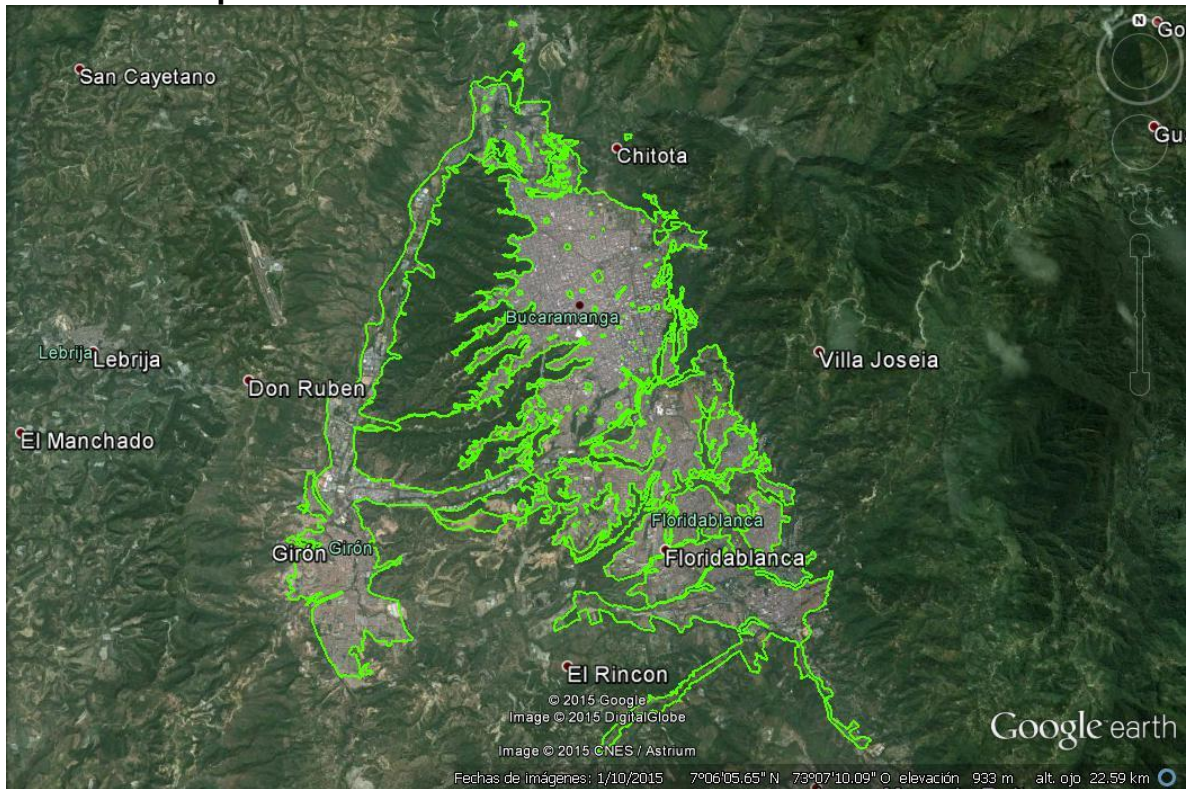
6. RESULTADOS

6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

6.1.1. Generalidades. El presente proyecto se llevó a cabo para la red de distribución de agua potable de la ciudad de Bucaramanga. Para ello se recolectó información detallada sobre las características de la red, tales como la localización, materiales, diámetro y longitud de los tubos; con respecto a los usuarios, se recolectaron datos sobre su distribución espacial y su consumo diario promedio. También se obtuvo información sobre la ciudad en cuanto a su ubicación geográfica, la distribución de los usos del suelo, su densidad poblacional y la estratificación socioeconómica de sus habitantes.

6.1.2 Localización del área de estudio. La ciudad de Bucaramanga se encuentra ubicada sobre la cordillera oriental del sistema montañoso Andino, en una meseta inclinada a 959 m.s.n.m. y se encuentra enmarcada al oriente por montañas y al occidente por el cañon del Río de Oro. Su ubicación geográfica corresponde a los 7°08' de latitud norte con respecto al Meridiano de Bogotá y 73°08' de Longitud al Oeste de Greenwich. Al norte limita con el municipio de Rionegro, al oriente con los municipios de Matanza, Charta y Tona, al sur con el municipio de Floridablanca y al occidente con el municipio de Girón. Tiene un área de 165 kilómetros cuadrados, una temperatura media de 23°C y una precipitación media anual de 1.041 mm.

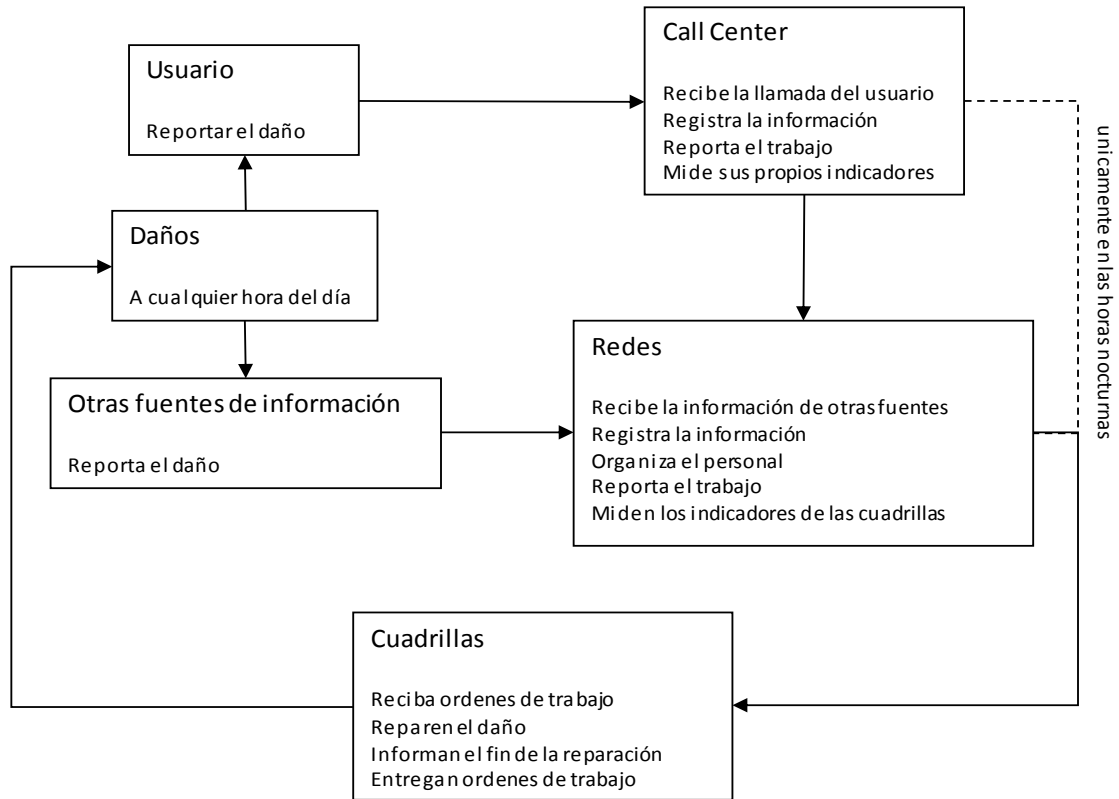
Figura 7. Ubicación y distribución espacial de la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana



Fuente: Google Earth

6.1.3 Descripción de la gestión actual del daño. Actualmente la Gestión del Daño en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P., se inicia cuando la empresa tiene conocimiento de que se ha presentado un daño en su red. Esta información puede llegar directamente a la Sección Redes o a través del Call Center, el cual funciona de acuerdo con la siguiente figura.

Figura 8. Esquema de mantenimiento correctivo actual del amb S.A. E.S.P.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.

En el *Call Center* se manejan 5 “campañas”* en el programa CRM (*Customer Relation Management* por sus siglas en inglés): reclamos, facturación, fraudes, quejas y daños; cada una de ellas tiene un “guion”, el cual indica los pasos que los agentes deben seguir para solicitar, ingresar y modificar la información que le pide al usuario. El primer dato que se solicita es el teléfono, con este se hace una búsqueda en la base de datos del SII++ para capturar el resto de información que describe al suscriptor, de no encontrarse por el número telefónico se pide la dirección o el código, el cual se encuentra en la factura.

Una vez se localiza el suscriptor y se identifica que el daño no se encuentra ya reportado, se genera la Orden de Trabajo. El SII++ almacena toda la información para que luego desde la Sección de Redes sea direccionada por medio del Sistema de Información Móvil (Extreme Control), donde se clasifica de acuerdo con la ubicación geográfica y se priorice el servicio dentro de la siguiente clasificación: tubo de red matriz, tubo roto acometida, servicio sin agua y servicio

* Dentro del funcionamiento operativo del CALL CENTER en el amb S.A. E.S.P. se realizan por parte del personal de dicha sección, llamadas en forma de cuestionarios, con respecto a un tópico en particular de la gestión de la empresa y a ese procedimiento se le denomina “campaña”.

con poca presión. Luego, las órdenes son asignadas a los móviles encargados de atender los daños en los sectores de la ciudad.

Después de ejecutada la reparación se digitan los resultados en la plataforma móvil disponible en cada celular de los operarios y automáticamente se notifica al administrador de la plataforma en la Sección de Redes, realizando un descargue parcial, para luego a través de un webservice* el software Extreme Control envíe al SII++ la información pertinente con respecto a la reparación, como por ejemplo materiales usados y diámetros, entre otros. Si la atención del daño requiere de alguna actividad complementaria (relleno, escombros, concreto, acabados, pavimentos, entre otros) se digita la información relacionada.

Si la reparación requiere el uso de materiales, se hace el cargue de los mismos en el sistema para el manejo de inventarios y posterior cobro. Una vez se ha hecho el descargue total de la Orden de Trabajo, se da por atendido el daño dentro del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.

Con respecto al equipo de trabajo con que cuenta la empresa, tiene personal destinado exclusivamente a todas las labores de reparación y mantenimiento de sus redes. Éste se encuentra a cargo del Jefe de la Sección de Redes, el cual tiene a su mando cinco móviles (cuatro para cada zona de la ciudad en horario diurno y otro en horario nocturno); cada móvil está compuesto de un conductor y dos cuadrillas, en donde cada cuadrilla está conformada por dos personas que se encargan de hacer la reparación. De igual forma, la empresa cuenta con tres inspectores que apoyan la labor de las cuadrillas y trabajan labores de empalmes.

Una vez se encuentra la cuadrilla en el sitio del daño, se verifica su ubicación y se establecen las causas y formas de reparación. Posteriormente, basados en el conocimiento experto de los operarios sobre las redes, se cierran las válvulas necesarias para aislar la zona. Cada una de las cuadrillas cuenta con una serie de repuestos y materiales que les permite ejecutar la reparación requerida. En caso de que éstos sean insuficientes, deben dirigirse a la bodega de la empresa, en la cual se suministran tanto aquellos que hayan sido utilizados, como los que hagan falta.

Como se puede apreciar, actualmente en el amb los daños se atienden uso principalmente el criterio experto de su personal, el cual a pesar de tener un amplio conocimiento del sistema, en ocasiones no dispone de toda la información necesaria para tomar las decisiones más adecuadas y eficientes. Tal es el caso del orden de atención de los daños, conocido como proceso de priorización.

Para priorizar adecuadamente los daños que deben ser atendidos, es necesario saber cuánto caudal se está perdiendo a través de la fuga por unidad de tiempo, a

* Es un servicio web, que utiliza protocolos de comunicación para intercambiar información.

la vez que se requiere saber cuántos usuarios se verán afectados con las acciones de reparación. Éste tipo de información es imposible de obtener sin herramientas que hagan uso de modelos hidráulicos calibrados, combinados con tecnologías de la información geográfica.

De igual forma, la determinación de las válvulas a cerrar para aislar una zona específica debe establecerse previamente en la oficina, de forma tal que los operarios en campo tengan claro en todo momento que acciones deben seguir para ejecutar una reparación o mantenimiento dado en el menor tiempo posible. Para lograr este cometido es de nuevo indispensable disponer de una modelación hidráulica confiable que permita establecer todas las rutas posibles del flujo, desde reservorios y tanques de almacenamiento hasta el usuario final.

Paralelo al hecho de tener protocolos y personal capacitado para atender los daños, es importante almacenar y contar con información que permita analizar el comportamiento de la red con el pasar de tiempo, es por esto que la información almacenada en el SII++ permite extraer datos e indicadores necesarios para la administración, control, seguimiento y toma de decisiones en todo lo relacionado con la atención del daño, permitiendo tener un mejoramiento continuo en el servicio prestado.

Como se observa, actualmente el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P., cuenta con un sistema de manejo de daños robusto, que involucra de forma simultanea algunas de las dependencias más importantes dentro de la estructura de la empresa. Con dicho sistema, el amb S.A. E.S.P. tiene la capacidad de recopilar grandes volúmenes de información referente a cada uno de los procesos involucrados en el manejo y la atención de los daños.

A pesar de los beneficios y las virtudes que el sistema tiene, surgen algunas inquietudes relacionadas con su funcionamiento: ¿A través de éste se le está dando un uso eficiente a los diferentes recursos (humanos, físicos y económicos) con que cuenta la empresa? ¿Cómo debe almacenarse la información recolectada? ¿Qué nuevas herramientas informáticas deben desarrollarse?

Para resolver estos interrogantes, se ponen en práctica metodologías y se desarrollan herramientas que se describirán en los siguientes ítems.

6.1.4 Manejo de la información de daños. Como se explicó dentro del ítem anterior, en la actualidad el amb S.A. E.S.P. recopila grandes volúmenes de información relacionados con los procesos de atención de daños. No obstante, las características de las bases de datos manejadas han cambiado a lo largo del tiempo, de acuerdo al criterio del personal encargado y las capacidades del software utilizado.

Durante el desarrollo de la Fase II del Convenio entre el CIACUA y el amb S.A. E.S.P., así como en este proyecto de maestría se realizaron diversos análisis encaminados al desarrollo de modelos matemáticos capaces de predecir aquellos lugares más propensos a daños en la red. A partir de estos modelos, el amb S.A. E.S.P. estará en capacidad de anticiparse a los daños antes de que ocurran., lo cual mejorará sustancialmente el servicio y disminuirá la cantidad de agua pérdida.

6.1.5. Priorización. Dentro del marco de la Gestión del Daño, priorizar, es el proceso a través del cual se establece un orden de importancia para la atención de los daños que se presentan en un determinado periodo de tiempo dentro de las redes de distribución.

Dentro de la literatura hay muchos criterios que se usan a la hora de dar prioridad a la atención de un evento en una red de distribución de agua. Generalmente los daños se atienden de acuerdo con las características de las tuberías afectadas (diámetro, material). Sin embargo, cuando los sistemas tienen el tamaño del Área Metropolitana de Bucaramanga, que abastece más de 240.000 suscriptores*, estos criterios pueden resultar inapropiados.

En correspondencia con el desarrollo de la “Metodología para la definición de Plano Óptimo de Presiones y Reducción de Agua No Contabilizada. Fase II: Gerencia Integral de Redes – GIR”, por parte del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, en convenio con el Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados – CIACUA, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, se estableció como criterio principal para la priorización de daños los costos asociados tanto al agua que se pierde por el daño (Fuga Abierta), como el agua que se deja de vender mientras duran los trabajos de reparación (Fuga Contenida).

Para lograr lo anterior, se desarrolló como propósito de esta tesis una unión innovadora entre la modelación hidráulica y las Tecnologías de la Información Geográfica, esto permite que a partir de un modelo calibrado, con ayuda de un SIG se puedan hacer consultas y estimaciones con miras a obtener datos que permitan usar los algoritmos de optimización que se presentan en este documento y que además sirva como una herramienta para el soporte en la toma de decisiones.

Fuga Abierta. Para el cálculo del valor del agua que se pierde a través de una fuga, primero se debe calcular su caudal de salida, para lo que se utiliza la expresión mostrada en la siguiente ecuación, donde el caudal se expresa en función de la presión disponible en la red.

$$Q = CP^x$$

* Información suministrada por la División Facturación del amb S.A. E.S.P.

En la Ecuación, C es un parámetro de entrada en unidades de $L/sm^{0.5}$, P es la presión en el nodo en *m. c. a.* (metro de columna de agua), Q el caudal en L/s y X es un exponente que depende del tipo de emisor utilizado.

Para obtener el valor de presión disponible en la red, es conveniente contar con un modelo hidráulico calibrado y validado; con éste es posible adquirir el valor de la presión a lo largo del día y se puede calcular el caudal de salida en la fuga. De no contar con un modelo con las características expuestas, se recomienda elaborar un plano de presiones promedio sobre los diferentes sectores de la red que se utilice, para tener un valor aproximado de la presión.

El coeficiente C es el encargado de cuantificar el tamaño del daño; mientras que el exponente X representa la forma del mismo. Ambos valores son específicos de cada fuga. Sin embargo, los daños pueden agruparse de acuerdo a sus características principales, permitiendo al personal de campo calificarlos a partir de lo observado y estimar sus valores. Por defecto se usa comúnmente un valor de 0.5 para el exponente X, que representa el comportamiento de una fuga en un orificio circular.

En la siguiente tabla se clasifican las fugas en 6 grandes tipos; cada uno de ellos tiene un valor promedio del coeficiente C, el cual puede utilizarse como punto de partida en el cálculo del caudal que se pierde a través de una fuga abierta. Sin embargo, es responsabilidad del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, generar nuevas categorías o ajustar los coeficientes existentes, de acuerdo con los resultados obtenidos una vez se aplique esta metodología y del conocimiento propio del comportamiento de las redes de distribución.

Cuadro 8. Valores del Coeficiente C para los distintos tipos de fugas

Tipo de Fuga	Descripción	C
1	Se percibe humedad, o una pequeña cantidad de agua aflora por la juntas del andén o por el pavimento.	0.1
2	Un mayor afloramiento de agua sobre el andén o el pavimento, se perciben residuos finos de arena en el flujo.	0.5
3	Un mayor afloramiento de agua, el pavimento o el andén presentan una grieta o junta clara debido a la fuga.	1.2
4	Un mayor afloramiento de agua, el pavimento o el andén se ven afectados claramente por la fuga.	2.2
5	El pavimento o el andén ha fallado debido a la fuga, gran cantidad de suelo se ha movido por la fuga, el agua aflora con algo de presión.	3.5
6	El pavimento o el andén ha fallado debido a la fuga, gran cantidad de suelo se ha movido por la fuga, el agua aflora con mucha presión.	6.0

Fuente: Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados – CIACUA. “Metodología para la definición de Plano Óptimo de Presiones y Reducción de Agua No Contabilizada. Fase II: Gerencia Integral de Redes – GIR”

Así, el costo del agua que se pierde a través de la fuga, se determina por la fórmula:

$$\$FA = (\$m^3) * Q_{FA}$$

Donde:

$\$FA$ = Costo del agua pérdida en una fuga abierta, por hora.

$\$m^3$ = Costo del metro cúbico de agua

Q_{FA} = Caudal que sale a través de la fuga por hora.

Fuga Contenida. La fuga contenida se define como el costo del agua que se deja de vender mientras dura el cierre necesario para realizar las reparaciones correspondientes. Para calcular el caudal de la fuga contenida, es indispensable tener un catastro de usuarios completos, en el cual se tengan registrados sus consumos y su ubicación.

De igual forma, es necesario disponer de una herramienta software, que haga uso de los Sistemas de Información Geográfica, a la cual se le indique los eventos sucedidos, para que éste establezca los suscriptores afectados de manera inmediata.

De esta manera, el costo del agua que se deja de vender está determinado por la siguiente ecuación:

$$\$FC = (\$m^3) * Q_{FC}$$

Donde:

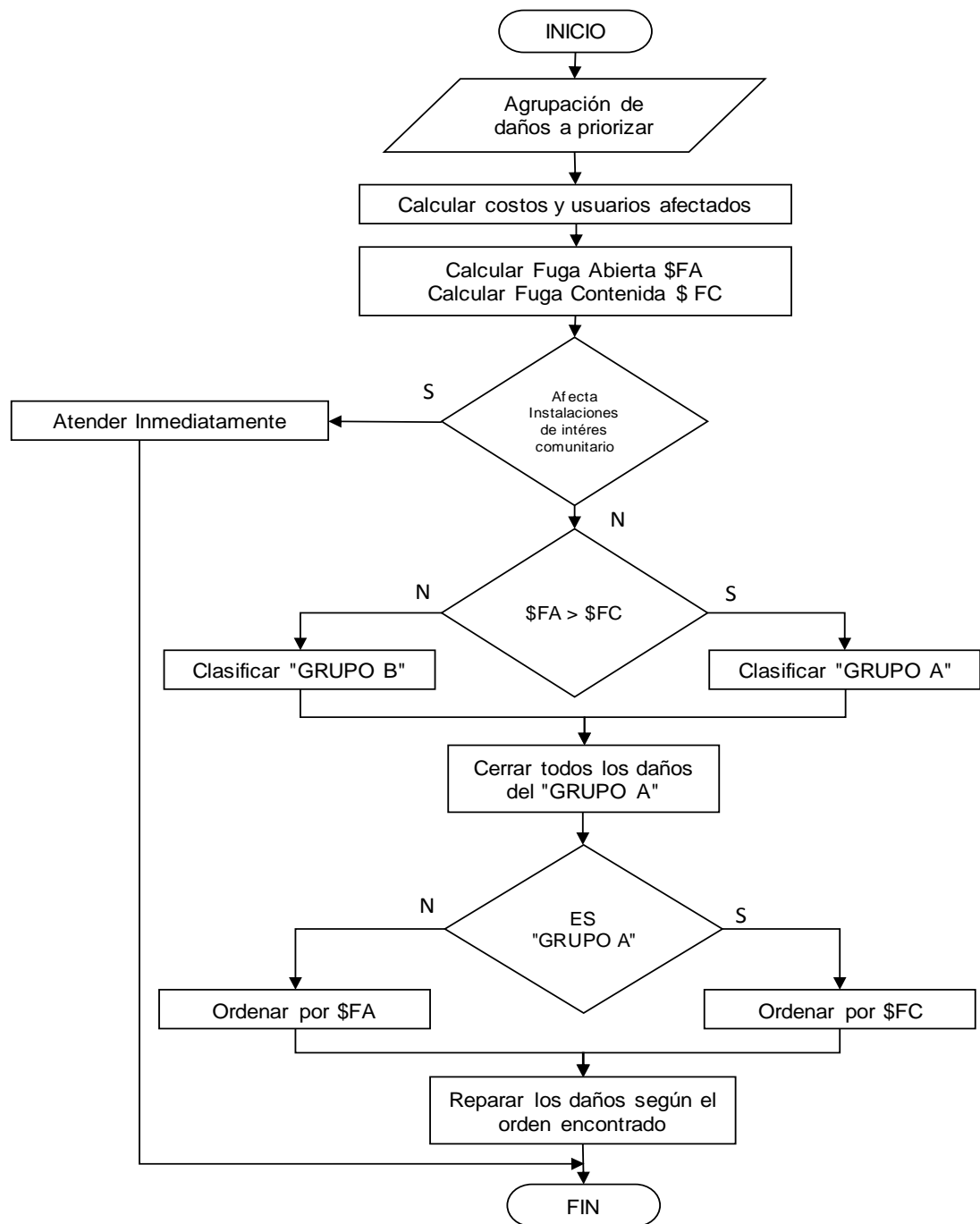
$\$FA$ = Costo del agua que se deja de vender por cerrar el daño, por hora.

$\$m^3$ = Costo del metro cúbico de agua

Q_{FA} = Caudal que se deja de vender por efecto de las reparaciones, por hora.

Proceso de Priorización. Establecidos los costos asociados al agua que se pierde por la fuga y del agua que se deja de vender debido a los cierres, se establece el procedimiento a partir del cual se fijará el orden de atención de los daños, tal como lo presenta la siguiente figura.

Figura 9. Algoritmo de priorización de daños



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. y Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados – CIACUA. “Metodología para la definición de Plano Óptimo de Presiones y Reducción de Agua No Contabilizada. Fase II: Gerencia Integral de Redes – GIR”.

En los siguientes numerales se explica cada etapa del algoritmo, a partir del desarrollo de unos ejemplos con datos de daños ocurridos en el año 2014.

Agrupación de daños a priorizar. Como el Área Metropolitana de Bucaramanga se encuentra dividida en cuatro (4) zonas para la atención de daños, la priorización se debe aplicar a cada una de ella por separado.

Es necesario para poder aplicar el algoritmo que los daños de cada sector sean verificados antes de enviar los móviles con sus respectivas cuadrillas, la verificación busca en primer medida ubicar el daño en el modelo y segundo clasificar el tipo de daño para poder asignar el coeficiente C de la fuga. La agrupación y priorización se realiza antes de entregar las órdenes de trabajo a cada móvil.

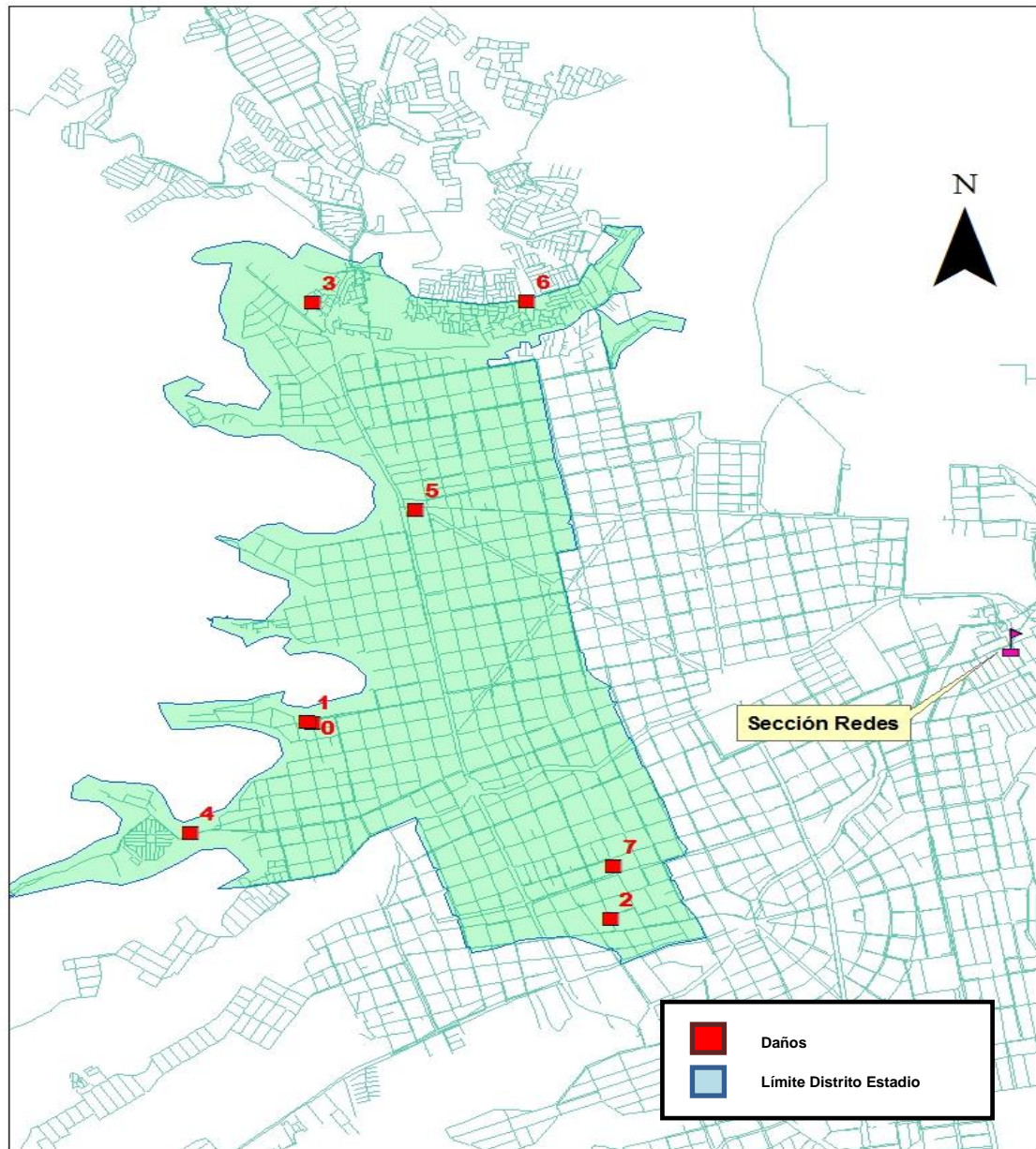
Cálculo de costos. En numerales anteriores se mencionó, que para cada daño existen dos tipos de costos asociados: costo por Fuga Abierta y Costo por Fuga Contenida. Para establecer el Costo de Fuga Abierta es necesario conocer el caudal que se pierde por el daño como función de la presión de la red, el tamaño y la forma del daño. En el caso del Costo de la Fuga Contenida se requiere el grupo de usuarios afectados con su respectivo consumo.

Ejemplo hipotético 1. Para ilustrar el desempeño del algoritmo, se creó una situación basada en datos reales, en la cual se presentan de forma simultánea 8 daños al interior del Área Metropolitana de Bucaramanga S.A. E.S.P. Se toman como condiciones iniciales las siguientes consideraciones:

- En promedio los daños estuvieron abiertos durante dos (2) horas antes de iniciarse labor alguna de reparación.
- El tiempo de atención por cada daño es de tres (3) horas.

Cabe destacar que el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P cuenta para la reparación de los daños de una zona por ejemplo del tamaño del Distrito Estadio, con un móvil, el cual está integrado por dos cuadrillas. Usualmente cada cuadrilla se encarga de atender un daño. De esta manera, una vez se establezca el orden de prioridad de los daños, éstos son atendidos simultáneamente por pares. El punto de partida del móvil es la oficina de la Sección de Redes, en la sede del Acueducto Metropolitana de Bucaramanga S.A. E.S.P. en la Calle 32 # 30^a-51.

Figura 10. Distribución espacial de los daños del ejemplo hipotético 1.



Fuente: ANAYA, S. Distribución espacial de los daños del ejemplo hipotético 1. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0.

En el siguiente cuadro, se resumen las características de las fugas consideradas para el ejemplo 1. La información de fecha de ocurrencia, dirección, barrio y tipo de evento se obtuvo del Sistema Integrado de Información SII++ de la empresa, lo referente a ID_tubería, diámetros y presiones a partir del modelo hidráulico

calibrado, mientras que el valor del Coeficiente C se supuso de acuerdo a la clasificación de la tabla de valores de coeficientes.

Cuadro 9. Características de los daños del ejemplo hipotético 1.

Daño	ID_tubería	Diámetro (pulg)	Presión (psi)	Coeficiente C	Dirección	Barrio	Tipo Daño
0	33478	3	39.25	0.5	Cra 8 # 21-04	Nariño	Reparar Red Estallada
1	33479	3	40.2	1.2	Calle 21 # 7-44	Nariño	Reparar Red Estallada
2	30117	2	79.54	0.1	Cra 18 # 38-15	Centro	Reparar Red Estallada
3	27574	2	65.07	0.1	Calle 0A # 15C-11	Villa Mercedes	Reparar Red Estallada
4	16547	2	53.69	0.1	Calle 28 # 1-40	La Feria	Reparar Red Estallada
5	17807	3	43.37	0.1	Bv. Bolivar # 15-48	Modelo	Reparar Red Estallada
6	26925	3	74.27	1.2	Calle 1 # 21D-16	Transición	Reparar Red Estallada
7	5717	2	69.88	0.1	Cra 19 # 35-02	Centro	Reparar Red Estallada

Fuente: Elaboración propia.

Una vez establecida la ubicación exacta de los daños, el paso a seguir es determinar el número de usuarios que se verán afectados, para calcular los caudales y costos tanto de la fuga abierta como contenida. El cuadro siguiente caracteriza para cada evento, el caudal que se pierda mientras permanezca abierta, el caudal que consumen los usuarios afectados por las reparaciones y el costo por hora del agua pérdida y del agua que se dejó de vender, a partir de un valor de consumo básico de 1.261,53 \$/m³²¹.

Cuadro 10. Caudales y costos por hora de los daños del ejemplo hipotético 1

Daño	ID_tubería	Diámetro (pulg)	Precio m3 (\$)	Coeficiente	Presión (psi)	Usuarios afectados	Caudal FA (lps)	Caudal FC (lps)	Costo FA (\$/hora)	Costo FC (\$/hora)
0	33478	3	1261.53	0.5	39.25	39	2.62	0.41	11,902.69	1,891.44
1	33479	3	1261.53	1.2	40.2	281	6.36	2.49	28,911.53	11,326.79
2	30117	2	1261.53	0.1	79.54	51	0.74	0.28	3,388.95	1,314.94
3	27574	2	1261.53	0.1	65.07	1403	0.67	9.05	3,065.73	41,117.49
4	16547	2	1261.53	0.1	53.69	254	0.61	4.01	2,784.28	18,246.14
5	17807	3	1261.53	0.1	43.37	1	0.55	0.26	2,502.57	1,213.85
6	26925	3	1261.53	1.2	74.27	966	8.65	5.74	39,294.98	26,081.88
7	5717	2	1261.53	0.1	69.88	79	0.69	0.43	3,176.35	1,968.19

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del software MOVA.

Priorización por criterio geográfico. Consiste en la asignación del orden de atención de acuerdo con la ruta más corta entre los daños a partir del punto de origen de los móviles. Es probablemente el método de asignación de prioridades más utilizado por las empresas prestadoras de servicios públicos para dar atención a sus eventos, ya que parte de la premisa de la optimización de los recorridos, lo que facilita la distribución de personal y materiales.

En la actualidad del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. cuenta con cuatro zonas que son atendidas por un móvil dentro del horario laboral. En cada zona, cuando son adjudicadas las órdenes de trabajo, se da prioridad a los

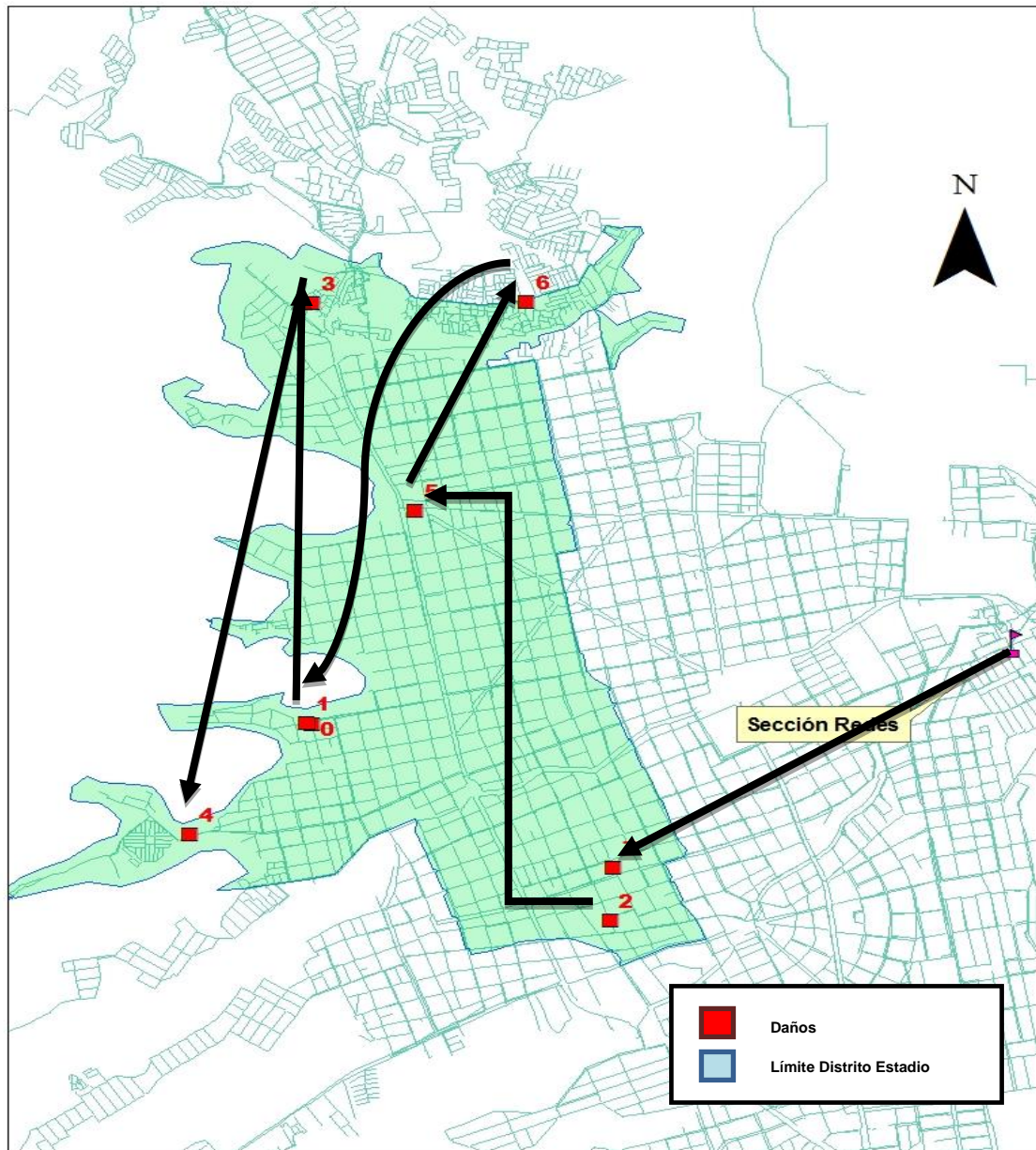
²¹ ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA. Tarifa de Consumo Vigente para Estrato 3 del Municipio de Bucaramanga. [en línea]. Bucaramanga. 2006. [consulta: 20/02/2015]. Disponible en: <www.amb.com/frmlInformacion.aspx?inf=32>

daños de Red Matriz* y luego se atienden los domiciliarios. Según estadísticas de la Sección de Redes, a diario en toda la extensión de las redes del área de cobertura de la empresa, se presentan 60 daños, de los cuales 40 son domiciliarios y 20 en red matriz, pero de esos domiciliarios, 10 requieren cierre de válvulas y 30 solo afectan al usuario que tiene el daño.

En la siguiente figura se observa el orden en el que se atienden los daños en el ejemplo hipotético si el criterio considerado para establecer el orden es geográfico.

* La red matriz es la parte de la red de conducción y distribución que conforma la malla principal de servicio

Figura 11. Priorización geográfica de los daños con el ejemplo hipotético 1.



Fuente: ANAYA, S. Priorización geográfica de los daños con el ejemplo hipotético 1. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0.

En el siguiente cuadro se muestran los daños que son atendidos por cada una de las cuadrillas; la atención se realiza de manera simultánea, es decir; el daño 1 y el daño 3 se atienden en el mismo instante de tiempo, luego el 2 y el 5, y así sucesivamente.

El costo de la Fuga abierta se obtiene a partir del costo por hora del cuadro anterior, multiplicado por el número de horas que el permaneció abierta, mientras que el costo de la Fuga contenida se calcula con la cantidad de horas que duraron las reparaciones y el costo por hora del agua que consumen los suscriptores afectados.

Cuadro 11. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 1 de acuerdo al criterio geográfico.

	Daño	Fuga Abierta			Fuga Contenida			TOTAL
		Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	
CUADRILLA 1	5717	2	3176.35	6352.7	3	1,968	5,905	12,257
	17807	5	2502.57	12512.85	3	1,214	3,642	16,154
	33478	8	11902.69	95221.52	3	1,891	5,674	100,896
	27574	11	3065.73	33723.03	3	41,117	123,352	157,076
CUADRILLA 2	30117	2	3388.95	6777.9	3	1,315	3,945	10,723
	26925	5	39294.98	196474.9	3	26,082	78,246	274,721
	33479	8	28911.53	231292.24	3	11,327	33,980	265,273
	16547	11	2784.28	30627.08	3	18,246	54,738	85,366
								\$ 922,464

Fuente: Elaboración propia.

Priorización de acuerdo con el tamaño de la fuga. La cantidad de agua que se pierde a través de las fugas, en función del tamaño de la falla y la hidráulica del sistema es una variable importante a considerar en la priorización de la atención de daños.

Para determinar el orden de atención de los eventos planteados en el ejemplo 1 según este criterio, se ordenaron los valores del cuadro de caudales y costos de acuerdo con el caudal de Fuga Abierta.

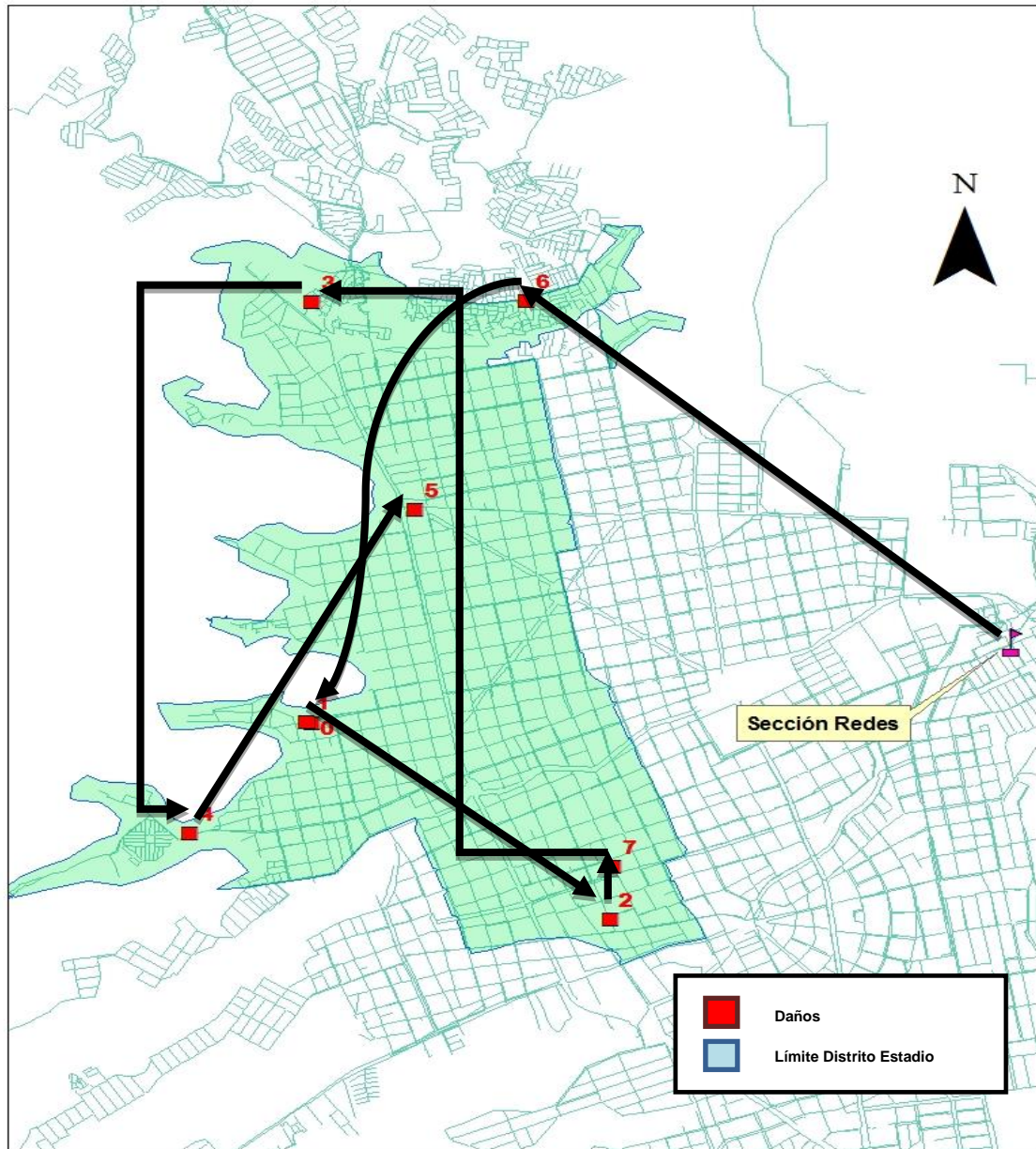
Cuadro 12. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 1 de acuerdo con el tamaño de la fuga

Daño	ID_Tubería	Diámetro (pulg)	Precio m3 (\$)	Coficiente	Presión (psi)	Usuarios afectados	Caudal FA (lps)	Caudal FC (lps)	Costo FA (\$/hora)	Costo FC (\$/hora)
6	26925	3	1261.53	1.2	74.27	966	8.65	5.74	39,295	26,082
1	33479	3	1261.53	1.2	40.2	281	6.36	2.49	28,912	11,327
0	33478	3	1261.53	0.5	39.25	39	2.62	0.41	11,903	1,891
2	30117	2	1261.53	0.1	79.54	51	0.74	0.28	3,389	1,315
7	5717	2	1261.53	0.1	69.88	79	0.69	0.43	3,176	1,968
3	27574	2	1261.53	0.1	65.07	1403	0.67	9.05	3,066	41,117
4	16547	2	1261.53	0.1	53.69	254	0.61	4.01	2,784	18,246
5	17807	3	1261.53	0.1	43.37	1	0.55	0.26	2,503	1,214

	Daño	Fuga Abierta			Fuga Contenida			TOTAL
		Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	
CUADRILLA 1	26925	2	39,295	78,590	3	26,082	78,246	156,836
	33478	5	11,903	59,513	3	1,891	5,674	65,188
	5717	8	3,176	25,411	3	1,968	5,905	31,315
	16547	11	2,784	30,627	3	18,246	54,738	85,366
CUADRILLA 2	33479	2	28,912	57,823	3	11,327	33,980	91,803
	30117	5	3,389	16,945	3	1,315	3,945	20,890
	27574	8	3,066	24,526	3	41,117	123,352	147,878
	17807	11	2,503	27,528	3	1,214	3,642	31,170
								\$ 630,445

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Priorización por tamaño de la fuga del daño con el ejemplo hipotético 1.



Fuente: ANAYA, S. Priorización por tamaño de la fuga del daño con el ejemplo hipotético 1. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0.

Priorización de acuerdo al algoritmo CIACUA – amb S.A. E.S.P. Siguiendo el algoritmo planteado y una vez establecidos los costos por hora de las Fugas

Abiertas y Contenidas, se procede a clasificarlos en Grupos (A o B) dependiendo de qué valor es mayor que el otro, como se muestra en el cuadro siguiente.

Cuadro 13. Clasificación de los daños del ejemplo hipotético 1

Daño	ID_Tubería	Diámetro (pulg)	Precio m3 (\$)	Coefficiente	Presión (psi)	Usuarios afectados	Caudal FA (lps)	Caudal FC (lps)	Costo FA (\$/hora)	Costo FC (\$/hora)	CLASIFICACION
0	33478	3	1261.53	0.5	39.25	39	2.62	0.41	11902.69	1891.44	GRUPO A
1	33479	3	1261.53	1.2	40.2	281	6.36	2.49	28911.53	11326.79	GRUPO A
2	30117	2	1261.53	0.1	79.54	51	0.74	0.28	3388.95	1314.94	GRUPO A
3	27574	2	1261.53	0.1	65.07	1403	0.67	9.05	3065.73	41117.49	GRUPO B
4	16547	2	1261.53	0.1	53.69	254	0.61	4.01	2784.28	18246.14	GRUPO B
5	17807	3	1261.53	0.1	43.37	1	0.55	0.26	2502.57	1213.85	GRUPO A
6	26925	3	1261.53	1.2	74.27	966	8.65	5.74	39294.98	26081.88	GRUPO A
7	5717	2	1261.53	0.1	69.88	79	0.69	0.43	3176.35	1968.19	GRUPO A

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del software MOVA.

Una vez clasificados todos los daños, se procede a cerrar todos los del grupo A, el paso siguiente es ordenarlos teniendo en cuenta para aquellos pertenecientes al grupo A, el Costo de la Fuga Contenida y para los del grupo B el costo de la Fuga Abierta.

Cuadro 14. Costos asociados a los daños del ejemplo hipotético 1

Daño	ID_Tubería	Diámetro (pulg)	Precio m3 (\$)	Coefficiente	Presión (psi)	Usuarios afectados	Caudal FA (lps)	Caudal FC (lps)	Costo FA (\$/hora)	Costo FC (\$/hora)	CLASIFICACION
6	26925	3	1261.53	1.2	74.27	966	8.65	5.74	39294.98	26081.88	GRUPO A
1	33479	3	1261.53	1.2	40.2	281	6.36	2.49	28911.53	11326.79	GRUPO A
3	27574	2	1261.53	0.1	65.07	1403	0.67	9.05	3065.73	41117.49	GRUPO B
4	16547	2	1261.53	0.1	53.69	254	0.61	4.01	2784.28	18246.14	GRUPO B
7	5717	2	1261.53	0.1	69.88	79	0.69	0.43	3176.35	1968.19	GRUPO A
0	33478	3	1261.53	0.5	39.25	39	2.62	0.41	11902.69	1891.44	GRUPO A
2	30117	2	1261.53	0.1	79.54	51	0.74	0.28	3388.95	1314.94	GRUPO A
5	17807	3	1261.53	0.1	43.37	1	0.55	0.26	2502.57	1213.85	GRUPO A

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del software MOVA.

Ahora que ha sido establecido el orden en que serán atendidos los eventos, el paso siguiente es estimar los costos asociados al agua, por las reparaciones.

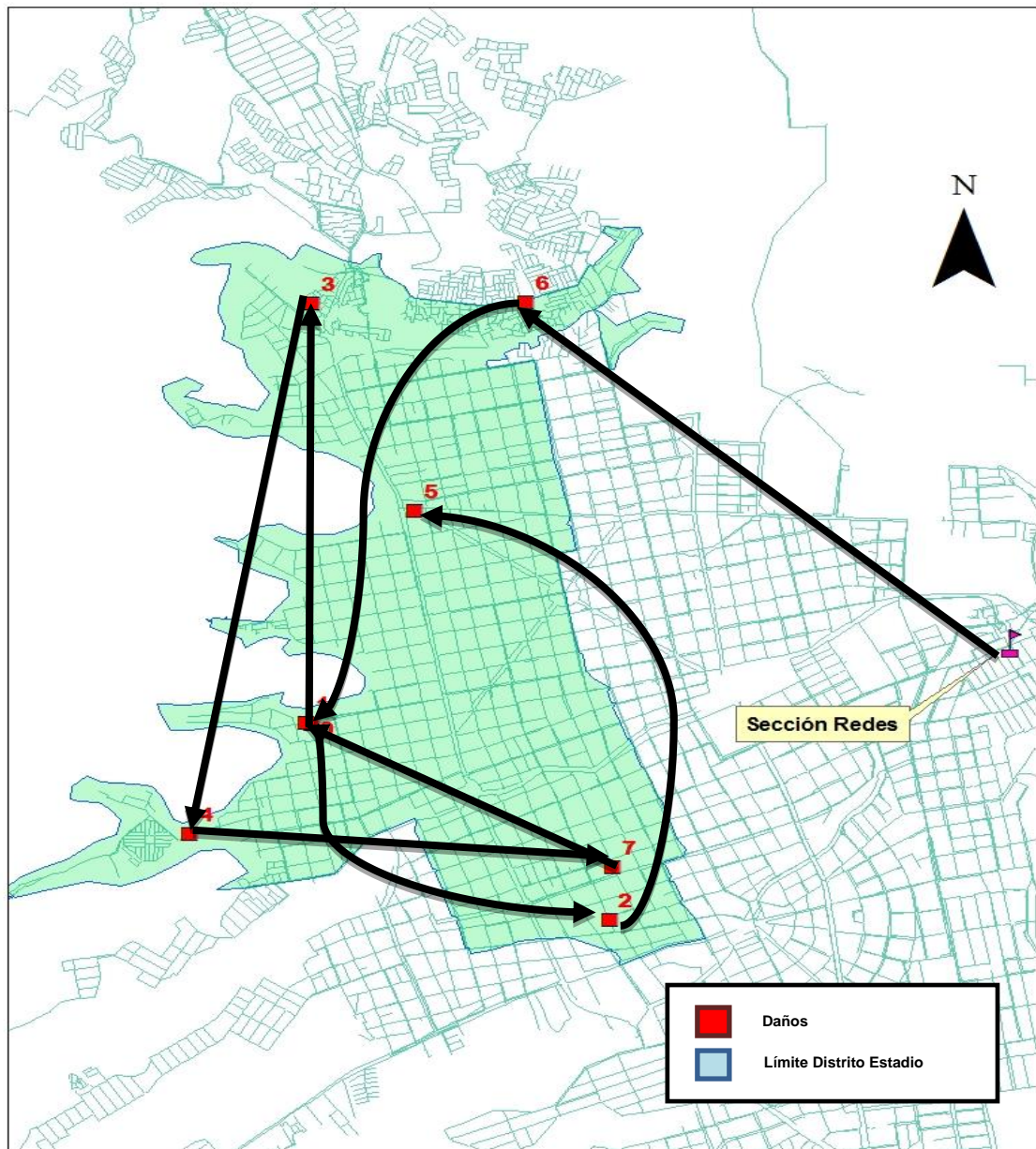
Cuadro 15. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 1 de acuerdo al algoritmo CIACUA – amb S.A. E.S.P.

	Daño	Fuga Abierta			Fuga Contenida			TOTAL
		Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	
CUADRILLA 1	26925	2	39,295	78,590	3	26,082	78,246	156,836
	27574	5	3,066	15,329	3	41,117	123,352	138,681
	5717	2	3,176	6,353	9	1,968	17,714	24,066
	30117	2	3,389	6,778	12	1,315	15,779	22,557
CUADRILLA 2	33479	2	28,912	57,823	3	11,327	33,980	91,803
	16547	5	2,784	13,921	3	18,246	54,738	68,660
	33478	2	11,903	23,805	9	1,891	17,023	40,828
	17807	2	2,503	5,005	12	1,214	14,566	19,571
								\$ 563,003

Fuente: Elaboración propia.

Una vez se obtienen los resultados de los tres análisis que se evidencian en los cuadros anteriores, se observa que en el algoritmo de priorización del CIACUA en conjunto con el amb S.A. E.S.P., se obtienen costos asociados al agua más bajos. El algoritmo propuesto alcanza un ahorro de \$ 359,461 con respecto al criterio geográfico y \$ 67,442 frente al criterio del tamaño de la fuga.

Figura 13. Priorización según el algoritmo CIACUA-amb S.A. E.S.P. con el ejemplo hipotético 1.

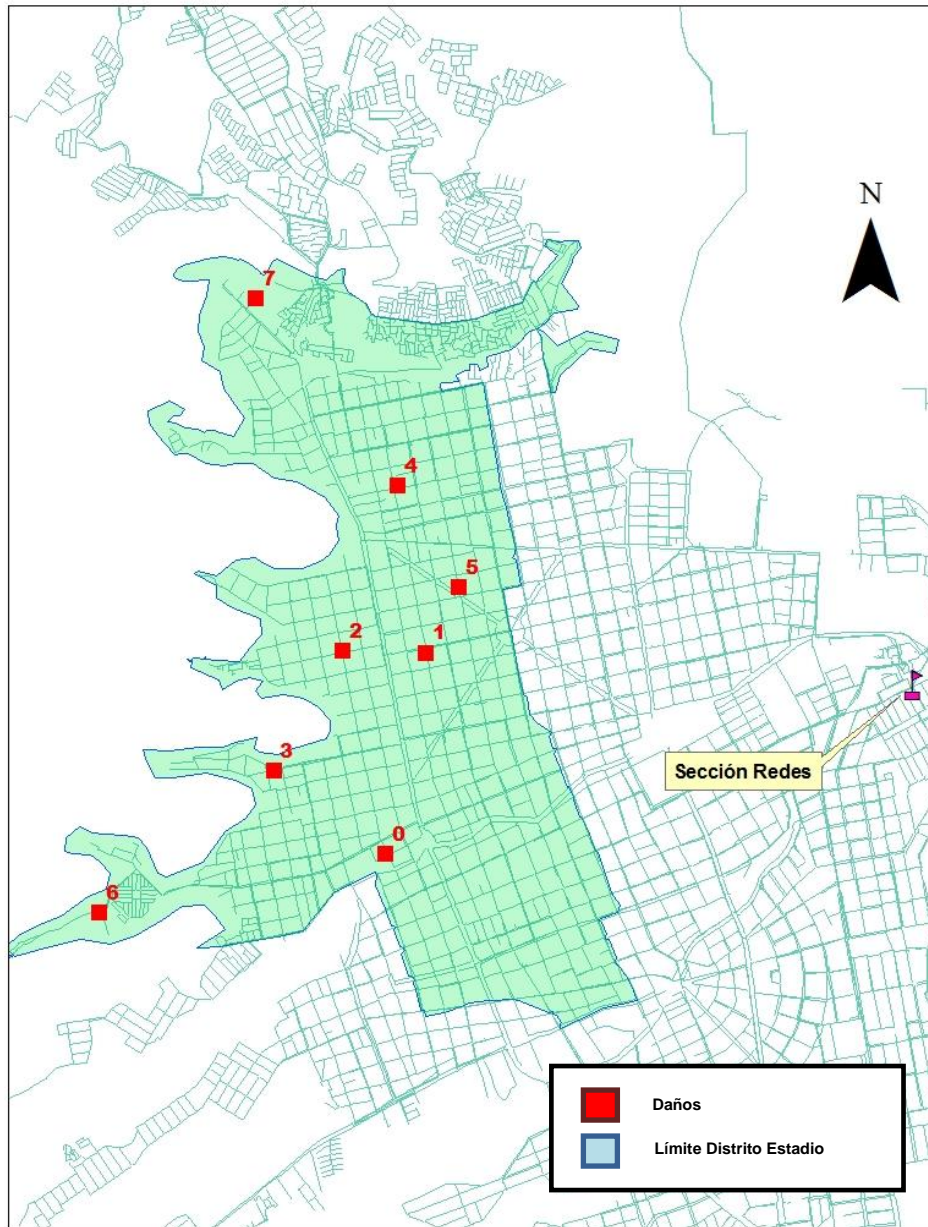


Fuente: ANAYA, S. Priorización según el algoritmo CIACUA-amb S.A. E.S.P. con el ejemplo hipotético 1. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0.

Es importante resaltar los beneficios de esta metodología y su implementación dentro del Área Metropolitana de Bucaramanga. La figura anterior presenta el orden en que son atendidos los daños de acuerdo al algoritmo de priorización del CIACUA en conjunto con el amb S.A. E.S.P.

Ejemplo hipotético 2. Corresponde a otra situación teórica en la que se presentan de forma simultánea 8 eventos en las redes de distribución del Distrito Estadio. En la siguiente figura se puede observar la ubicación espacial de los sitios, mientras en la cuadro se presentan sus características.

Figura 14. Distribución espacial de los daños en el ejemplo hipotético 2



Fuente: ANAYA, S. Distribución espacial de los daños en el ejemplo hipotético 2. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

Cuadro 16. Características de los daños del ejemplo hipotético 2

Daño	ID_tubería	Diámetro (pulg)	Presión (psi)	Coefficiente C	Dirección	Barrio	Tipo Daño
0	32701	2	31.72	0.1	Cra 13 # 28-44	Granada	Cambiar Válvula - Red
1	28537	3	69.01	0.1	Cra 17 # 17-20	San Francisco	Tubo Roto Estallado - Red
2	28437	2	28.66	0.5	Cra 13 # 13-67	Gaitán	Empalmar Red
3	33479	3	40.2	3.5	Calle 21 # 7-22	Nariño	Tubo Roto Ocasionado - Matriz
4	6712	4	33.61	0.1	Calle 9 # 17-05	Comuneros	Tubo Roto Estallado - Red
5	28213	4	62.11	0.1	Cra 19 # 14-35	San Francisco	Tubo Roto Estallado - Red
6	4451	2	47.43	1.2	Cra 1A # 28-14 Apto 201	Napoles	Cambiar Válvula - Red
7	27535	2	59.92	0.1	Calle 2N # 15-61	Villa Mercedes	Tubo Roto Estallado - Red

Fuente: Elaboración propia.

Una vez definidas e identificadas las características hidráulicas, las válvulas a cerrar y los usuarios afectados por los eventos, se procede al cálculo de los costos por hora de la Fuga Abierta y la Fuga Contenida. Al igual que en el ejemplo anterior, se utiliza un costo del agua de 1.261,53 \$/m3.

Cuadro 17. Caudales y costos horarios de los daños del ejemplo hipotético 2

Daño	ID_tubería	Diámetro (pulg)	Precio m3 (\$)	Coefficiente	Presión (psi)	Usuarios afectados	Caudal FA (lps)	Caudal FC (lps)	Costo FA (\$/hora)	Costo FC (\$/hora)
0	32701	2	1261.53	0.1	31.72	7	0.47	0.09064	2,140	412
1	28537	3	1261.53	0.1	69.01	16	0.69	0.1	3,157	492
2	28437	2	1261.53	0.5	28.66	22	2.23	0.13	10,172	593
3	33479	3	1261.53	3.5	40.2	281	18.56	2.49	84,325	11,327
4	6712	4	1261.53	0.1	33.61	11	0.48	0.1	2,203	464
5	28213	4	1261.53	0.1	62.11	35	0.65	0.22	2,995	1,036
6	4451	2	1261.53	1.2	47.43	132	6.91	2.85	31,403	12,947
7	27535	2	1261.53	0.1	59.92	9	0.64	0.04	2,941	200

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del software MOVA.

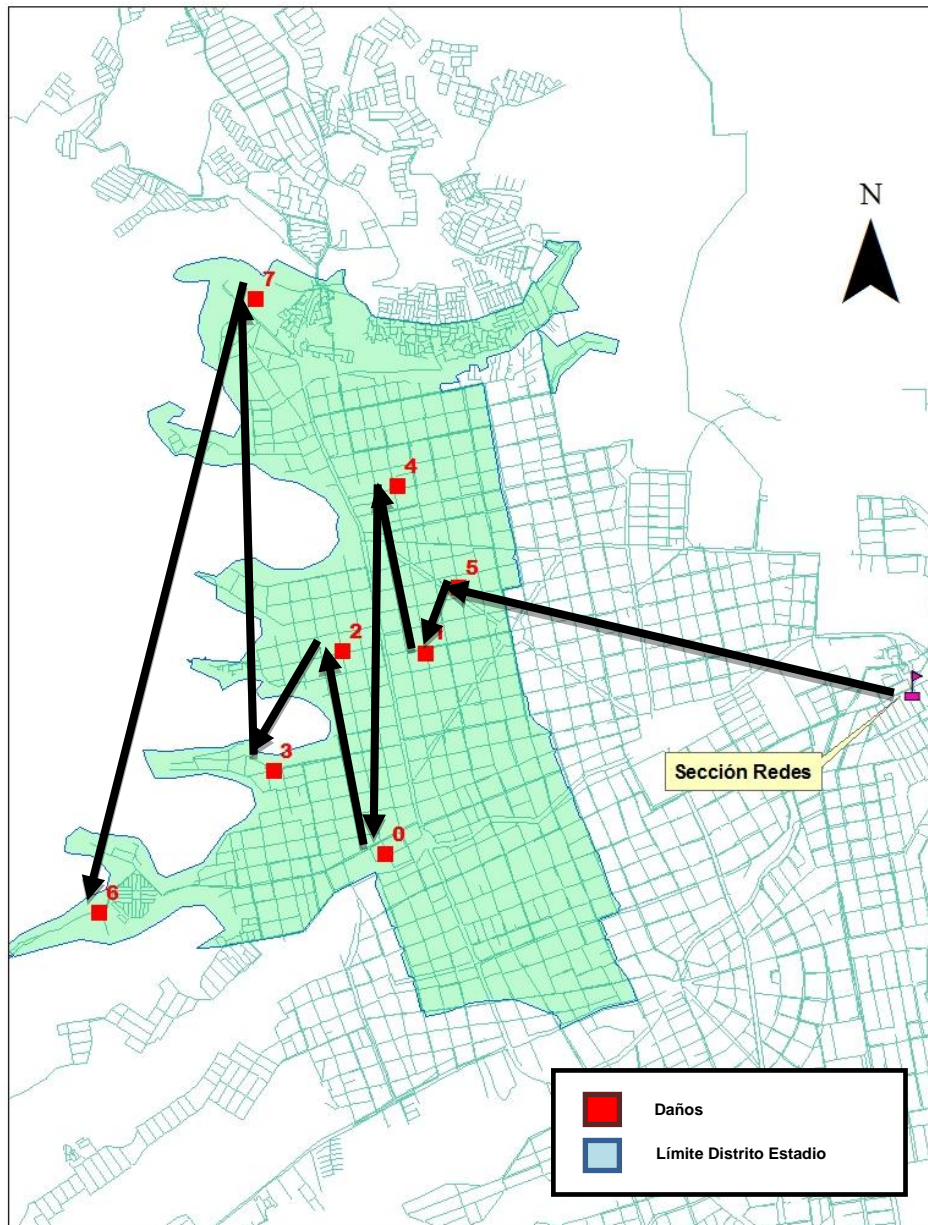
Priorización por criterio geográfica. De acuerdo con su proximidad geográfica, el orden de atención de los eventos del ejemplo hipotético 2 se presentan a continuación:

Cuadro 18. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 2 de acuerdo al criterio geográfico.

	Daño	Fuga Abierta			Fuga Contenida			TOTAL
		Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	
CUADRILLA 1	28213	2	2,995	5,989	3	1,036	3,109	9,099
	6712	5	2,203	11,014	3	464	1,392	12,407
	28437	8	10,172	81,376	3	593	1,780	83,156
	27535	11	2,941	32,354	3	200	599	32,953
CUADRILLA 2	28537	2	3,157	6,313	3	492	1,476	7,789
	32701	5	2,140	10,701	3	412	1,235	11,936
	33479	8	84,325	674,602	3	11,327	33,980	708,583
	4451	11	31,403	345,431	3	12,947	38,841	384,272
								\$ 1,250,194

Fuente: Elaboración propia.

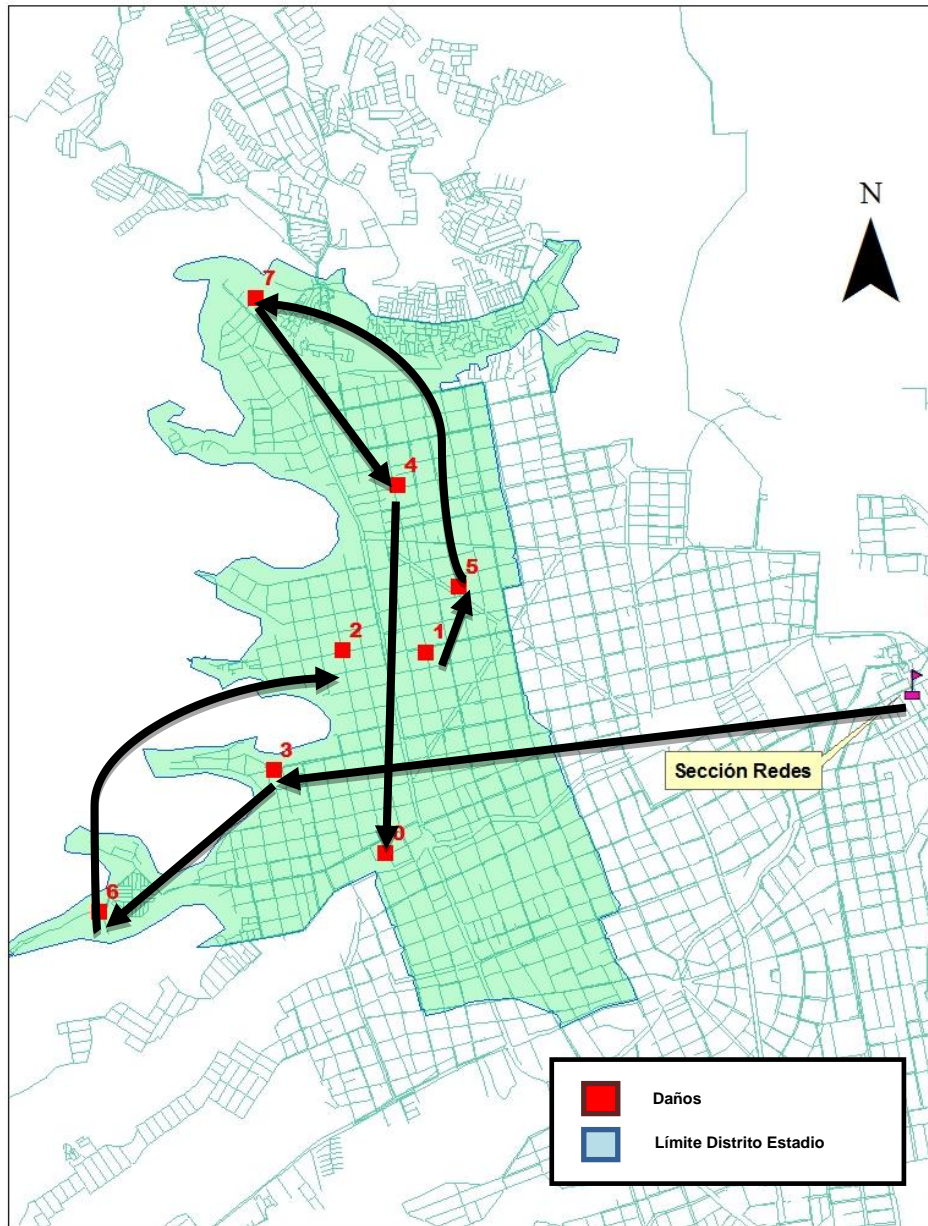
Figura 15. Priorización geográfica de los daños del ejemplo hipotético 2



Fuente: ANAYA, S. Priorización geográfica de los daños del ejemplo hipotético 2. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

Priorización de acuerdo al tamaño de la fuga. Para el efecto de este numeral se ordenaron los valores consignados en el cuadro de caudales, de acuerdo con los costos asociados a los caudales de las fugas y cuyos resultados se observan a continuación.

Figura 16. Priorización por tamaño de fuga de los daños del ejemplo hipotético 2



Fuente: ANAYA, S. Priorización por tamaño de fuga de los daños del ejemplo hipotético 2. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

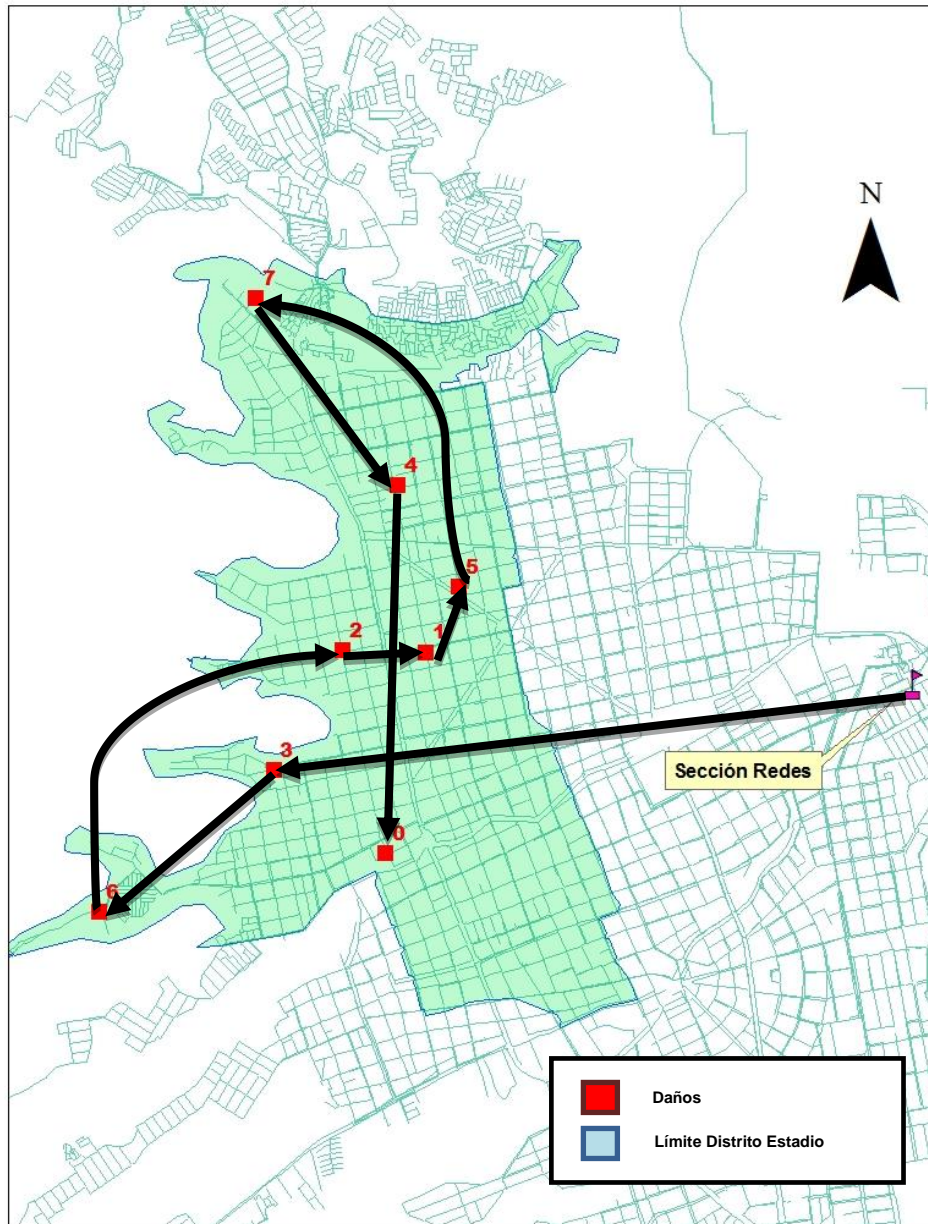
Cuadro 19. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 2 de acuerdo con el tamaño de las fugas

	Daño	Fuga Abierta			Fuga Contenida			TOTAL
		Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	
CUADRILLA 1	33479	2	84,325	168,651	3	11,327	33,980	202,631
	28437	5	10,172	50,860	3	593	1,780	52,640
	28213	8	2,995	23,957	3	1,036	3,109	27,066
	6712	11	2,203	24,232	3	464	1,392	25,624
CUADRILLA 2	4451	2	31,403	62,806	3	12,947	38,841	101,647
	28537	5	3,157	15,783	3	492	1,476	17,259
	27535	8	2,941	23,530	3	200	599	24,129
	32701	11	2,140	23,543	3	412	1,235	24,778
								\$ 475,773

Fuente: Elaboración propia.

En primera instancia al comparar las metodologías, se observa un decremento de más del 50% a favor de la priorización de acuerdo con el tamaño de las fugas.

Figura 17. Priorización por tamaño de fuga de los daños del ejemplo hipotético 2



Fuente: ANAYA, S. Priorización por tamaño de fuga de los daños del ejemplo hipotético 2. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

Priorización de acuerdo al algoritmo CIACUA – amb S.A. E.S.P.

Recordando que para implementar este algoritmo es necesario clasificar los daños en el Grupo A o el B dependiendo de los valores del costo de Fuga Abierta o Contenida, tal cual se muestra a continuación.

Cuadro 20. Clasificación de los daños del ejemplo hipotético 2

Daño	ID_Tuberia	Diámetro (pulg)	Precio m3 (\$)	Coficiente	Presión (psi)	Usuarios afectados	Caudal FA (lps)	Caudal FC (lps)	Costo FA (\$/hora)	Costo FC (\$/hora)	CLASIFICACION
6	4451	2	1,262	1.2	47.43	132	6.91	2.85	31,403	12,947	GRUPO A
3	33479	3	1,262	3.5	40.2	281	18.56	2.49	84,325	11,327	GRUPO A
5	28213	4	1,262	0.1	62.11	35	0.65	0.22	2,995	1,036	GRUPO A
2	28437	2	1,262	0.5	28.66	22	2.23	0.13	10,172	593	GRUPO A
1	28537	3	1,262	0.1	69.01	16	0.69	0.1	3,157	492	GRUPO A
4	6712	4	1,262	0.1	33.61	11	0.48	0.1	2,203	464	GRUPO A
0	32701	2	1,262	0.1	31.72	7	0.47	0.09064	2,140	412	GRUPO A
7	27535	2	1,262	0.1	59.92	9	0.64	0.04	2,941	200	GRUPO A

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del software MOVA.

Ahora bien, los daños del grupo A deben ser cerrados y ordenarlos, considerando en este caso el Costo de la Fuga Contenida, como se observa en el cuadro siguiente, para así definir al atención de los eventos.

Cuadro 21. Orden de atención de los daños de acuerdo al algoritmo CIACUA – amb S.A. E.S.P. para el ejemplo hipotético 2

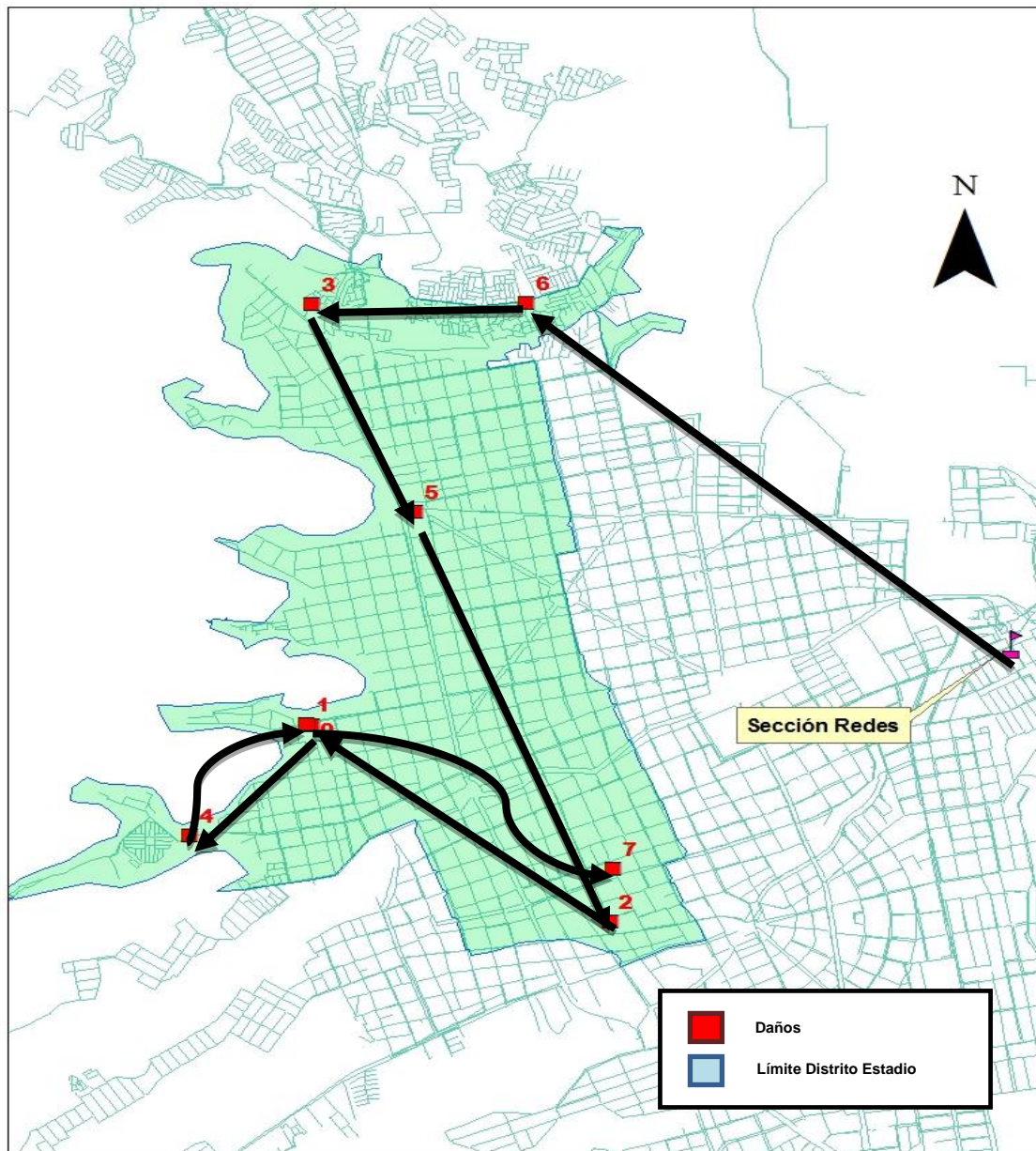
	Daño	Fuga Abierta			Fuga Contenida			TOTAL
		Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	
CUADRILLA 1	4451	2	31,403	62,806	3	12,947	38,841	101,647
	28213	2	2,995	5,989	6	1,036	6,219	12,208
	28537	2	3,157	6,313	9	492	4,428	10,741
	32701	2	2,140	4,281	12	412	4,940	9,220
CUADRILLA 2	33479	2	84,325	168,651	3	11,327	33,980	202,631
	28437	2	10,172	20,344	6	593	3,560	23,904
	6712	2	2,203	4,406	9	464	4,176	8,582
	27535	2	2,941	5,883	12	200	2,395	8,278
								\$ 377,211

Fuente: Elaboración propia.

Una vez se analizan los resultados al aplicar los tres métodos se puede evidenciar que el algoritmo CIACUA – amb S.A. E.S.P. representa un ahorro de \$ 872.983 diarios con respecto al método geográfico y \$98.562 diarios con respecto al del tamaño de la fuga.

Cabe destacar que estas cantidades equivalen al ahorro de un día en una zona que corresponden a la quinta parte de la ciudad, por lo que son indudables los beneficios de su implementación en poco tiempo.

Figura 18. Priorización según el algoritmo CIACUA – amb S.A. E.S.P. del ejemplo hipotético



Fuente: ANAYA, S. Priorización según el algoritmo CIACUA – amb S.A. E.S.P. del ejemplo hipotético. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

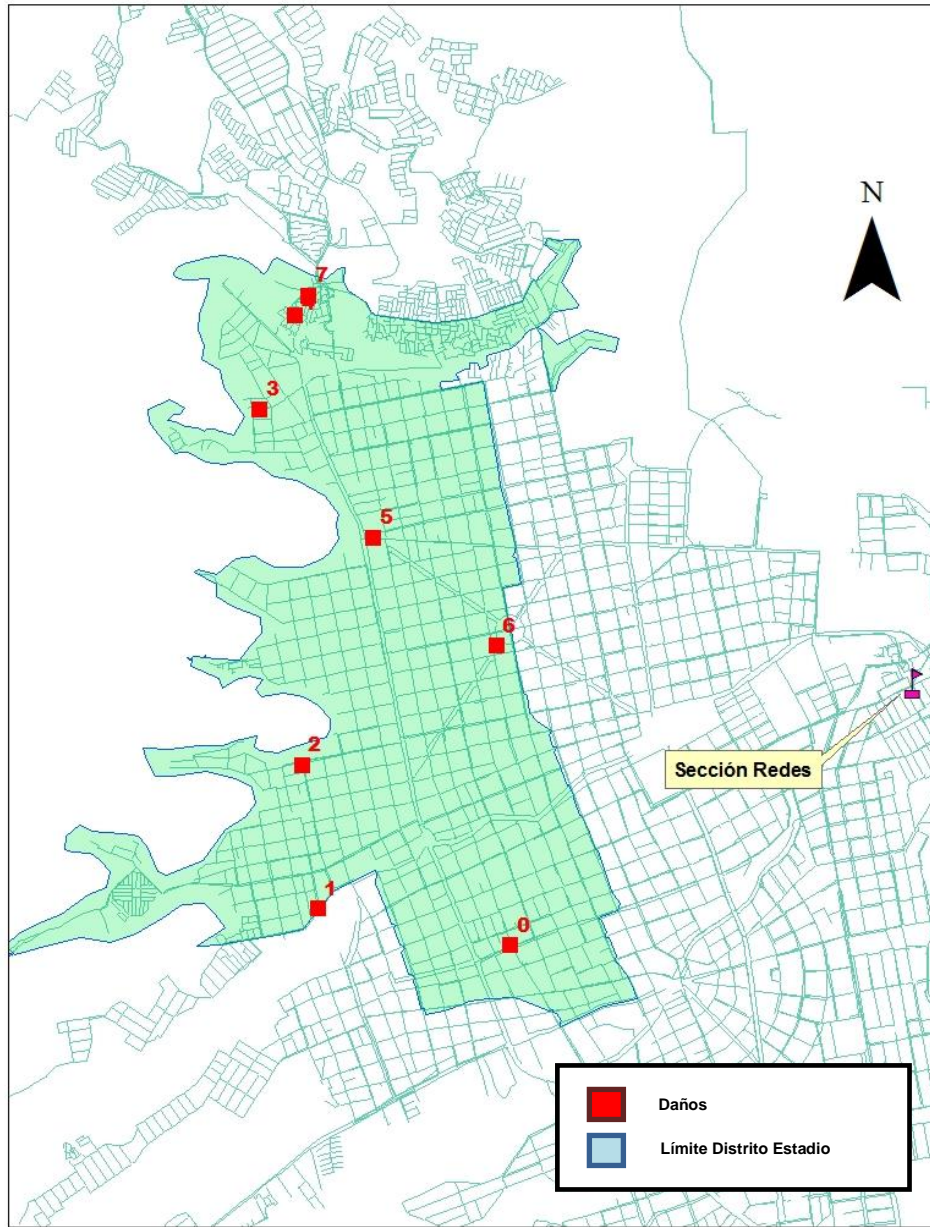
Ejemplo hipotético 3. Las características y distribución espacial de los eventos se presentan a continuación.

Cuadro 22. Principales características del ejemplo hipotético 3

Daño	ID_tubería	Diámetro (pulg)	Precio m3 (\$)	Coefficiente	Presión (psi)	Usuarios afectados	Caudal FA (lps)	Caudal FC (lps)	Costo FA (\$/hora)	Costo FC (\$/hora)
0	32824	2	1,262	0.5	37.89	11	2.57	0.13	11,695	596
1	16666	2	1,262	0.5	39.89	34	2.64	0.28	12,000	1,313
2	32041	2	1,262	0.1	34.3	11	0.49	0.06	2,225	294
3	28864	2	1,262	0.1	39.08	9	0.52	0.08	2,375	401
4	18713	2	1,262	0.1	44.45	80	0.55	0.59	2,533	2,718
5	17807	4	1,262	2.2	43.37	17	12.12	0.26	55,057	1,214
6	28545	2	1,262	6	53.13	10	36.59	0.15	166,189	695
7	27176	2	1,262	0.1	72.45	16	0.71	0.11	3,234	506

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del software MOVA.

Figura 19. Distribución espacial de los daños en el ejemplo hipotético 3



Fuente: ANAYA, S. Distribución espacial de los daños en el ejemplo hipotético 3. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

Cuadro 23. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 3 de acuerdo con el criterio geográfico.

	Daño	Fuga Abierta			Fuga Contenida			TOTAL
		Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	
CUADRILLA 1	28545	2	166,189	332,377	3	695	2,086	334,463
	17807	5	55,057	275,283	3	1,214	3,642	278,924
	16666	8	12,000	96,002	3	1,313	3,940	99,941
	27176	11	3,234	35,578	3	506	1,518	37,096
CUADRILLA 2	32824	2	11,695	23,391	3	596	1,787	25,177
	32041	5	2,225	11,127	3	294	882	12,009
	28864	8	2,375	19,004	3	401	1,203	20,207
	18713	11	2,533	27,866	3	2,718	8,153	36,019
								\$ 843,838

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 24. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 3 de acuerdo con el tamaño de las fugas

	Daño	Fuga Abierta			Fuga Contenida			TOTAL
		Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	
CUADRILLA 1	28545	2	166,189	332,377	3	695	2,086	334,463
	16666	5	12,000	60,001	3	1,313	3,940	63,941
	27176	8	3,234	25,875	3	506	1,518	27,393
	28864	11	2,375	26,130	3	401	1,203	27,333
CUADRILLA 2	17807	2	55,057	110,113	3	1,214	3,642	113,755
	32824	5	11,695	58,477	3	596	1,787	60,264
	18713	8	2,533	20,266	3	2,718	8,153	28,419
	32041	11	2,225	24,479	3	294	882	25,361
								\$ 680,929

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 25. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 3 de acuerdo con el algoritmo CIAUCA – amb S.A. E.S.P.

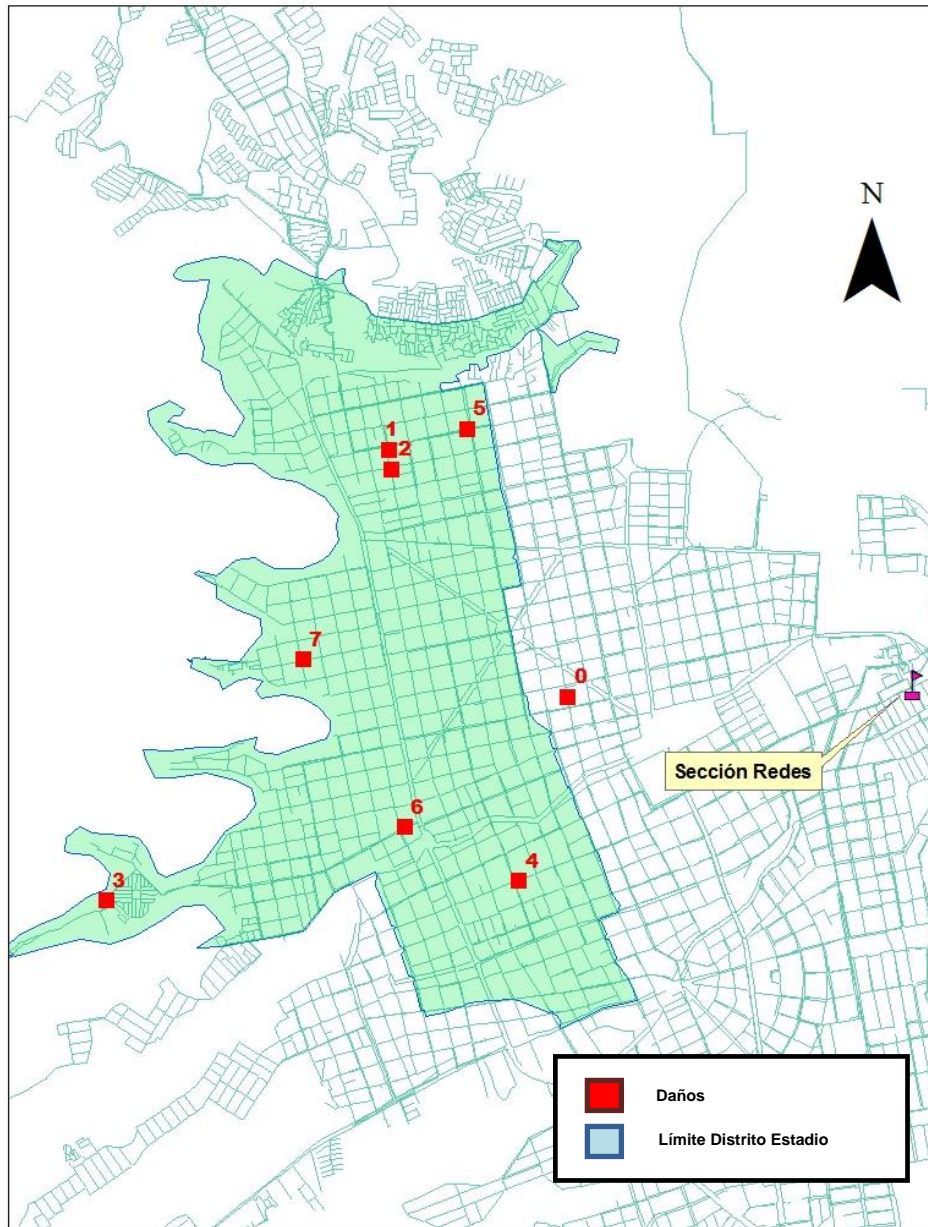
	Daño	Fuga Abierta			Fuga Contenida			TOTAL
		Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	
CUADRILLA 1	18713	2	2,533	5,067	3	2,718	8,153	13,219
	17807	2	55,057	110,113	6	1,214	7,283	117,396
	32824	2	11,695	23,391	9	596	5,360	28,751
	28864	2	2,375	4,751	12	401	4,812	9,562
CUADRILLA 2	16666	2	12,000	24,000	3	1,313	3,940	27,940
	28545	2	166,189	332,377	6	695	4,172	336,549
	27176	2	3,234	6,469	9	506	4,555	11,023
	32041	2	2,225	4,451	12	294	3,529	7,980
								\$ 552,422

Fuente: Elaboración propia.

En este caso se observa que el algoritmo desarrollado en conjunto por el CIACUA – amb S.A. E.S.P. representa un ahorro de \$128.507 con respecto al método del tamaño de la fuga y \$ 291.416 si se compara con el método geográfico.

Ejemplo hipotético 4. Dentro de las pruebas realizadas, se plantea un último ejemplo hipotético con eventos que se muestran a continuación.

Figura 20. Distribución espacial de los daños en el ejemplo hipotético 4



Fuente: ANAYA, S. Distribución espacial de los daños en el ejemplo hipotético 4 [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

Cuadro 26. Principales características del ejemplo hipotético 4

Daño	ID_tubería	Diámetro (pulg)	Precio m3(\$)	Coficiente	Presión (psi)	Usuarios afectados	Caudal FA (lps)	Caudal FC (lps)	Costo FA (\$/hora)	Costo FC (\$/hora)
0	26230	3	1,262	0.1	64.37	44	0.67	0.33	3,049	1,541
1	28667	2	1,262	0.1	41.31	17	0.54	0.14	2,457	669
2	28640	2	1,262	2.2	41.77	12	11.89	0.15	54,031	697
3	23539	4	1,262	2.2	58.13	198	14.034	0.77	63,738	3,517
4	53455	3	1,262	0.5	69.86	7	3.49	0.11	15,879	508
5	6550	2	1,262	0.1	64.69	13	0.672	0.148	3,056	673
6	52878	10	1,262	3.5	79.37	3663	26.08	31.71	118,487	144,041
7	28010	2	1,262	0.1	37.59	338	0.51	3.19	2,330	14,500

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del software MOVA.

Cuadro 27. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 4 de acuerdo con el criterio geográfico.

	Daño	Fuga Abierta			Fuga Contenida			TOTAL
		Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	
CUADRILLA 1	26230	2	3,049	6,097	3	1,541	4,623	10,720
	6550	5	3,056	15,281	3	673	2,018	17,299
	28640	8	54,031	432,250	3	697	2,091	434,342
	28010	11	2,330	25,627	3	14,500	43,499	69,127
CUADRILLA 2	53455	2	15,879	31,759	3	508	1,524	33,283
	52878	5	118,487	592,434	3	144,041	432,124	1,024,557
	28667	8	2,457	19,655	3	669	2,007	21,662
	23539	11	63,738	701,122	3	3,517	10,552	711,674
								\$ 2,322,662

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 28. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 3 de acuerdo con el tamaño de las fugas

	Daño	Fuga Abierta			Fuga Contenida			TOTAL
		Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	
CUADRILLA 1	52878	2	118,487	236,973	3	144,041	432,124	669,097
	28640	5	54,031	270,156	3	697	2,091	272,248
	6550	8	3,056	24,450	3	673	2,018	26,467
	28667	11	2,457	27,026	3	669	2,007	29,033
CUADRILLA 2	23539	2	63,738	127,477	3	3,517	10,552	138,028
	53455	5	15,879	79,397	3	508	1,524	80,921
	26230	8	3,049	24,389	3	1,541	4,623	29,012
	28010	11	2,330	25,627	3	14,500	43,499	69,127
								\$ 1,313,932

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 29. Orden de atención de los daños del ejemplo hipotético 4 de acuerdo con el algoritmo del CIACUA – amb S.A. E.S.P.

	Daño	Fuga Abierta			Fuga Contenida			TOTAL
		Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	Tiempo (hr)	Costo (\$)	Total	
CUADRILLA 1	52878	2	118,487	236,973	3	144,041	432,124	669,097
	23539	2	63,738	127,477	6	3,517	21,104	148,580
	28640	2	54,031	108,063	9	697	6,274	114,336
	28667	2	2,457	4,914	12	669	8,028	12,941
CUADRILLA 2	28010	2	2,330	4,660	3	14,500	43,499	48,159
	26230	2	3,049	6,097	6	1,541	9,245	15,343
	6550	2	3,056	6,112	9	673	6,053	12,165
	53455	2	15,879	31,759	12	508	6,095	37,854
								\$ 1,058,475

Fuente: Elaboración propia.

Como conclusión para el ejemplo hipotético 4, la metodología CIACUA – amb S.A. E.S.P. presenta un ahorro de \$255.457 con respecto al método del tamaño de la fuga y \$ 1.264.187 con respecto al método geográfico.

Análisis de sensibilidad a los tiempos de recorrido. Una vez realizados los distintos análisis, se ha demostrado las bondades de considerar criterios hidráulicos tales como el Costo de la Fuga Abierta y el Costo de la Fuga Contenida. Ahora bien es necesario considerar al utilizar el algoritmo de priorización del CIACUA –amb S.A. E.S.P. el aumento en los desplazamientos de personal, con respecto a otros métodos de priorización. Debido a lo anterior, es necesario considerar el efecto de los tiempos de recorrido, para corroborar la efectividad del algoritmo.

Hay que considerar los tiempos de recorrido como aquel intervalo que tardan los móviles desplazándose de un daño a otro a través de la ciudad. Para evaluar dicho fenómeno, así como la presencia de congestiones vehiculares en las vías de la ciudad, se realizaron algunos ensayos que consistieron básicamente en incrementar 20 minutos los tiempos utilizados en los análisis originales para considerar el efecto en los desplazamientos.

Seguido a este procedimiento, de tal manera que se pueda estudiar el impacto que tendría un programa de optimización de rutas, se disminuyeron los tiempos de viaje en 10 minutos, que es lo que se estima que se puede disminuir la implementación de un programa de esta naturaleza. Finalmente, se incrementan los tiempos de viaje en 10 minutos para considerar la presencia de tráfico u otros imprevistos. En el siguiente cuadro se presenta la variación en los efectos de los tiempos de viaje.

Cuadro 30. Costos de los ejemplos hipotéticos planteados con ahorros y retrasos.

Ejemplo Hipotético	Costos (pesos)			
	(1)	(2)	(3)	(4)
	Tiempo Reparación	Tiempo Reparación + Desplazamiento	Tiempo Posible Optimización ruta	Tiempo + congestión
		(1)+ 20 min	(2)-10 min	(2)+10 min
1	563,003	622,460	594,713	662,097
2	377,211	427,253	403,900	460,615
3	552,422	631,336	594,509	683,945
4	1,058,475	1,187,227	1,127,096	1,273,061

Fuente: Elaboración propia.

En los resultados se puede ver que al presentarse variaciones significativas en los tiempos de viaje para todos los ejemplos no se ven reflejados en incrementos sustanciales en los costos asociados a las fugas. Se puede concluir que en la priorización de la atención de los daños de un sistema de distribución, es mucho más importante el orden en que se atienden los daños que el camino que las cuadrillas tomen para llegar hasta él.

Cuadro 31. Resultados análisis de sensibilidad a los tiempos de viaje para los ejemplos hipotéticos.

Ejemplo Hipotético	Costo desplazamiento (\$)	Ahorro con posible optimización (\$)	Costo desplazamiento más congestión vial (\$)
1	59,456	31,710	99,094
2	50,042	26,689	83,403
3	78,914	42,087	131,523
4	128,752	68,621	214,586

Fuente: Elaboración propia.

Si se asume tal cual lo indica el ejemplo hipotético 2, un ahorro diario de \$872.983 para el Sector Estadio que representa aproximadamente el 20% de la ciudad, se puede llegar a una ahorro de \$ 1,593,193,376 al año para toda el área.

Estas estimaciones son hechas con base en un costo por metro cúbico de agua de \$1,261.53. Cabe destacar que cualquier variación porcentual en el costo del agua representa un cambio porcentual en los valores presentados en los ahorros.

6.1.6 Software MOVA. Dentro de la operación de un sistema de distribución de agua potable, hay que resaltar todo lo relacionado con la afectación en el servicio a los usuarios de un determinado sector, a causa de la presencia de trabajos ocasionados por un evento y a partir de ello, los cortes en el servicio, como situaciones comunes una vez se realizan mantenimientos y reparaciones en los elementos visibles de la red. El amb S.A. E.S.P. dentro de su ejercicio diario, considera que el servicio no debe interrumpirse sin previo aviso y en caso de que sea necesario hacerlo, se debe garantizar que los cierres se realicen afectando al menor número de usuarios posibles.

Para dar respuesta a esta premisa, es indispensable contar con una topología detallada de las redes que incluya el estado y ubicación de las válvulas de cierre, así como la posición de los suscriptores y el consumo asociado.

Como parte de los planes de gestión de las empresas prestadoras del servicio de agua potable desde hace mucho tiempo, estos conceptos han sido solo teóricos, y es por ello que el amb S.A. E.S.P. a partir del uso de Sistemas de Información Geográfica y programas de simulación hidráulica, y consciente de la importancia de que las tecnologías de información suplan dichas necesidades, ha empleado recursos técnicos y humanos para solventar dicha necesidad.

Consciente de la importancia de una herramienta informática que supla la necesidad, en la presente tesis de maestría, se quisieron aprovechar los conocimientos adquiridos durante los últimos años en simulación computacional de redes de distribución y Sistemas de Información Geográfica, para crear un programa que permita establecer las válvulas a cerrar y los usuarios afectados por un daño en tiempo real. Como se verá más adelante, el programa MOVA además de cumplir esta función, permite obtener información indispensable para la priorización de daños, que es un elemento fundamental en la Gestión Integral de Redes.

¿Qué es MOVA?. El programa MOVA (Modelación y Operación de Válvulas de Acueducto) es una herramienta informática desarrollada dentro del programa Visual Basic 6.0 y los lenguajes de programación Mapserver y PHP, la cual permite establecer las válvulas que deben cerrarse para aislar un sector de una red de distribución, cuando tienen que realizarse labores de reparación y mantenimiento.

Dentro de sus funcionalidades, el programa MOVA, permite establecer cuáles son los usuarios que resultan afectados por el corte del servicio y calcula los caudales que éstos dejan de consumir. Así mismo, cuenta con un módulo capaz de calcular el caudal que se pierde por los daños, a partir de las características geométricas del mismo y las presiones calculadas a partir de los resultados de un modelo hidráulico calibrado. Para obtener sus resultados, el programa utiliza parte del módulo de cálculo del programa EPANET desarrollado por la Agencia de

Protección Ambiental de Estados Unidos, el cual se encarga de determinar la hidráulica de la red, necesaria para alcanzar una respuesta óptima. Por otro lado, utiliza el archivo de salida del programa SIGCONSUMO desarrollado igualmente por el autor de este documento para el desarrollo de la Gestión Integral de Redes.

Los resultados se despliegan de forma gráfica, a través del empleo de los lenguajes MapServer y PHP, se visualizan por medio de un navegador web y se exportan por intermedio de reportes en archivos planos, los cuales posteriormente serán utilizados por la ERP²² del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P., el cual se encarga de su procesamiento al interior de las dependencias que conforman la empresa. El programa MOVA constituye una herramienta fundamental en el desarrollo y aplicación de la metodología de priorización de daños propuesta en los numerales anteriores ya que permite obtener toda la información necesaria para aplicar los criterios y calcular los parámetros en los que se basa.

Fase de Planeación. Dentro de la planeación de este entregable del proyecto se establecieron las prioridades de desarrollo y las etapas que se debían afrontar con el fin de lograr el máximo beneficio a menor costo. Aquí se definieron los objetivos generales y específicos que se deberán alcanzar al desarrollar este producto software, se determinó la necesidad del amb S.A. E.S.P. de contar con una herramienta que responda a las expectativas, en cuanto a la organización y optimización de la atención correctiva de los daños, se valoró el alcance del producto computacional propuesto como mecanismo en el control de los procesos propios relacionados con la actividad de priorización. Igualmente, se identificó y delimitó el rol de cada usuario y se determinó las expectativas que podrán suplirse, se delimitó el alcance del sistema propuesto, Finalmente, se escogió a Bucaramanga (Santander) como el municipio de donde se tomará la información para el desarrollo piloto.

En esta primera fase del trabajo se ratificó el objetivo específico presentado en el anteproyecto, teniendo en cuenta el limitante tiempo para la entrega del trabajo. También se trazaron las siguientes tareas preliminares que se deben cumplir para el logro del objetivo propuesto:

- **Recopilación de datos.** Como primera tarea se definió la recopilación de información relacionada con la actividad que tiene incidencia en el desarrollo del proyecto. Para esto se solicitó a la División Distribución de la Gerencia de Operaciones, permiso para hacer uso de los datos cartográficos digitales y alfanuméricos correspondientes al Área Metropolitana de Bucaramanga.

²² ERP: es una solución que permite a las compañías centralizar e integrar los procesos y captura de información de áreas como finanzas, ventas, compras, distribución y logística, planeación y producción. www.intellego.mx/es/erp-planificacion-de-recursos-empresariales

- **Validación de los datos.** Una vez recibida la información se procedió a la revisión de su contenido, encontrándose conforme a la requerida y con ella se hicieron algunas pruebas con la herramienta ArcGIS.
- **Documentación en áreas específicas del desarrollo del proyecto.** Para el desarrollo de este proyecto fue necesario adquirir documentación relacionada con el modelamiento hidráulico (manuales y procedimientos), cartografía en general (sistemas de referencia, escalas, formatos), bases de datos y demás utilidades de las herramientas SIG.
- **Definición del alcance del proyecto.** Si bien es cierto que se le está dando un alcance general a la fase de implantación de la aplicación, los entregables se limitaron al análisis de la información hidráulica y de sus procesos, y el diseño del sistema mediante la estructuración de modelos de datos; finalmente como demostración de su utilidad se desarrolló una prueba piloto con datos de eventos del Distrito Estadio previamente mencionado.
- **Definición de las necesidades a resolverse.** Analizados los documentos, los procesos, la naturaleza de los datos y las necesidades que se tienen en materia de datos confiables, precisos y actualizados como insumo para el desarrollo de múltiples sistemas de Información geográfica se determinó como prioritario el desarrollo de una herramienta que facilitara la integración de los resultados de la modelación hidráulica, con la cartografía digital básica. También es fundamental que una vez se logre esta integración, la misma herramienta facilite su asociación con los datos temáticos del Área Metropolitana de Bucaramanga, para que así esta información se convierta en plataforma para el desarrollo de cualquier SIG constituyendo a las tuberías, válvulas de corte y suscriptores como las principales unidades espaciales y sea de esta forma la principal herramienta para la priorización de las labores de mantenimiento correctivo.
- **Identificación y definición de los usuarios y descripción de sus roles.** En el siguiente cuadro se muestra el tipo e identificación de los usuarios del sistema y se describe los roles de cada uno de ellos.

Cuadro 32. Descripción de usuarios

Tipo	Nombre	Descripción y Roles
INTERNO	Administrador del Sistema	<p>Usuario interno que administra la base de datos, la aplicación de escritorio y el visor geográfico.</p> <p>Roles del administrador:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Consulta, navegación y salida gráfica. • Cargue de mapas al visor geográfico. • Administrador del sistema. • Administrador de la base de datos • Administrador de usuarios.
		<p>Usuario de consulta de datos espaciales y atributos desde desktop o vía web.</p>

Tipo	Nombre	Descripción y Roles
	Funcionarios del amb S.A. E.S.P.	Roles del Funcionario amb S.A E.S.P.: <ul style="list-style-type: none"> • Consulta, navegación y salida gráfica.
EXTERNO	Municipios y Otras entidades	Usuario de consulta de datos espaciales y atributos desde desktop o vía web. Roles del Funcionario amb S.A E.S.P.: <ul style="list-style-type: none"> • Consulta, navegación y salida gráfica.

Fuente: Elaboración propia.

Fase de análisis. En esta fase se hizo un análisis de la información y determinación de requerimientos. Para esta etapa se dio respuesta a los siguientes interrogantes:

- ¿Cómo es el proceso de atención correctiva de los daños?
- ¿Qué tipo de información maneja y cuál es la naturaleza de los datos?
- ¿Cuál es el grado de eficiencia que se da en los procesos y que tan confiable son sus resultados?
- ¿Qué requieren los usuarios?

En esta fase se miró el estado actual de la Sección de Redes (responsable del proceso), en cuanto al tipo de información que maneja, los procesos que ejecuta, la naturaleza de los datos y las necesidades de los usuarios en cuanto a integridad, precisión y actualización de la información, partiendo de las dificultades y de las falencias.

Como primer paso se abordó un inventario de toda la información relacionada con el ámbito de estudio usado como insumo o como el resultado de los procesos de su actividad misional. Esta información está representada en: cartografía básica, información alfanumérica, planos catastrales temáticos, así como la información digital organizada en bases de datos. Se consignó en un documento el tipo de dato, su formato, la escala, los sistemas de referencia, las limitaciones de uso y las incompatibilidades, entre otros.

Como segundo paso, se analizaron las bondades de una información bien estructurada, la cual cumple con los estándares de calidad e interoperabilidad, convirtiéndose en insumo fundamental para el desarrollo de múltiples sistemas de información geográfica.

Una vez conocida la naturaleza de los datos y establecidos los requerimientos de los usuarios, se encontró viable el desarrollo del Sistema de Información MOVA desde el punto de vista técnico, operativo y económico.

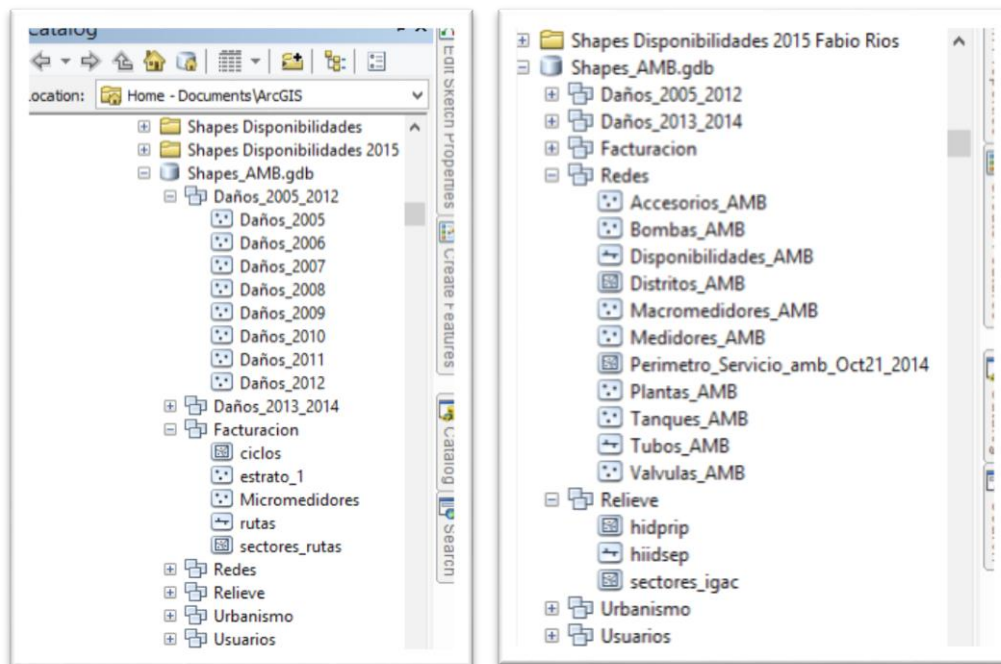
Del análisis de la información existente, de la observación de los procesos implementados por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. y teniendo como objetivo suplir los requerimientos de los usuarios, se presentó una serie de observaciones orientadas a mejorar la calidad de la información y por consecuencia la eficiencia de dichos procesos.

- **Información General del Acueducto Metropolitana de Bucaramanga S.A. E.S.P.** Tiene la cartografía básica de su área de cobertura; elabora el catastro de los elementos visibles de la red de distribución de agua; realiza el inventario de las características de dichos elementos; adelanta investigaciones geográficas como apoyo al desarrollo territorial; dentro de su planta física de personal, cuenta con profesionales que se capacitan en tecnologías de información geográfica; esto con el fin de apoyar los procesos de planeación y operación del servicio de acueducto.
- **Análisis de la Información – Inventario de Datos.** Entendiendo a un SIG como una integración organizada de hardware, software y datos geográficos tendientes a la resolución de problemas complejos de planificación y gestión, cobra vital importancia el dato, por lo tanto se requiere su plena identificación y definición.

A continuación se describirán en forma detallada el inventario de datos que el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga produce y que son objeto de estudio para este desarrollo.

- **Información digital (vectorial).** La información digital catastral se encuentra alojada en una Personal Geodatabase de ArcGIS 9.3 que contiene los elementos visibles de la red (tuberías, válvulas, uniones, tanques de almacenamiento, etc.), presenta la estructura de la figura siguiente.

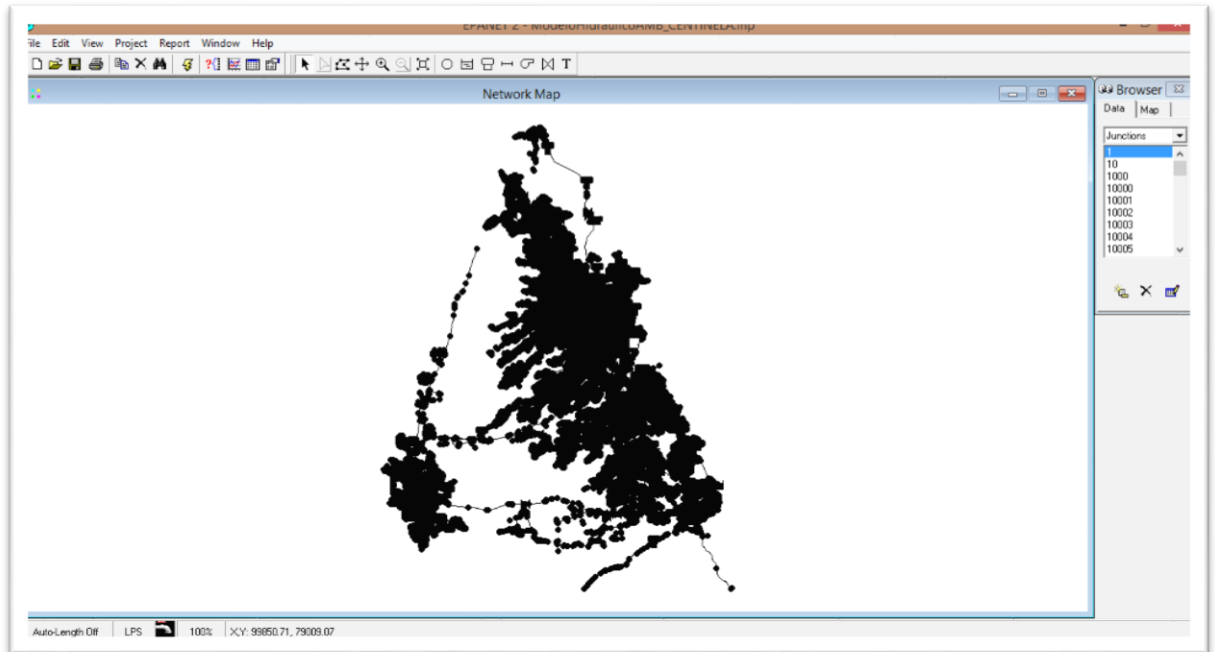
Figura 21. Estructura de la Personal Geodatabase de la Información Operativa del amb S.A. E.S.P.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A.E.S.P.

- **Inventario de datos alfanuméricos.** Esta información está disponible en el Sistema Integrado de Información (SII++): Listado de suscriptores del servicio de acueducto, con sus características (uso legal, dirección, código, nombre, etc.) facturados mes a mes. Consumos históricos en m3/mes de los suscriptores del servicio de acueducto.
- **Toponimia (nombres geográficos).** Existen unas coberturas digitales en formato SHAPEFILE que dentro de él contienen nombres geográficos de sitios de interés dentro del Área Metropolitana de Bucaramanga.
- **Información alfanumérica de modelación hidráulica.** A continuación se expone la información alfanumérica del modelo hidráulico generado por el software EPANET.

Figura 22. Modelo Hidráulico de las redes de acueducto del amb S.A. E.S.P.

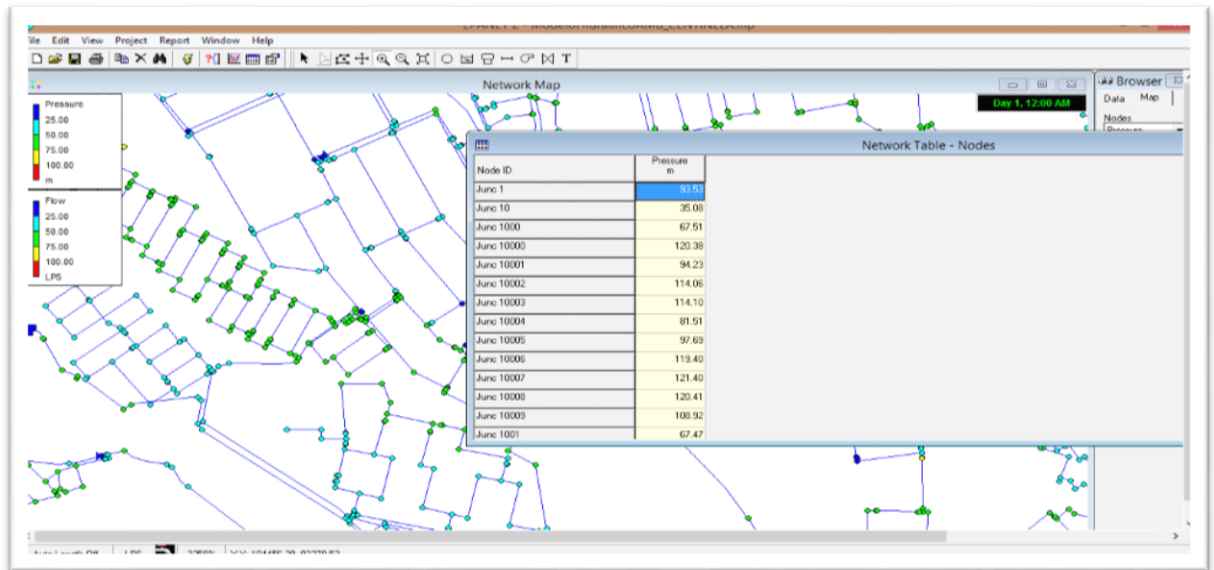


Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.

Listado de Nodos del modelo con su presión en m.c.a (metros de columna de agua)

Listado de válvulas de corte con su identificador.

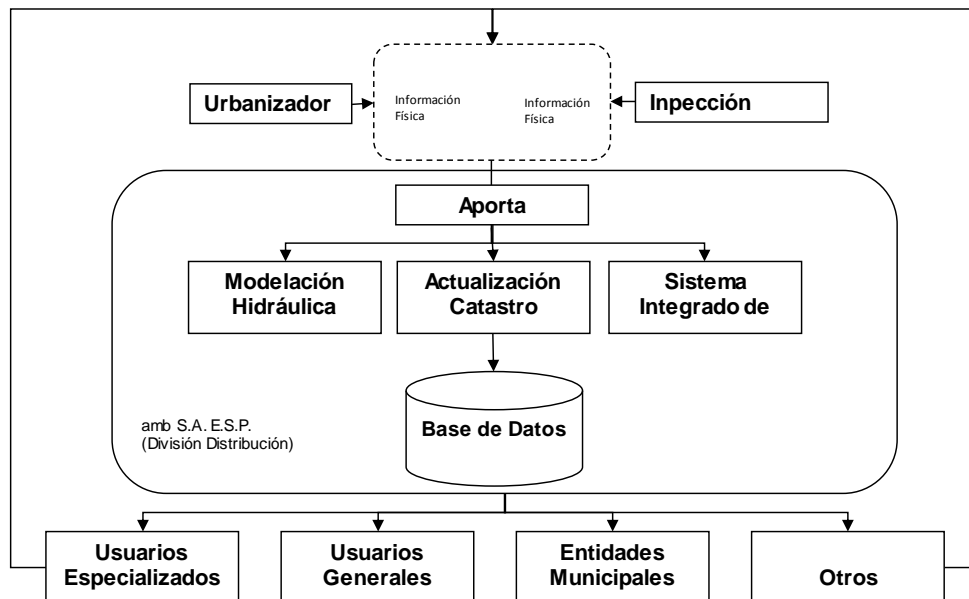
Figura 23. Tabla de los nodos de presión del modelo hidráulico.



Fuente: Elaboración propia desde el software EPANET.

- **Flujo de información.** El flujo de información desde y hacia la base de datos se muestra en la siguiente figura.

Figura 24. Flujo de la información cartográfica en el amb S.A. E.S.P.



Fuente: Elaboración propia.

- **Naturaleza de los datos geográficos – Formato de Información Geográfica.** Los datos alfanuméricos del SII++ están almacenados en base de datos Advantage y se dispone de ellos a través de archivos planos en formato texto (.txt). Además, las coberturas o capas de datos cartográficos digitales se entregan en formatos shapefile (.shp). Los datos de los modelos hidráulicos se disponen a través de archivos planos en formato texto (.txt).
- **Naturaleza de los datos geográficos – Formato de salida.** Las escalas utilizadas para las salidas de productos cartográficos son “Escala de dibujo”, en el que por ejemplo 1 metro de tubería, es representado por un metro de polilínea.
- **Naturaleza de los datos geográficos – Sistema de referencia.** El IGAC mediante resolución 068 del 28 de enero de 2005 adoptó MAGNA SIRGAS (marco geocéntrico nacional de referencia, como densificación del sistema de referencia geocéntrico para las Américas) como sistema de referencia oficial del país, en reemplazo del Datum BOGOTÁ, definido en 1941. MAGNA SIRGAS garantiza la compatibilidad de las coordenadas colombianas con las técnicas espaciales de posicionamiento, por ejemplo los sistemas GNSS

(global navigation satellite systems), y con conjuntos internacionales de datos georreferenciados²³.

Fase de diseño. Relevante dentro del proceso de diseño de cualquier herramienta computacional, es el hecho de definir el tipo de arquitectura que va a utilizar; ella se encarga de abstraer el comportamiento, restricciones y características que va a tener el aplicativo final.

Hay que dejar en claro que la arquitectura busca definir por medio de capas y componentes cuáles van a ser las responsabilidades, la interacción entre cada uno de ellos y su ubicación física. Por ejemplo en el caso de la ERP del amb S.A. E.S.P. (SII++), el cual es un sistema distribuido, hay componentes que están en un servidor central con responsabilidades específicas de seguridad, persistencia, procesamiento y ocurrencia, entre otras. Mientras que los componentes instalados en computadores como los de la Sección de Redes, solo se encargan de acceder a cierta información y modificar otra, todo esto bajo restricciones y protocolos de seguridad que impiden acceso total a los datos.

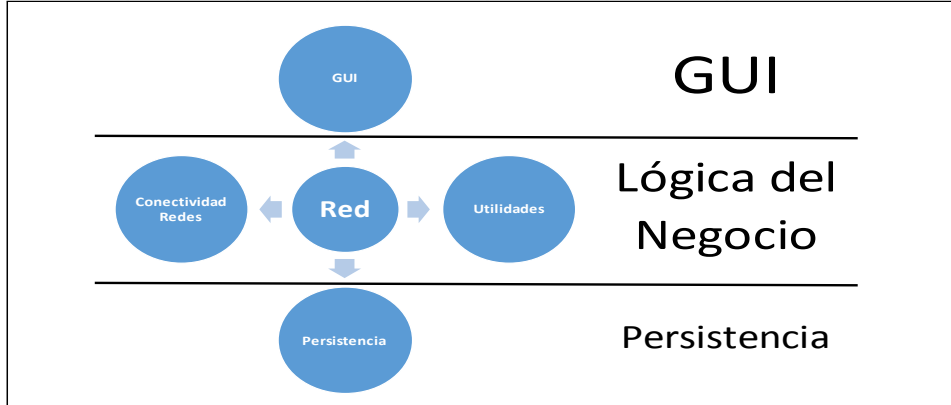
Dentro del diseño del programa MOVA se pensó en una arquitectura de tres capas, Interfaz – Lógica – Persistencia. Esto permite que se separen y definan muy bien las responsabilidades para mejorar el entendimiento del programa, tanto en el proceso de implementación como para hacerle mantenimiento y mejoras a la herramienta una vez ésta se ha terminado de implementar. En la Figura siguiente se muestran las tres capas del programa MOVA, en la capa GUI (Graphic User Interface, por sus siglas en inglés) se encuentran las clases relacionadas con la interfaz gráfica, las cuales se encargan de interactuar con el usuario pidiendo y recibiendo información de él para transmitir los mensajes a la lógica del negocio.

La lógica del negocio se encarga de recibir las solicitudes del usuario para presentar cada uno de los componentes de la red, comunicarse con el programa EPANET para correr la hidráulica del modelo, ejecutar los algoritmos de búsqueda de válvulas y extraer de éste la información necesaria para la priorización de daños.

En el último nivel se encuentra la persistencia, en ella están las clases que se encargan de extraer y escribir información en el navegador web, archivos planos y los relacionados con el sistema de información geográfica que usa MOVA.

²³ Sistema de referencia MAGNA – SIRGAS. [consulta: 10/02/2015]. Disponible en <http://www.igac.gov.co:8080/igac_web/UserFiles/File/MAGNAWEB_final/MAGNAPpal.htm>

Figura 25. Arquitectura tres capas del programa MOVA



Fuente: Elaboración propia.

Es importante resaltar que el aplicativo es un programa “standalone”, lo cual significa que todos sus componentes están instalados y se ejecutan en un mismo computador y no hay comunicación con alguna otra máquina.

El programa MOVA fue desarrollado para implementarse usando la programación orientada por objetos, la cual permite que el mundo del problema se pueda abstraer de tal forma que en el modelo computacional existan entidades que se identifiquen y comporten como lo harían en el mundo real. Por ejemplo, se puede nombrar la entidad “Tubo”, el cual es posible identificar por algún carácter como ocurre en los planos topológicos y tiene atributos de longitud, ubicación, vértices, entre otros.

- **Diccionario de datos.** El diccionario de datos se puede definir como el conjunto de metadatos que contiene las características lógicas y puntuales de los datos que se manipulan en un sistema y que incluyen nombre, tipo de dato, tamaño y descripción. Este diccionario que se elabora para manejar el volumen de información del proyecto, facilita la determinación de requerimientos y sirve de guía para el administrador de la base de datos. (Ver Anexo A.)
- **Modelo físico del sistema.** En el modelo físico se destaca el trabajo sobre Plataforma Windows, ya que es un software que permite el manejo de programas convencionales, los cuales en la mayoría de los casos no presentan ningún tipo de restricción, como elementos adicionales a éstos, se efectuará el trabajo mediante PostgreSQL y Microsoft Access quienes manejan un lenguaje SQL.

El motor de base de datos PostgreSQL facilita el manejo de la información espacial, en los que se destaca el análisis y generación de consultas de una forma muy sencilla, mediante su extensión PostGIS. A su vez Microsoft Access permite integrar datos con facilidad, ya que puede operar todo tipo de dato, como: tipo entero, decimales, fechas y comandos lógicos; una vez se han

identificado en el modelo lógico las variables a utilizar se les asigna un tamaño que está ligado a las convenciones empleadas dentro del espacio de trabajo.

La parte hardware consta de un PC que no requiere características de última tecnología, ya que se ha diseñado un sistema orientado al manejo de la información por cualquier tipo de usuario sin tener demasiadas exigencias.

- **Esquema de software utilizado.** A continuación se nombran los programas utilizados para la ejecución e implementación del sistema: Navegadores Web Mozilla Firefox y Google Chrome, Toolkit EPANET, Base de Datos PostgreSQL y Microsoft Access, Aplicación de Modulo PostGIS, Servidor Apache/MapServer, Java Script, Php y Visual Basic 6.0.

Es importante resaltar que si no se conoce la hidráulica de la red, no es posible determinar con certeza cómo se debe operar la misma para encontrar soluciones al problema de aislar un tubo totalmente del sistema. De igual manera, la hidráulica de la red, la cual por lo general se maneja como un modelo digital, debe representar lo más cercanamente posible aquello que está en campo instalado y funcionando. Es por eso que tener un modelo hidráulico calibrado es vital e indispensable para poder usar el algoritmo que se explica a continuación.

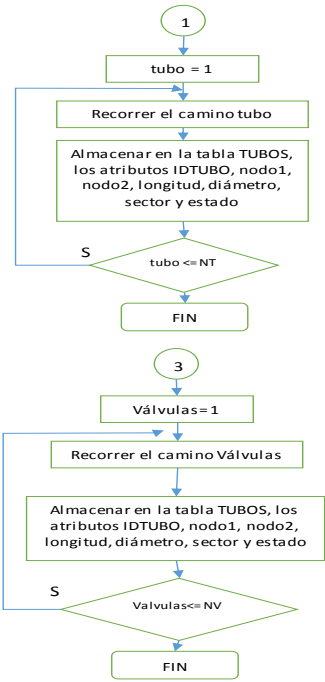
Para determinar las válvulas que se deben cerrar para que un tubo se quede sin agua, se sigue el siguiente algoritmo:

- Ingresar un modelo hidráulico calibrado realizado en el software EPANET.
- Leer del archivo INP (EPANET) los tubos de la red.
- Recorrer todas las tuberías y almacenar en la base de datos el identificador de la tubería, de los nodos inicial y final, la longitud, diámetro, sector y estado.
- Leer del archivo INP (EPANET) los nodos de la red.
- Recorrer todos los nodos de caudal y almacenar en la base de datos el identificador de los nodos de caudal y las coordenadas x, y.
- Leer del archivo INP (EPANET) las válvulas de la red.
- Recorrer todas las válvulas cuyo indicador inicia por "V", que guarda la información de las válvulas almacenadas como tubos dentro de la base de datos.
- Seleccionar los tubos válvulas 'V'
- Seleccionar los nodos de caudal (inicial, final) que hacen parte de cada tubo 'V'
- Guardar dicha información en la base de datos
- Ingresar el usuario el identificador del tubo afectado
- Ingresar el coeficiente C, para describir la fuga
- Ingresar el costo del \$/m³
- Seleccionar las características del tubo

- Seleccionar nodo inicial y nodo final del tubo afectado
- Recorre todos los tubos válvulas y compara sus coordenadas con las del tubo afectado
- Calcula las distancias
- Almacena dicha información en la base de datos
- Ordenar los datos por distancia
- Abrir el modelo hidráulico, con ayuda de la DLL de programación
- Buscar el nodo final de la tubería del daño y calcular su presión (psi)
- Recorrer cada línea (tubería-válvula) y cambiar el estado (ESTADO=0)
- Simular el modelo en cada iteración
- Validar la presión de los nodos de la tubería afectada, considerando si tienen presiones por debajo de -1000 p.s.i.
- Recorrer las válvulas de la más lejana a la más cercana con estado = 0
- Abrir una a una (ESTADO=1), ejecutar el modelo y validar la presión
- Si la presión ≤ -1000 p.s.i. entonces la válvula se quita del algoritmo, de lo contrario se considera que dicha válvula debe cerrarse
- Se genera un archivo plano con dichas válvulas a cerrar
- Selecciona usuarios afectados directamente por los nodos adjuntos al tubo
- Calcula el caudal de fuga abierta
- Calcula el caudal de fuga contenida
- Calcula el costo de la fuga abierta
- Calcula el costo de la fuga contenida
- Genera el archivo plano con la información de los usuarios y demás operaciones.
- Abre el navegador con el visor geográfico de la información del evento y su afectación.

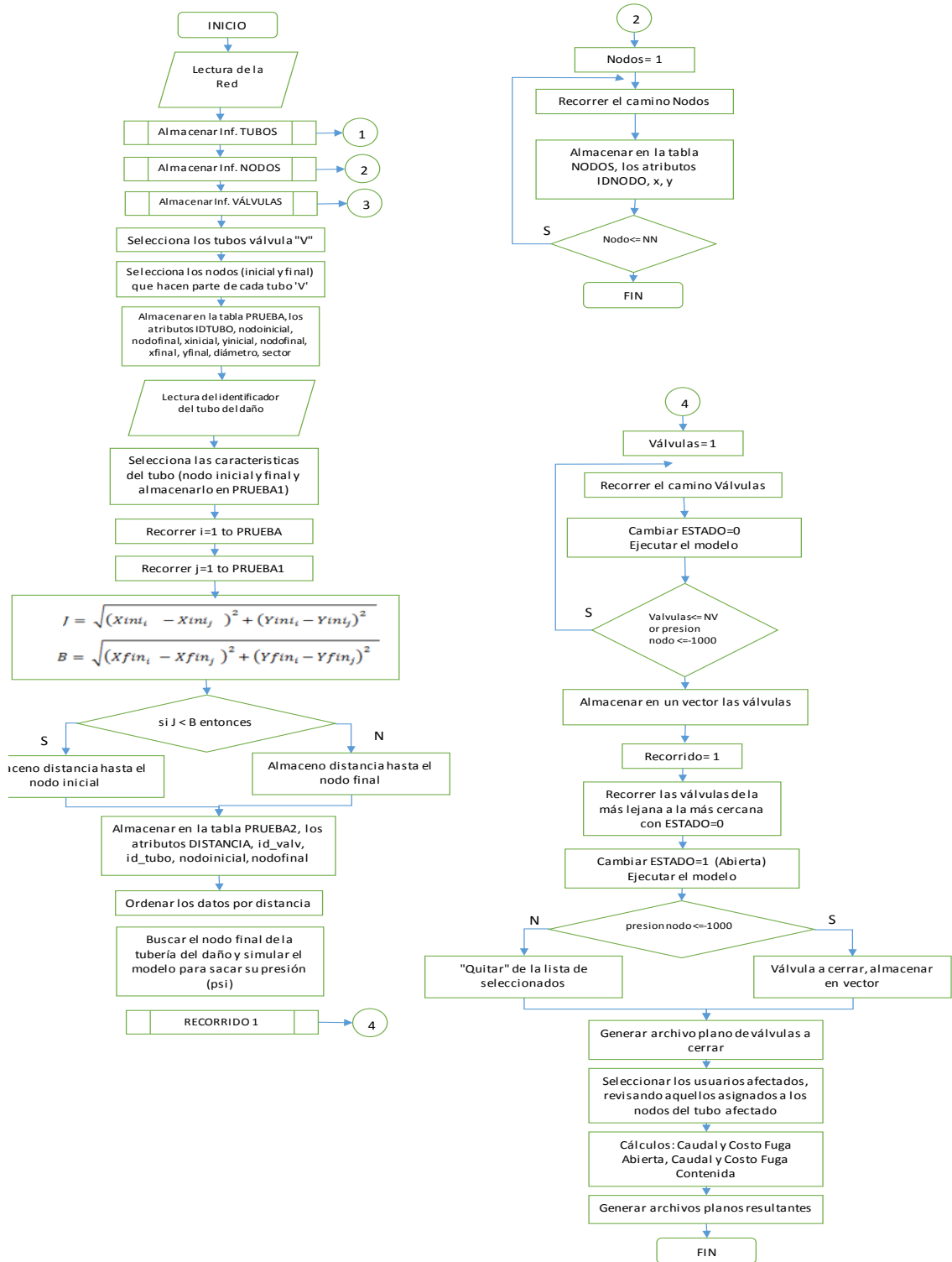
El diagrama de flujo de este algoritmo se muestra en la siguiente figura. Una vez se han determinado las válvulas a cerrar, se corre un algoritmo adicional que evalúa la redundancia de válvulas. Dado que hay algunas (válvulas) que a pesar de que permanezcan abiertas, el flujo no llega al tubo del daño, entonces se determinan cuáles realmente son útiles y cuáles no, para evitar que se dirija el personal encargado de cerrar las válvulas a hacer un trabajo inoficioso; este concepto de la redundancia de válvulas se representa en las siguientes figuras.

Figura 26. Algoritmo de funcionamiento del software MOVA (I)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. Algoritmo de funcionamiento del software MOVA (II)



Fuente: Elaboración propia.

Fase de desarrollo e implementación del proyecto. Para desarrollar este programa, una vez se tuvo la arquitectura y diseño de la herramienta, se evaluó el ambiente de desarrollo. Se consideró que por tratarse de información relacionada con datos geográficos y eventos que muy fácilmente se puede visualizar por capas como lo hace un Sistema de Información Geográfica, se definió que el aplicativo final se ejecutaría sobre MapServer, complementado con un desarrollo web en PHP. De igual manera, el lenguaje de programación que se utilizó dentro del aplicativo de escritorio fue Visual Basic 6.0, ya que permite manipular y abstraer el problema.

Al tener los modelos del sistema ya definidos y el modelo de base de datos listo, se procedió a construir la base de datos del SIG utilizando un lenguaje de consulta de datos, donde una de sus características es el manejo del álgebra y el cálculo relacional permitiendo lanzar consultas con el fin de recuperar información de interés de una base de datos, de una forma sencilla. Se procede a recopilar y preparar la información necesaria para la construcción del banco de datos SIG, en este caso se tiene en cuenta dos tipos de información: a. Adquisición de Información alfanumérica. b. Adquisición de Información Cartográfica (formato digital).

A partir de la integración del modelo cartográfico y de la base de datos, se generó la construcción de la interfaz web, la cual permite la interacción usuario/sistema. Se implementaron lenguajes de programación y software libre para dichos desarrollos.

Además, se evalúa el funcionamiento del sistema, con base en el diseño planteado, así como el cumplimiento de los requerimientos funcionales y no funcionales, fue necesario realizar diferentes pruebas de la operatividad del sistema y la interacción con el usuario. En esta actividad se realizaron las correcciones pertinentes al sistema y la construcción del Manual de Usuario del Sistema.

Fase del mantenimiento del sistema. Para aprovechar toda la funcionalidad de un sistema SIG es necesario disponer de información actualizada en todo momento. Para ello, se capacita al personal encargado de la actualización de la base de datos y programas empleados para el desarrollo del SIG.

Sin embargo, para el mantenimiento del Sistema se hace necesario contar con la ayuda de un profesional con conocimiento en el área de los sistemas de información geográfica, además, se recomienda realizar la actualización del sistema semestralmente (información cartográfica y modelo hidráulico).

6.1.7 Modelo Matemático de Predicción de daños.

Para el presente proyecto se encuentra imposible emplear modelos probabilísticos multivariados por la inexistencia de gran parte de la información. Con la información que se cuenta es posible invertir una gran parte del tiempo en desarrollar un óptimo agrupamiento de los datos y analizar la información con modelos determinísticos y posiblemente algún modelo probabilístico de una variable. El modelo que será analizado entre los modelos determinísticos, es el modelo lineal.

Modelo Lineal. El modelo lineal fue inicialmente empleado por Kettler & Goulter en 1985. Requiere la siguiente información: 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: tipo de tubería, diámetro, suelo, tipo de daño, etc.

La ecuación del modelo es la siguiente:

$$N = K_0 Edad$$

Donde K_0 corresponde al parámetro de regresión y N al número de daños al año.

Información Recolectada. Como lo indica la metodología de Kleiner&Rajani, para un análisis de tipo preventivo predictivo es indispensable contar con información de todo tipo. A la fecha, cada uno de los estudios realizados considera diferentes técnicas y parámetros en búsqueda de proveer de manera más confiable una tasa de fallas. El deterioro de las tuberías usualmente es resultado de la combinación de muchos factores. Cada uno de estos factores tiene una influencia sobre la probabilidad del fallo de la tubería. Los factores más influyentes pueden ser clasificados como:

- Características de las tuberías incluyendo el tipo de material, diámetro, longitud, rugosidad y edad.
- Características del ambiente (tipo de suelo, condiciones del clima)
- Características operativas de la red, incluyendo variaciones de presión.

Hay que considerar dado que la influencia de estos factores es específica de cada ubicación, la correlación entre las variables, la no-linealidad, variables cualitativas y la dificultad de expresar matemáticamente la relación de los parámetros.

Por último, se debe tener en cuenta que el proceso de predicción en general es completamente dependiente de la inspección de los estados actuales de la red de distribución y el análisis de registros históricos. De su precisión y calidad de la información recopilada dependen los resultados del presente análisis.

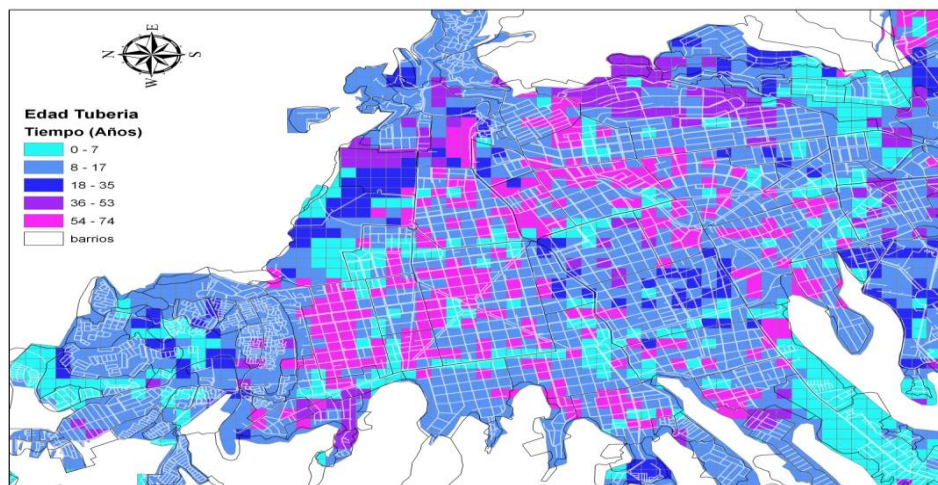
Topología. La red de distribución del Área Metropolitana de Bucaramanga está formada por tuberías de: Asbesto Cemento, Hierro Galvanizado, Hierro Dúctil, PVC, Hierro Fundido y Polietileno. De todos los materiales presentes se destaca el PVC por representar el 67.7% de la red en longitud. Le sigue Asbesto Cemento con 22% y Hierro Galvanizado con un 5.14%.

Los diámetros de las tuberías se encuentran entre 1 pulgadas y 42 pulgadas. El diámetro más frecuente en longitud de tubería es de 2 pulgadas (30.93%) y le sigue 3 pulgadas con 26.30%. Las tuberías de 4 pulgadas y 6 pulgadas son el 12.9% y 11.2% de la red.*

Edades. Según la literatura relacionada en este documento, se ha mostrado una relación directa entre la edad de una tubería y su propensión al daño. Esta relación se fundamenta en el deterioro estructural que presenta todo material con el tiempo. Como consecuencia, es indispensable, en el momento del análisis, contar con la información de instalación de las tuberías. Igualmente, esta información facilita el reconocimiento de qué daños son asociados a los tubos en análisis y qué daños se ocasionaron en una tubería previamente reemplazada.

La Figura siguiente presenta la localización de cada tubo y se destaca la información de las edades. Durante su desarrollo se encontró que no existía una información completa detallada de la edad de las tuberías. Como consecuencia, fue necesario buscar canales de información que facilitarían alguna aproximación al problema. Se consideró que la distribución de materiales combinada con barrios podría proporcionar un avance en la solución del problema.

Figura 28. Mapa de distribución de edades de las tuberías en la red de distribución



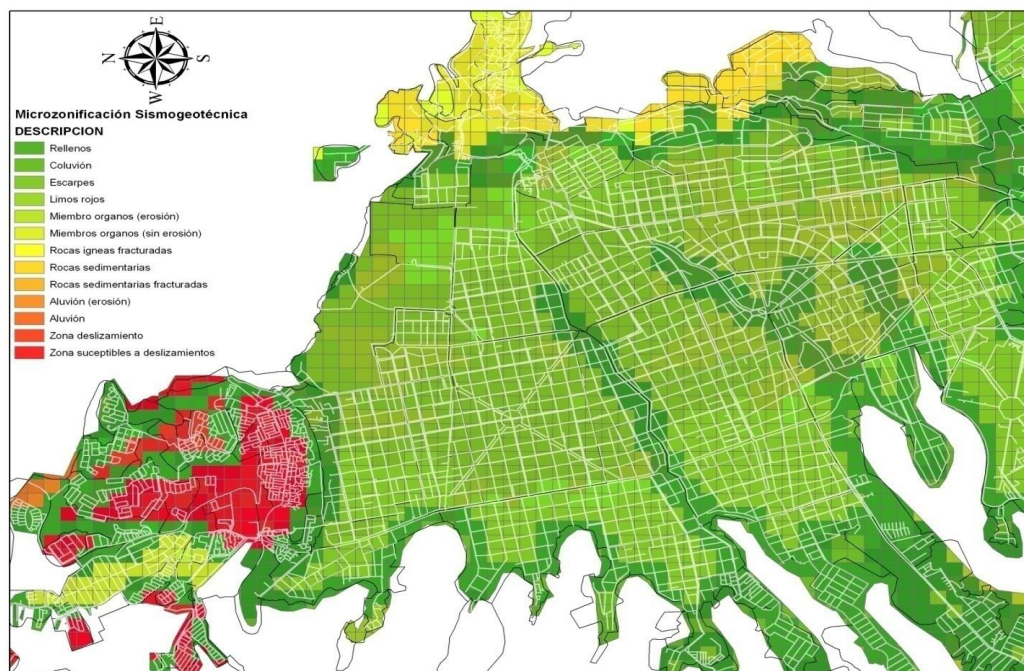
Fuente: ANAYA, S. Mapa de distribución de edades de las tuberías en la red de distribución. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0.

* Información suministrada por el Software SIIDAR.

Ubicación. Tanto la ubicación de la tubería como las características del material que rodea a la misma presentan algunos parámetros que pueden tener consecuencias en la aceleración del deterioro de las redes. Estas pueden ser el tipo de suelo y su interacción con el material de la tubería, la estabilidad del suelo y el tipo de uso dado y suelo o pavimento que se encuentran sobre la tubería. En el primer caso se pueden desarrollar problemas de corrosión; en el segundo caso se pone en riesgo la estabilidad estructural de la tubería y en el tercer caso se pueden estar impartiendo esfuerzos adicionales sobre la tubería.

En este proyecto no se cuenta con suficiente información para realizar un análisis con respecto a cargas adicionales y comportamiento estructural del material. Sin embargo, si es posible buscar si existe relación alguna entre la interacción suelo-material y la propensión al daño de un tubo localizado en la misma zona. Igualmente, es posible analizar si la amenaza de la zona puede estar generando un incremento en la frecuencia del daño.

Figura 29. Mapa de la distribución de los tipos de suelo y amenaza en el área metropolitana

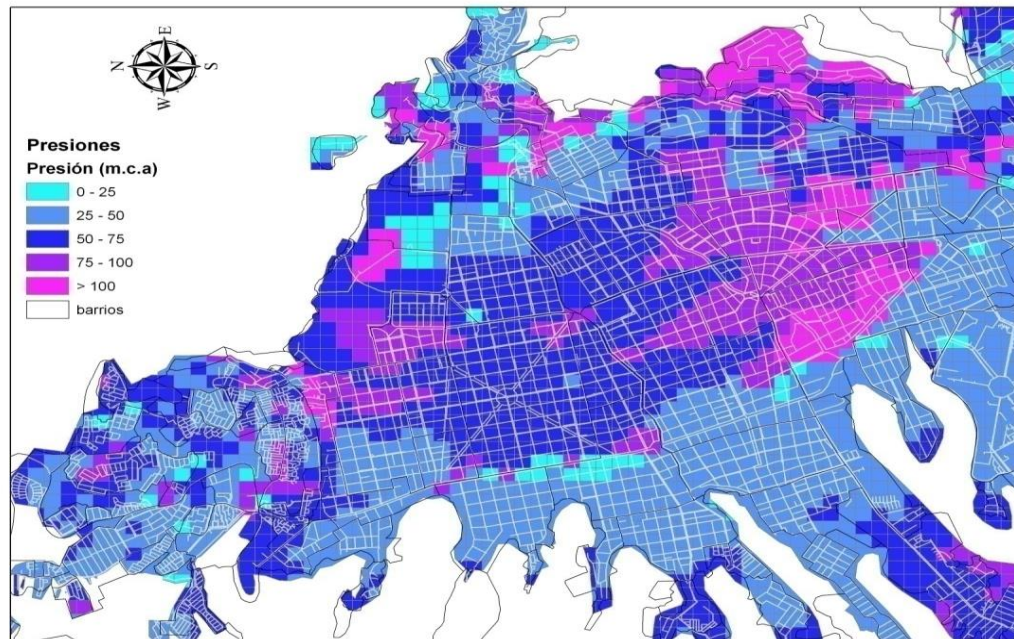


Fuente: ANAYA, S. Mapa de la distribución de los tipos de suelo y amenaza en el Área Metropolitana. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0.

Presiones. En el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. se desarrolló un proyecto para la implementación del Plano Óptimo de Presiones, en el caso particular del Distrito Estadio de la ciudad de Bucaramanga. El cual contó con una fase de calibración de la red que favorece la evolución del presente

proyecto. Para este proyecto, se va a incluir la información de presiones promedio de la red.

Figura 30. Mapa de la distribución de las presiones en la red de distribución.



Fuente: ANAYA, S. Mapa de la distribución de las presiones en la red de distribución. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0.

Daños Históricos. Para el presente proyecto se cuenta una base de datos de daños, generada a partir del Sistema Integrado de Información (SII++), con información entre 2006 y 2014. El archivo consta de un número identificador de la orden de trabajo, fecha de registro, dirección del evento, tipo de evento, considerando que para este análisis, los registros que son relevantes corresponden a los daños en la red. El listado completo de los tipos de daños reportados en ésta base de datos se presenta a continuación:

- Cambiar Válvula – Red
- Empalmar Red
- Reparar Red Estallada
- Reparar Red Ocasionada
- Tubo Roto Estallado-Red
- Cambiar Red
- Tubo Roto Ocasionado-Matriz

Dado que el SII++, dentro de su estructura no cuenta con componentes geográficos, fue necesario desarrollar un geocodificador de direcciones, que permitiera obtener la ubicación espacial, a partir de la dirección del daño.

Metodología de Georeferenciación de Registros Históricos de daños. La geocodificación es el proceso de ubicación espacial de puntos a partir de la dirección del elemento, esto es convertir datos de texto a datos espaciales.*

“La geocodificación es el proceso de transformar una descripción de una ubicación (por ejemplo, un par de coordenadas, una dirección o un nombre de un lugar) en una ubicación de la superficie de la Tierra. Se puede geocodificar introduciendo una descripción de una ubicación a la vez proporcionando muchas de ellas al mismo tiempo en una tabla. Las ubicaciones que se obtienen se transforman en entidades geográficas con atributos, que se pueden utilizar para la representación cartográfica o el para análisis espacial.”²⁴

Haciendo uso de la herramienta ArcGIS 10.2 (Address Locator Management Tools), se desarrolló para objeto de este proyecto, una geocodificador de direcciones, a partir del uso de las siguientes coberturas/capas:

- Ortografía: Ortografía Bucaramanga.img
- FeatureClass: Perímetro de Servicio de acueducto.shp, Manzanas.shp, Lotes.shp. Perímetro del Distrito Estadio.shp, Nomenclatura_vial.shp
- Externos: Modelo de direcciones de Bogotá. Tablas de Excel con registro de direcciones a codificar.

Para crear un localizador de direcciones, se requirió la especificación de los siguientes componentes:

Estilo del localizador de direcciones

El estilo del localizador de direcciones es el esqueleto. Define los datos de referencia que se pueden utilizar en la creación de un localizador de direcciones. Especifica también las propiedades y las gramáticas de análisis que guían el proceso de geocodificación y las salidas. Es fundamental elegir un estilo del localizador de direcciones adecuado para los datos que se tienen y las direcciones que desea geocodificar.

Mapa de campo

Los campos disponibles para la geocodificación varían según el estilo del localizador de direcciones que elija. Por defecto, el localizador de direcciones busca la tabla de atributos de referencia y de manera automática representa geográficamente los campos de atributos en los campos que ha especificado. Si

* (Notas de clase de análisis espacial avanzado).

²⁴ TUTORIAL DE ARCGIS. [en línea]. [Consulta: 04/03/2015]. Disponible en:

< <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/002500000001000000.htm>>

los campos no se seleccionan de manera automática, se pueden seleccionar manualmente en el menú desplegable para cada campo. La selección de los campos apropiados para el localizador de direcciones afecta la manera en que se geocodifica una dirección.

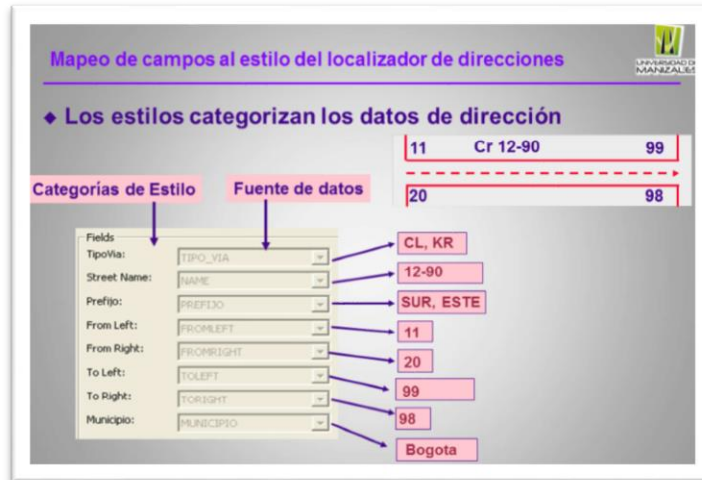
Datos de referencia

Datos de referencia es la fuente de datos como una clase de entidad en ArcGIS que se utiliza para crear un localizador de direcciones. Los datos de referencia pueden contener algunos elementos de direcciones comunes, como un rango de número de casa, el nombre de la calle y el tipo de calle, que se pueden utilizar para la geocodificación. La exactitud de atributo completa y espacial de los datos a menudo afecta el índice de concordancia de un proceso de geocodificación. Para el caso del presente proyecto se referenciaron los siguientes campos: TIPO_VIA, NAME, NOMB_COMUN, MUNICIPIO, PREFIJO, FROMLEFT, TOLEFT, FROMRIGHT, TORIGHT.

Se creó un localizador de direcciones en ArcCatalog*, que define como se encontrarán las direcciones, bajo un estilo conocido también como plantilla de localizador de direcciones, que se entiende como un esqueleto del localizador de direcciones. El estilo determina el tipo de direcciones que se pueden geocodificar, la asignación de campos para los datos de referencia y qué información de salida de una concordancia se devolvería. También contiene información sobre cómo se analiza una dirección, métodos de búsqueda de posibles concordancias y valores por defecto para las opciones de geocodificación.

* Es una ventana dentro del software ArcGIS que permite administrar y organizar la información geográfica.

Figura 31. Mapeo de campos al estilo del localizador de direcciones

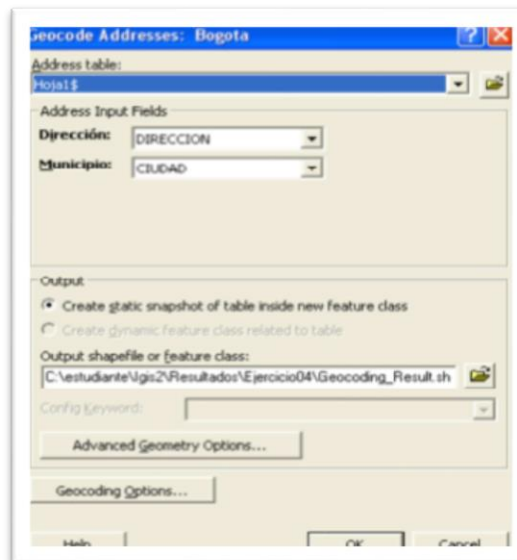


Fuente: YULL, S. Notas de clase de Análisis Espacial Avanzado. 2014.

Una vez se definió el estilo, se procedió a cargar a generar el localizador de direcciones (Address Locator) “Bucaramanga”, tomando como base el modelo de direcciones de la ciudad de Bogotá.

Seguido a esto, se realizó la asignación de direcciones y posterior generación de coberturas geográficas, a partir del localizador de direcciones, tomando como base los archivos con los eventos caracterizados desde el Sistema Integrado de Información SII++.

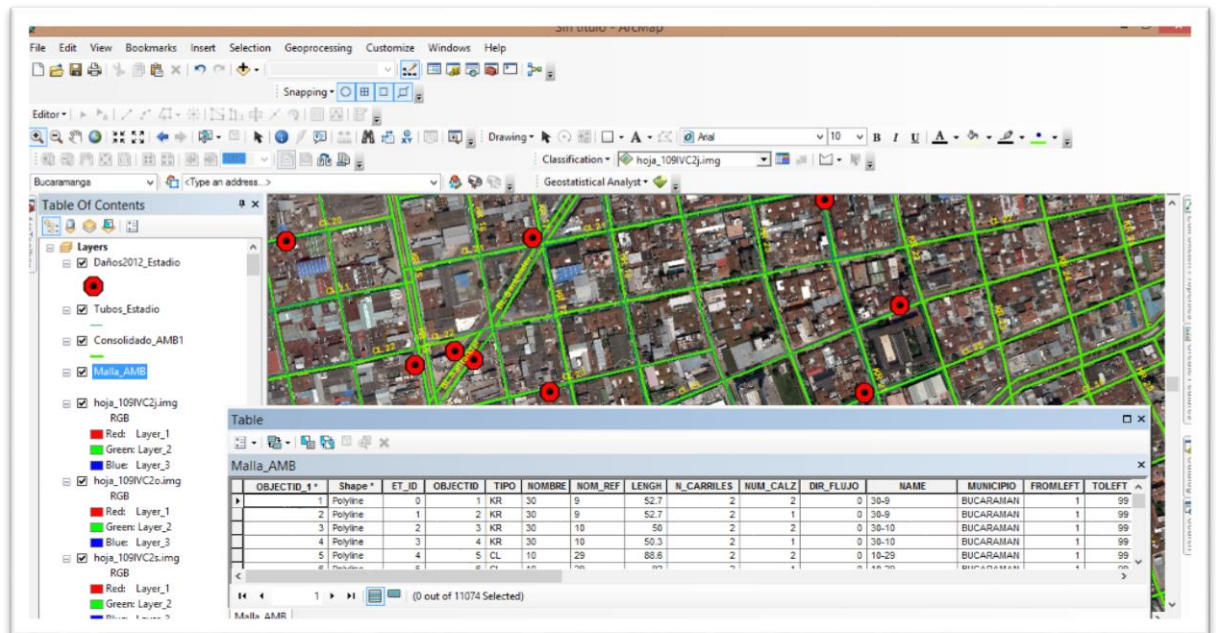
Figura 32. Geocodificación de la tabla de direcciones de los eventos.



Fuente: Elaboración propia con el software ArcGIS 10.0

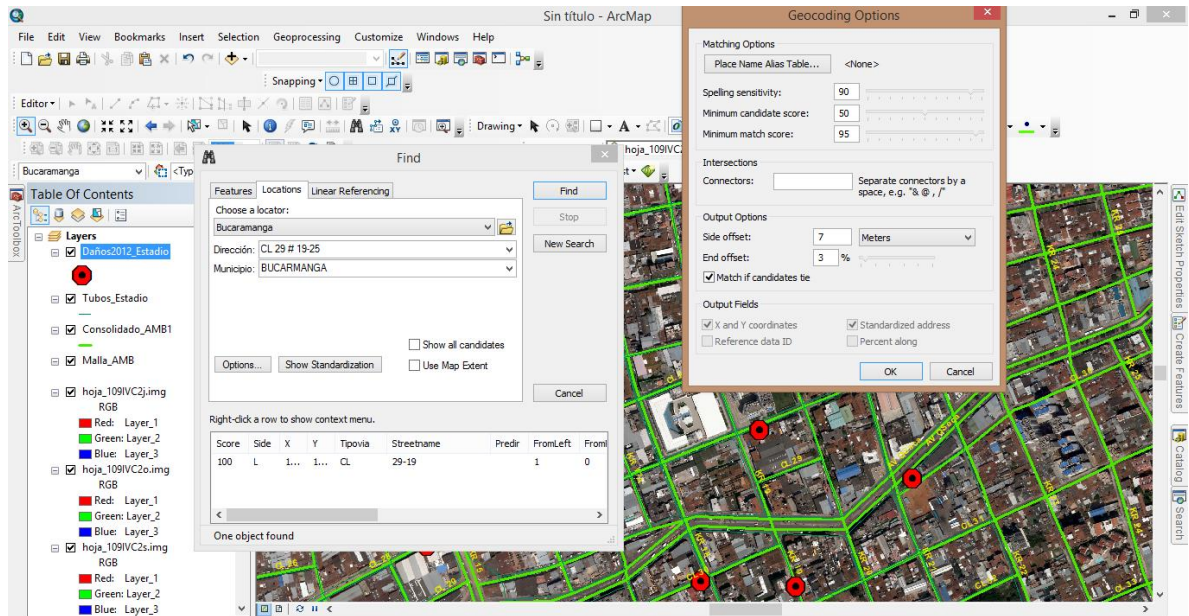
Una vez terminado el proceso de asignación y validación de coordenadas geográficas, a través del localizador de direcciones se visualizan los contenidos de las nuevas coberturas generadas (Daños_2006.shp, Daños_2007.shp, Daños_2008.shp, Daños_2009.shp, Daños_2010.shp, Daños_2011.shp, Daños_2012.shp, Daños_2013.shp y Daños_2014.shp).

Figura 33. Ubicación espacial de los daños 2012 asignado por medio del localizador de direcciones.



Fuente: Elaboración propia con el software ArcGIS 10.0

Figura 34. Búsqueda a partir de las direcciones de los daños.



Fuente: Elaboración propia con el software ArcGIS 10.0

La información de daños fue depurada eliminando los datos cuyas direcciones no se encontraron concordancia, ni se lograron validar a través de la malla vial. Esta base de datos fue cruzada con la información de tuberías, con el fin de asignar a cada daño la tubería en que ocurrió, el diámetro, profundidad, fecha de instalación y material. También fue cruzada con la información de áreas de amenaza y calidad del agua de Bucaramanga. Fue necesario rechazar daños que quedarán asignados a más de 50 metros de la tubería.

Recomendaciones. El análisis de la información ha generado una serie de consideraciones para futuras aplicaciones de la metodología planteada. El conocimiento de la red de distribución debe ser lo más preciso posible. Esto consiste en conocer con exactitud la localización de la tubería al igual que el suelo, y la calidad del agua, conocer los diámetros, materiales y la fecha de instalación.

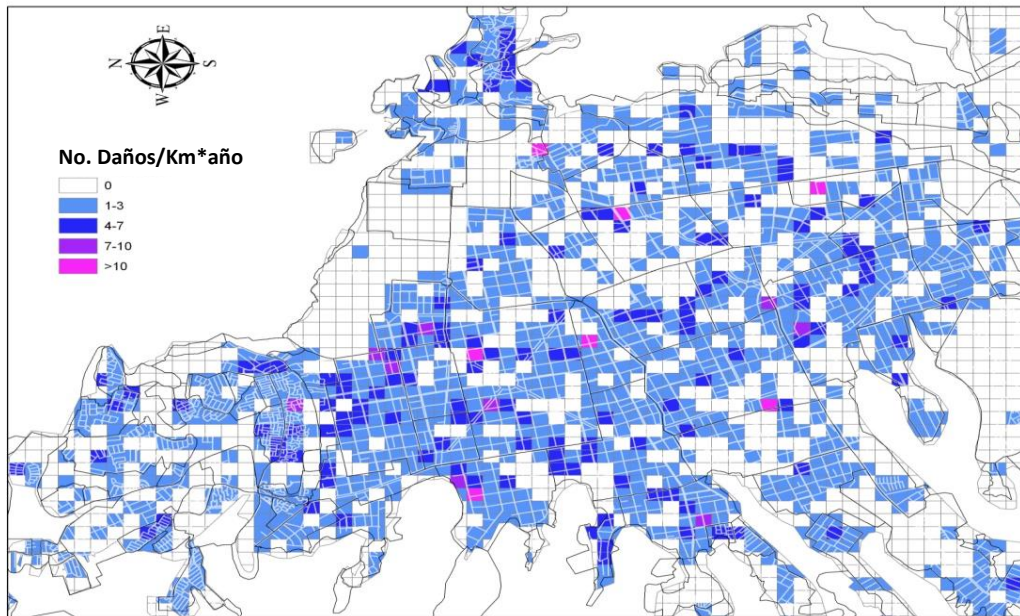
De igual manera se debe tomar información más detallada con respecto a los daños generados, tal cual se lista a continuación:

- 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 del daño
- Coordenadas exactas
- Nombre de la Calle

- Longitud de tubería
- Costo de la reparación
- Tiempo de reparación
- Hubo inundación debido al daño
- Costo total del daño
- Usuarios regulares afectados
- Usuarios industriales afectados
- Observaciones precisas

Agrupamiento de datos. Como se verá más adelante, la complejidad del modelo que pueda ser empleado para estimar la frecuencia o probabilidad del daño depende de la información disponible. Para esto, es indispensable analizar qué variables están teniendo una mayor repercusión sobre la condición de las tuberías. Buscando desarrollar este análisis se presenta la Figura siguiente con la distribución de daños por Kilometro (Km) en un año (esto corresponde a un valor promedio del periodo incluido en los datos de daños).

Figura 35. Daños/Km/Año en la red de distribución en polígonos de 100mX100m.



Fuente: ANAYA, S. Daños/Km/Año en la red de distribución en polígonos de 100mX100m. [mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0.

Metodología de trabajo. Según Kutner, en su libro “Applied Linear Regression Models”, en el año 2004, muchas relaciones no-lineales, tales como la exponencial, funciones logarítmicas, hiperbólicas, con un exponente de polinomio, así como otras funciones especiales pueden ser convertidas en relaciones lineales usando técnicas de transformación. Aunque existen a su vez otras funciones que

no pueden ser linealizadas. Ejemplo de una función linealizable es la función logarítmica original:

$$f = a + b_1 \ln X_1 + b_2 \ln X_2 + b_3 \ln X_3 + \dots + b_n$$

Ahora bien, los parámetros incluidos en dicha fórmula como multiplicadores, pueden ser expresados de una forma lineal como:

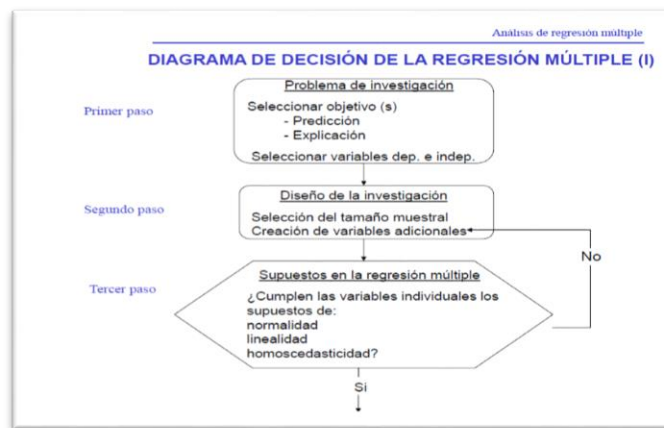
$$F = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n$$

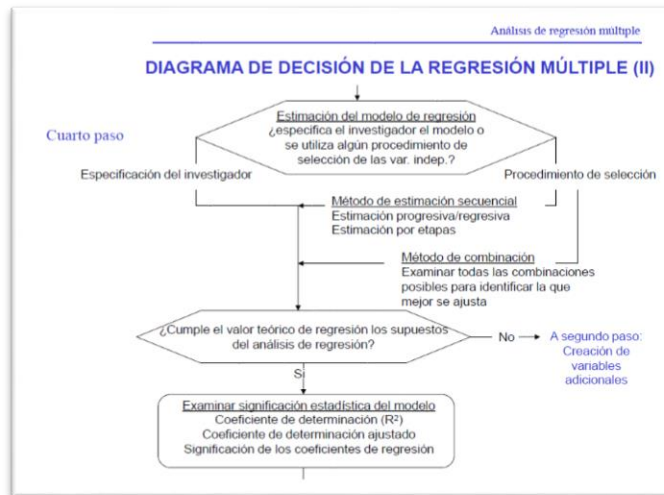
Donde,

$$F = f, X = \ln x, \beta_0 = a \text{ and } \beta_n = b_n$$

El ajuste del modelo predictivo (R^2 Alto), parte del hecho de seleccionar las variables que expliquen el fenómeno, ya sean cuantitativas y cualitativas. Para realizar este procedimiento se puede hacer uso de la experiencia acumulada en el personal operativo, o realizando una matriz de correlación que indique que tan fuerte se relaciona una variable con otra, posteriormente estimar, validar e interpretar el modelo. En la siguiente figura se muestra un diagrama de decisión de la regresión múltiple.

Figura 36. Diagrama de decisión de la regresión múltiple.



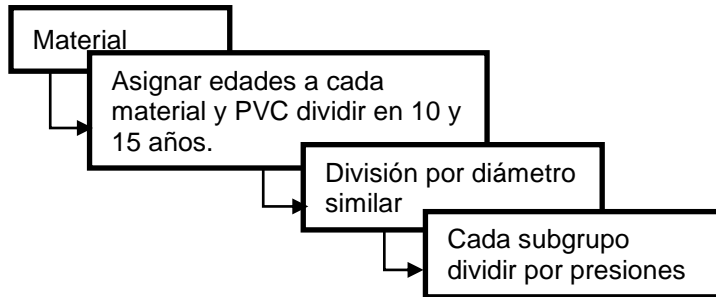


Fuente: BOADA, A. Notas de clase de Estadística Espacial. 2014.

Se propone una división inicial por material y en el caso de PVC en 10 y 15 años. A estos grupos se les debe hacer divisiones adicionales que se encuentran entre: si se ubica en zona de amenaza a deslizamiento o no, por grupos de diámetro, por presiones presentes en sus nodos y por ubicación. La evolución de la tasa de deterioro en estos grupos debe ser estudiada para corroborar que el agrupamiento esté siendo adecuado.

Teniendo en cuenta los primeros análisis se considera recomendable iniciar con un agrupamiento que tenga en cuenta los tamaños de diámetro, el material, la edad de las tuberías y las presiones manejadas. De encontrarse similitud entre grupos, falta de elementos en un grupo, gran heterogeneidad en la ubicación espacial, etc. los grupos serán replanteados.

Figura 37. Metodología de agrupamiento de datos.



Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la presión a cada tubo se le asignó la presión de uno de sus nodos del modelo generado por los Ingenieros de la División Distribución de la Gerencia de Operaciones.

Con el fin de realizar el agrupamiento de los datos, se generó una cobertura shapefile, con las tuberías de la red de distribución y los siguientes atributos:

- Identificador de la tubería
- Diámetro en pulgadas
- Material
- Edad en años
- Presión en m.c.a.
- Cantidad de daños ocurridos en la tubería 2006-2013.

Para crear los grupos homogéneos, se hizo uso del Lenguaje Estructurado de Consultas (SQL), a través de la herramienta MODEL BUILDER de ArcGIS, que permitió generar coberturas shapefile y tablas con información consolidada de la cantidad y longitud de tuberías que hacen parte de dicho grupo.

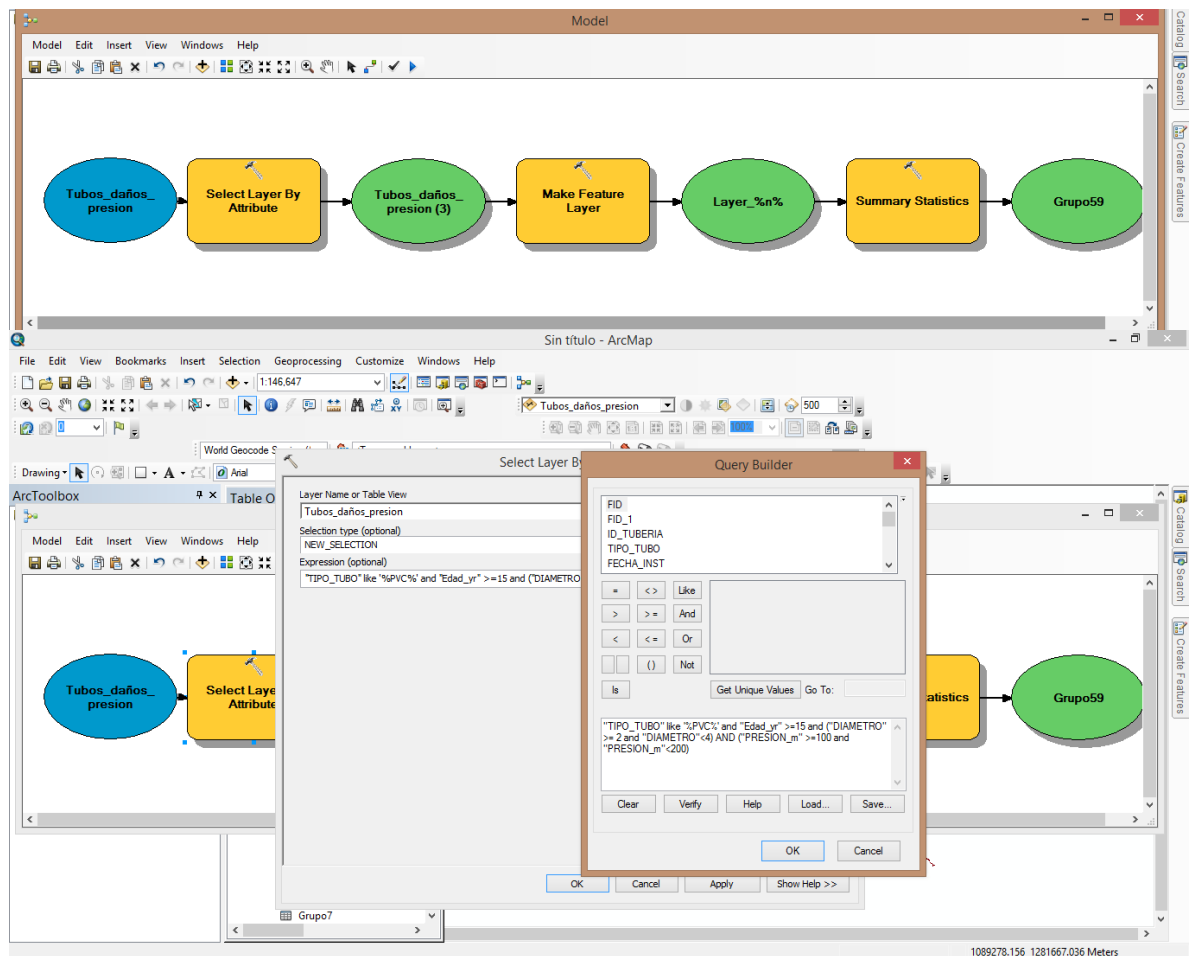
Cuadro 33. Cuadro consolidado de los grupos homogéneos.

Nombre	Material - Edad	Diámetro	Presión (m.c.a.)
Grupo 1	AC > 40 años	Menor de 2 pulgadas	Menor a 20 m.c.a
Grupo 2	AC > 40 años	Menor de 2 pulgadas	Entre 20 y 50
Grupo 3	AC > 40 años	Menor de 2 pulgadas	Entre 50 y 70
Grupo 4	AC > 40 años	Menor de 2 pulgadas	Entre 70 y 100
Grupo 5	AC > 40 años	Entre 2 y 4 pulgadas	Menor a 20 m.c.a
Grupo 6	AC > 40 años	Entre 2 y 4 pulgadas	Entre 20 y 50
Grupo 7	AC > 40 años	Entre 2 y 4 pulgadas	Entre 50 y 70
Grupo 8	AC > 40 años	Entre 2 y 4 pulgadas	Entre 70 y 100
Grupo 9	AC > 40 años	Entre 2 y 4 pulgadas	Mayor de 100
Grupo 10	AC > 40 años	Entre 6 y 8 pulgadas	Menor a 20 m.c.a
Grupo 11	AC > 40 años	Entre 6 y 8 pulgadas	Entre 20 y 50
Grupo 12	AC > 40 años	Entre 6 y 8 pulgadas	Entre 50 y 70
Grupo 13	AC > 40 años	Entre 6 y 8 pulgadas	Entre 70 y 100

Nombre	Material - Edad	Diámetro	Presión (m.c.a.)
Grupo 14	AC > 40 años	Mayor a 8 pulgadas	Menor a 20 m.c.a
Grupo 15	AC > 40 años	Mayor a 8 pulgadas	Entre 20 y 50
Grupo 16	AC > 40 años	Mayor a 8 pulgadas	Entre 50 y 70
Grupo 17	AC > 40 años	Mayor a 8 pulgadas	Entre 70 y 100
Grupo 18	HD > 8 años	Entre 6 y 8 pulgadas	Entre 70 y 100
Grupo 19	HF > 40 años	Menor de 2 pulgadas	< 20 m
Grupo 20	HF > 40 años	Menor de 2 pulgadas	20 m - 50 m
Grupo 21	HF > 40 años	Menor de 2 pulgadas	50 m - 70 m
Grupo 22	HF > 40 años	Menor de 2 pulgadas	70 m -100 m
Grupo 23	HF > 40 años	Entre 2 y 4 pulgadas	< 20 m
Grupo 24	HF > 40 años	Entre 2 y 4 pulgadas	20 m - 50 m
Grupo 25	HF > 40 años	Entre 2 y 4 pulgadas	50 m - 70 m
Grupo 26	HF > 40 años	Entre 2 y 4 pulgadas	70 m -100 m
Grupo 27	HF > 40 años	Entre 6 y 8 pulgadas	< 20 m
Grupo 28	HF > 40 años	Entre 6 y 8 pulgadas	20 m - 50 m
Grupo 29	HF > 40 años	Entre 6 y 8 pulgadas	50 m - 70 m
Grupo 30	HF > 40 años	Entre 6 y 8 pulgadas	70 m -100 m
Grupo 31	HF > 40 años	Mayor a 8 pulgadas	< 20 m
Grupo 32	HF > 40 años	Mayor a 8 pulgadas	20 m - 50 m
Grupo 33	HF > 40 años	Mayor a 8 pulgadas	50 m - 70 m
Grupo 34	HF > 40 años	Mayor a 8 pulgadas	70 m -100 m
Grupo 35	HG > 30 años	Menor de 2 pulgadas	< 20 m
Grupo 36	HG > 30 años	Menor de 2 pulgadas	20 m - 50 m
Grupo 37	HG > 30 años	Menor de 2 pulgadas	50 m - 70 m
Grupo 38	HG > 30 años	Menor de 2 pulgadas	70 m -100 m
Grupo 39	HG > 30 años	Entre 2 y 4 pulgadas	< 20 m
Grupo 40	HG > 30 años	Entre 2 y 4 pulgadas	20 m - 50 m
Grupo 41	HG > 30 años	Entre 2 y 4 pulgadas	50 m - 70 m
Grupo 42	HG > 30 años	Entre 2 y 4 pulgadas	70 m -100 m
Grupo 43	HG > 30 años	Entre 4 y 6 pulgadas	< 20 m
Grupo 44	HG > 30 años	Entre 4 y 6 pulgadas	20 m - 50 m
Grupo 45	HG > 30 años	Entre 4 y 6 pulgadas	50 m - 70 m
Grupo 46	HG > 30 años	Entre 4 y 6 pulgadas	70 m -100 m
Grupo 47	PVC 10 años	Menor de 2 pulgadas	< 20 m
Grupo 48	PVC 10 años	Menor de 2 pulgadas	20 m - 50 m
Grupo 49	PVC 10 años	Menor de 2 pulgadas	50 m - 70 m
Grupo 50	PVC 10 años	Menor de 2 pulgadas	70 m -100 m
Grupo 51	PVC > 15 años	Menor de 2 pulgadas	< 20 m
Grupo 52	PVC > 15 años	Menor de 2 pulgadas	20 m - 50 m
Grupo 53	PVC > 15 años	Menor de 2 pulgadas	50 m - 70 m
Grupo 54	PVC > 15 años	Menor de 2 pulgadas	70 m -100 m
Grupo 55	PVC > 15 años	Menor de 2 pulgadas	> 100 m
Grupo 56	PVC > 15 años	Entre 2 y 4 pulgadas	20 m - 50 m
Grupo 57	PVC > 15 años	Entre 2 y 4 pulgadas	50 m - 70 m
Grupo 58	PVC > 15 años	Entre 2 y 4 pulgadas	70 m -100 m
Grupo 59	PVC > 15 años	Entre 2 y 4 pulgadas	> 100 m

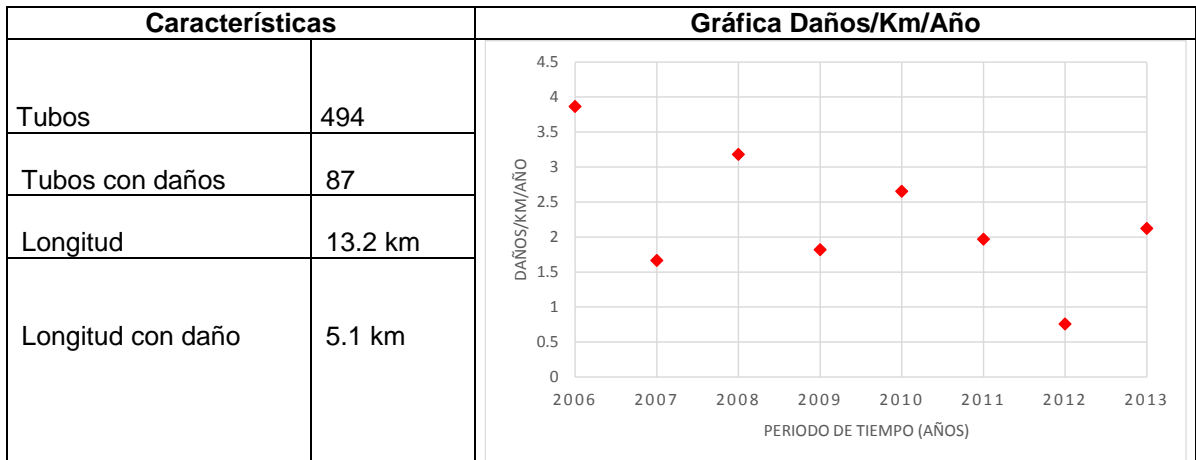
Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. Diagrama en Model Builder para construcción de grupos homogéneos



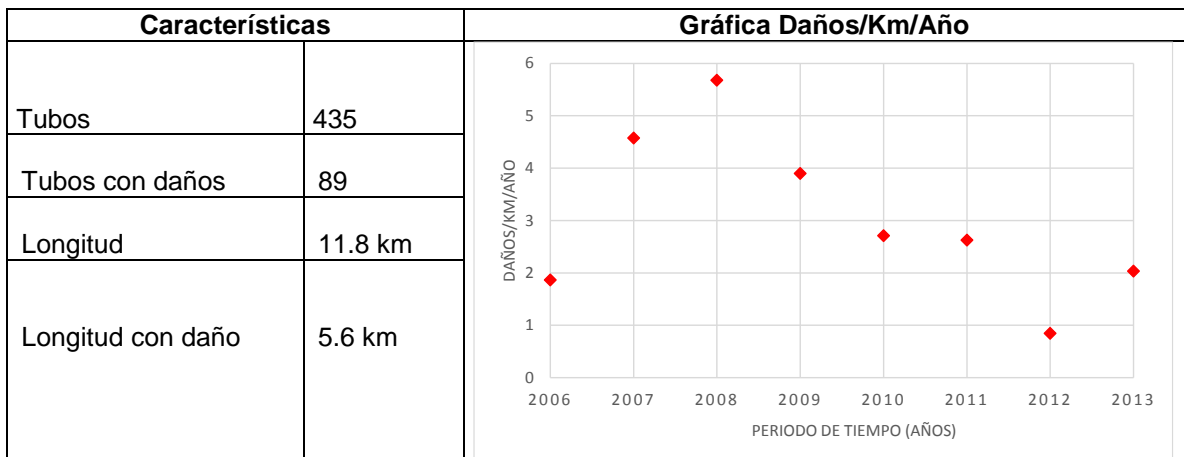
Fuente: ANAYA, S. Diagrama en Model Builder para construcción de grupos homogéneos. [modelo]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

Figura 39. Características del Grupo 6.



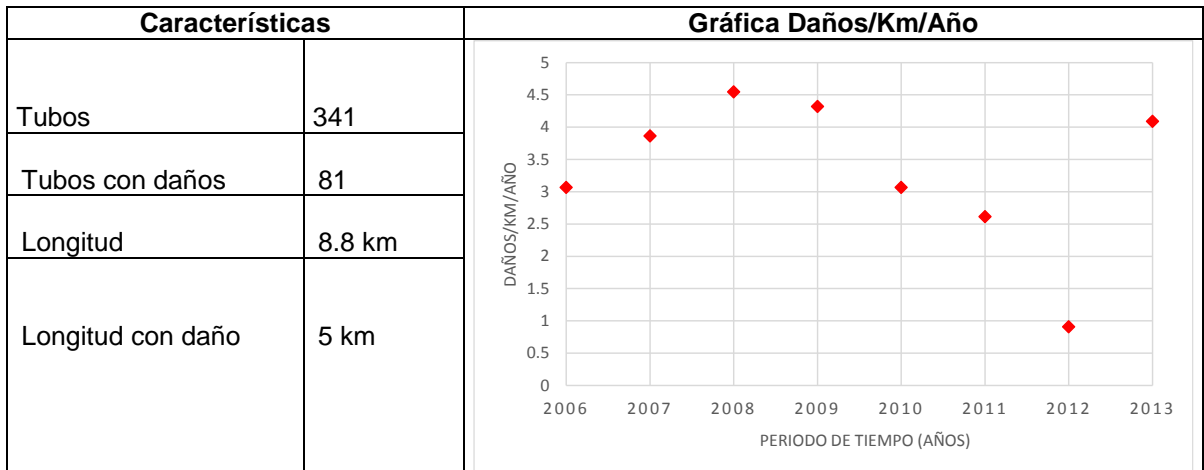
Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. Características del Grupo 7.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Características del Grupo 8.



Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo C se muestran las características de los demás grupos analizados.

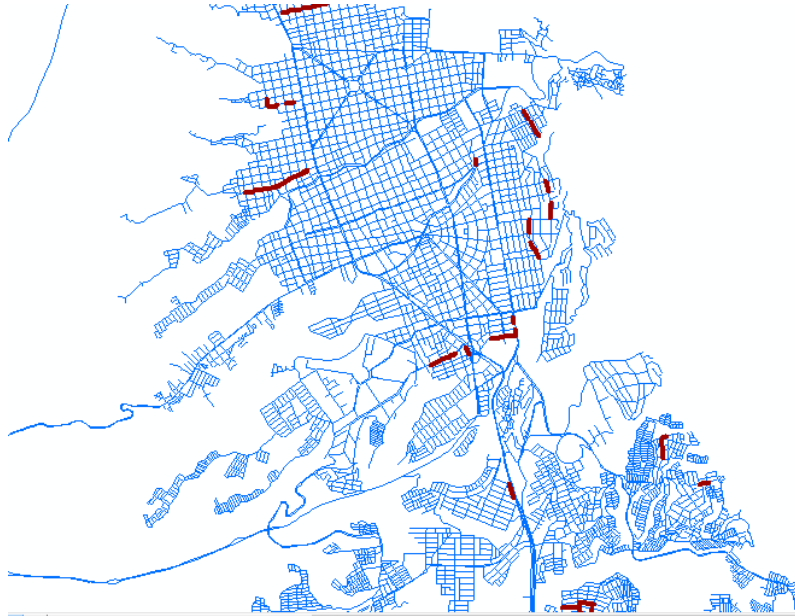
Generación de tasas de daños. A partir del análisis de agrupamiento de datos se seleccionaron los grupos que podían generar un indicador de incremento de tasa de daños a través de los daños seleccionados. Estos fueron: Grupo 6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17, Grupo 30, Grupo 33, 34, 36, 37 y 38, Grupo 40, 41,42, Grupo 51, 52,53,54,55,56,57,58 y 59. Estos grupos fueron analizados para construir el modelo OLS* con el programa ArcGIS 10.0, donde además se incluyó un análisis ANOVA (Análisis de Varianza), orientado a verificar si las regresiones son estadísticamente significativas o no (F-Value y p-value). Los valores estimados para los coeficientes serán evaluados en dirección y magnitud, y de esa revisar su influencia sobre el modelo. La tolerancia y el Factor de Inflación de la Varianza (VIF) para las variables son calculados para revelar problemas potenciales de multicolinealidad.

Resultados Obtenidos. Se mostraran los resultados generados para el grupo 11, dado que tienen significancia estadística dentro de la modelación del problema. De igual manera, a modo indicativo, se mostraran algunos ejemplos de grupos cuyos resultados no fueron satisfactorios, a fin de determinar los posibles problemas a la hora de generar este tipo de modelos predictivos.

Grupo 11. Corresponde a las tuberías de Asbesto Cemento de más de 40 años, cuyos diámetros están entre 6 y 8 pulgadas y cuyas presión promedio esta entre los 20 y 50 metros de columna de agua (m.c.a.).

* OLS (Ordinary Least Square)

Figura 42. Distribución espacial del grupo homogéneo 11.

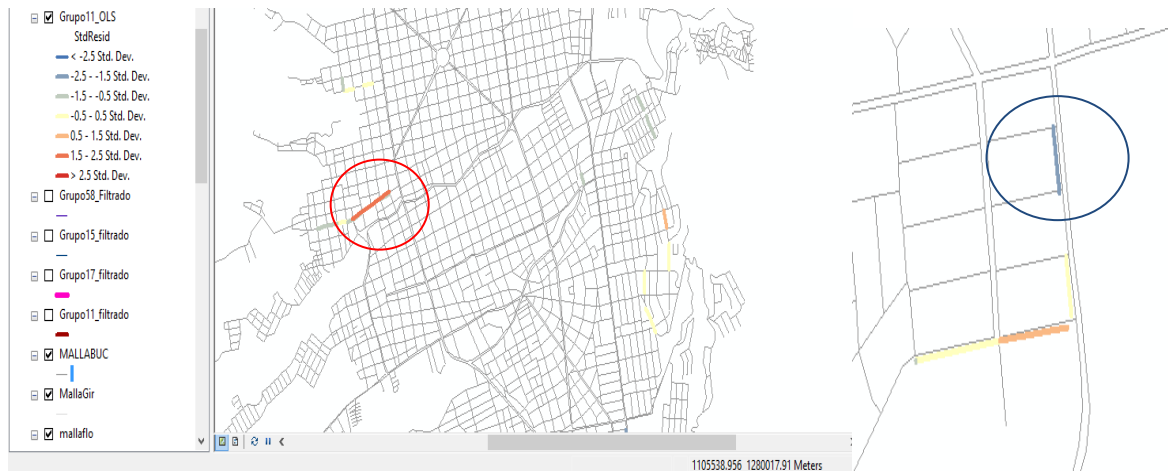


Fuente: ANAYA, S. Distribución espacial del grupo homogéneo 11. [Mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

Según *Kettler & Goulter* se formula la hipótesis de que la tasa de daños anual en las tuberías es simplemente una función de la edad de las mismas. Si lo es, las empresas prestadoras del servicio de acueducto, pueden usar esta información para estimar actividades de mantenimiento y reposición de redes.

La capa de salida OLS del software ArcGIS muestra el rendimiento del modelo, usando únicamente la variable de la edad de las tuberías para explicar la tasa de daños anual. Las áreas rojas están por debajo de las predicciones, (donde el número real de daños es mayor de lo que el modelo predijo); las áreas azules están sobre las predicciones, (es decir la tasa de daños real es menor de lo que se predijo).

Figura 43. Capa de salida OLS para el grupo 11.

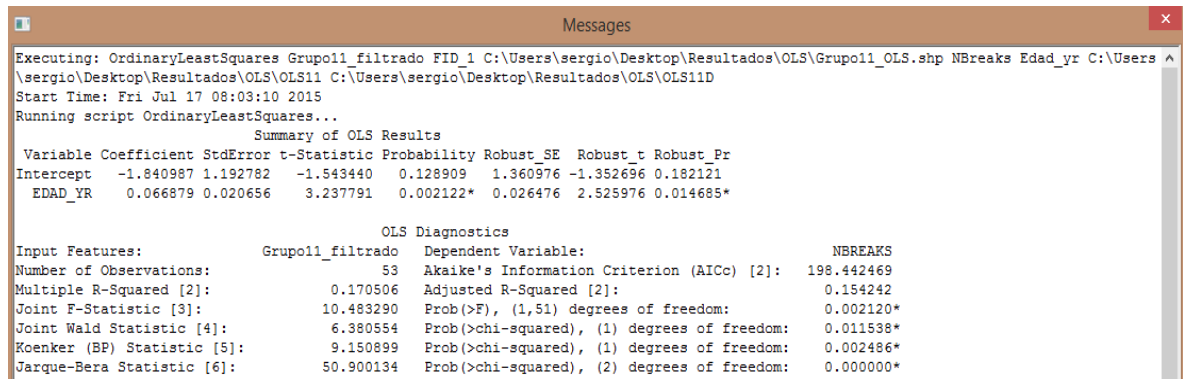


Fuente: ANAYA, S. Capa de salida OLS para el grupo 11. [Mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

La herramienta OLS produce muchas salidas numéricas que permiten validar el ajuste del modelo y de esta manera comprobar o rechazar la hipótesis original. Para este caso se parte de la premisa:

- Variable Dependiente: Tasa de daños anual.
- Variable Explicatoria: Edad de las tuberías.

Figura 44. Resultados numéricos de regresión OLS del grupo 11.



Fuente: ANAYA, S. Resultados numéricos de regresión OLS del grupo 11. [Mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

La ecuación representativa de este modelo es:

$$N = -1.84 + 0.066Edad$$

La primera observación que se puede realizar es que el valor de R cuadrado (R^2), coeficiente de determinación, ajustado es de 0.154242 o del 15%, esto indica que

usando solamente la edad, el modelo solo explica el 15% de la tasa de daños anuales. Pero al ejecutar todos los grupos, este fue quien arrojo los mejores resultados.

Así que mirando nuevamente la hipótesis original, de si la tasa de daños anual en las tuberías es simplemente una función de la edad. ¿Podría las empresas prestadoras de servicios predecir futuras operaciones solo a partir de las proyecciones de edad de las tuberías? Probablemente no.

Si relación entre la tasa de daños y las edades de las tuberías hubiese sido mayor al 80%, podría no necesitar ningún otro tipo de regresión. Pero solo con el 15% del total, parece que otros factores y otras variables se necesitan para modelar efectivamente la tasa de daños.

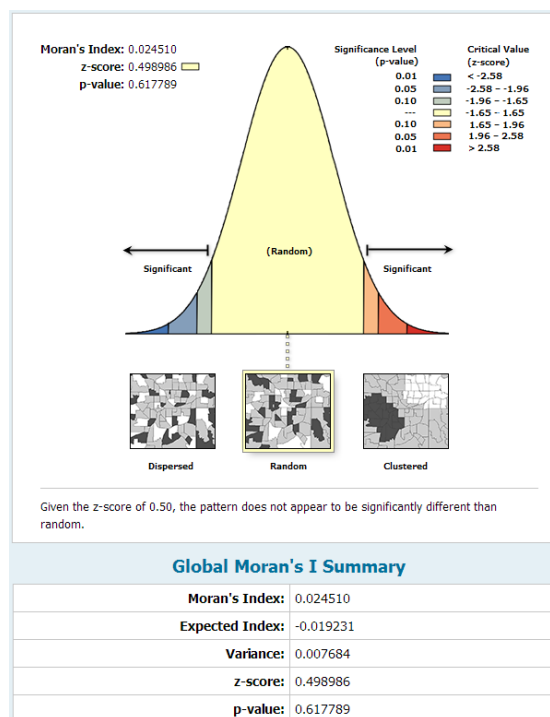
Sin embargo, siguiendo la metodología y supuestos en un análisis de regresión, se realizaron las validaciones respectivas que indica la literatura antes de poder confiar y utilizar el modelo para hacer predicciones, independientemente de su ajuste.

- La primera fue revisar si el coeficiente tiene el signo esperado. Cuando un coeficiente es positivo significa que la relación es positiva, uno negativo que la relación es negativa o inversa. Note que el coeficiente para la variable edad en años es positivo. Esto significa que a medida que la edad en años aumenta, el número de daños en la tubería también se incrementa. Se esperaba un coeficiente positivo. Si el coeficiente hubiese sido negativo, no se podría confiar en el modelo.
- Revisar si la variable explicativa tiene coeficientes estadísticamente significativos. Dos columnas, Probabilidad y Probabilidad Robusta, miden la significancia estadística de los coeficientes. Un asterisco al lado de la probabilidad nos dice que el coeficiente es significativo, a un nivel de significancia dado. Si una variable no es significativa, no está ayudando al modelo y al menos que la teoría indique que una variable particular es crítica, debe removerla. Cuando el estadístico Koenker (BP) es estadísticamente significativo, puede confiar únicamente en la columna de Probabilidad Robusta para determinar si un coeficiente es significativo o no. Las probabilidades pequeñas son mejores (más significativas) que las probabilidades grandes. (Para el caso del informe de resultados, un asterisco * indica significancia estadística)
- Validar que la prueba Jarque-Bera NO sea estadísticamente significativa. Los residuos de un modelo propiamente especificado reflejarán un ruido aleatorio. Un ruido aleatorio tiene un patrón espacial aleatorio (No hay agrupamiento de las predicciones por encima y por debajo). También tiene un histograma normal la gráfica los resultados. La prueba Jarque-Bera mide si los residuos de una regresión están normalmente distribuidos o no. Esta es una de las

pruebas que no se quiere que sea estadísticamente significativa. Cuando la prueba es estadísticamente significativa, el modelo está sesgado. A partir de los resultados expuestos en este modelo dado que la prueba Jarque-Bera es estadísticamente significativa, se puede prever que le falta una o más variables claves explicativas al modelo.

- Revisar el rendimiento del modelo. El valor R^2 ajustado está entre cero (0) y uno (1) e indica cuánta variación existe en la variable dependiente explicado por el modelo. Generalmente se buscan valores de 0.5 o más, pero un “buen” valor R^2 depende de lo que se esté modelando y del número de observaciones consideradas en la construcción del modelo. Ya se acotó anteriormente que este modelo solo se ajusta en un 15%.
- Los residuos no deben estar espacialmente autocorrelacionados. Para ello se hizo uso de la herramienta de autocorrelación espacial para encontrar que el modelo pasa esta prueba.

Figura 45. Autocorrelación espacial I-Morans del grupo 11.



Fuente: ANAYA, S. Autocorrelación espacial I-Morans del grupo 11. [Mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

Los resultados de correr la herramienta de autocorrelación espacial sobre los residuos de la regresión OLS indican que están aleatoriamente distribuidos, el puntaje Z no es estadísticamente significativo, así que puede aceptar la hipótesis nula de la aleatoriedad espacial.

Siempre que hay estructura, agrupamiento o dispersión en las predicciones por encima y por debajo de la regresión OLS, significa que al modelo aún le faltan variables explicativas clave y que no se puede confiar en sus resultados.

Cuando corra la herramienta de autocorrelación espacial sobre los residuos del modelo y encuentre un patrón espacial aleatorio como ocurrió, está en camino de encontrar un modelo correctamente especificado.

Grupo 37. Corresponde a las tuberías de Hierro Galvanizado de más de 30 años, cuyos diámetros son menores de 2 pulgadas y cuya presión promedio esta entre los 50 y 70 metros de columna de agua (m.c.a.) y presenta problemas con el R^2 ajustado.

Figura 46. Resultados numéricos de regresión OLS del grupo 37.

OLS Diagnostics			
Input Features:	Grupo37_filtrado	Dependent Variable:	NBREAKS
Number of Observations:	11	Akaike's Information Criterion (AICc) [2]:	56.973175
Multiple R-Squared [2]:	0.039804	Adjusted R-Squared [2]:	-0.066884

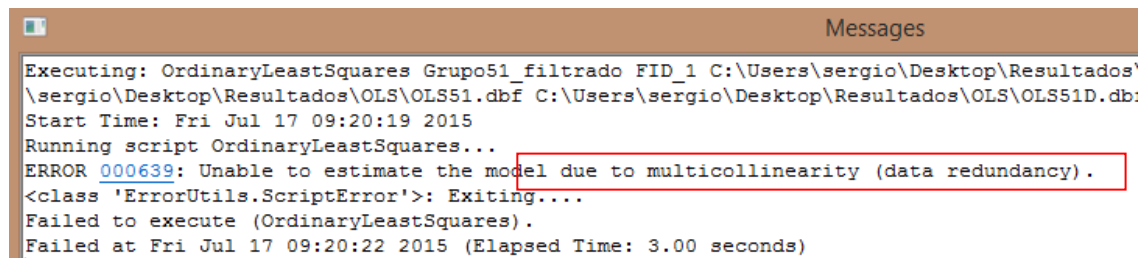
Fuente: ANAYA, S. Resultados numéricos de regresión OLS del grupo 37. [Mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

El signo de R^2 está asociado al de la pendiente de la recta de regresión, por lo que R^2 positivo indica una recta de ajuste con pendiente positiva y un R^2 negativo, una recta con pendiente negativa.

Un R^2 ajustado negativo indica una mala adaptación del modelo al número de grados de libertad, definidos como el número de datos y el número de coeficientes de la ecuación. Simplemente mide la habilidad de la variable explicatoria de comprender la variable dependiente.

Grupo 51. Corresponde a las tuberías de PVC mayores de 15 años, menores de 2 pulgadas y con presiones promedio menores a los 20 m.c.a y presenta problemas de multicolinealidad.

Figura 47. Resultados numéricos de regresión OLS del grupo 51.



```
Messages
Executing: OrdinaryLeastSquares Grupo51_filtrado FID_1 C:\Users\sergio\Desktop\Resultados\
\sergio\Desktop\Resultados\OLS\OLS51.dbf C:\Users\sergio\Desktop\Resultados\OLS\OLS51D.dbf
Start Time: Fri Jul 17 09:20:19 2015
Running script OrdinaryLeastSquares...
ERROR 000639: Unable to estimate the model due to multicollinearity (data redundancy).
<class 'ErrorUtils.ScriptError'>: Exiting...
Failed to execute (OrdinaryLeastSquares).
Failed at Fri Jul 17 09:20:22 2015 (Elapsed Time: 3.00 seconds)
```

Fuente: ANAYA, S. Resultados numéricos de regresión OLS del grupo 51. [Mapa]. Escala no vista. Abril de 2015. Software: ArcGIS [software GIS]. Versión 10.0

No debe existir multicolinealidad entre las variables explicativas o independientes. La multicolinealidad originalmente implicaba la existencia de una relación lineal "perfecta o exacta" entre algunas o la totalidad de las variables independientes de un modelo de regresión. En la actualidad el término multicolinealidad se utiliza en un sentido más amplio para incluir el caso de multicolinealidad perfecta, así como también aquella situación en donde las variables X están intercorrelacionadas, pero no en forma perfecta.

Una vez detectada la presencia de multicolinealidad en un modelo, existen varios métodos para solucionarla, unos más complejos que otros. Uno de los más simples consiste en omitir del modelo una de las variables colineales; sin embargo, al eliminar una variable del modelo podemos cometer el sesgo o error de especificación. Otra solución al problema de la colinealidad es aumentar el tamaño de la muestra.

Grupo 36. Corresponde a tuberías de Hierro Galvanizado mayores de 30 años, menores de 2 pulgadas y con presiones promedio entre 20 y 50 m.c.a. Presentan problemas dado que son grupos con pocos datos.

Según Tabachnik & Fidell (2007, p.123), el tamaño de la muestra debe seguir la siguiente formula:

$$N > 50 + 8m$$

Donde N es el número de observaciones y m el número de variables predictoras, para este caso dado que se cuenta con una sola variable explicatoria, como mínimo se necesitan 59 datos/registros para obtener resultados válidos.

6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.2.1. Implementación de la metodología de priorización de daños. La determinación del orden de atención de daños es un proceso que influye significativamente en el desempeño de la empresa y el uso racional del recurso. El algoritmo desarrollado por el CIACUA en conjunto con el amb S.A. E.S.P. demostró proporcionar una metodología efectiva y de fácil aplicación dentro de cualquier sistema de distribución, proporcionando gran cantidad de beneficios económicos con relativamente poco esfuerzo.

Verificación de los daños. El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. con el fin de garantizar la correcta implementación de este proceso de priorización, deberá destinar de algunos de sus funcionarios a realizar una inspección inicial a cada uno de los daños reportados.

Con esto se busca no solo la confirmación del estado real del reporte, sino que pretende que el funcionario encargado de la verificación le comunique al personal

de la sección de redes, los valores aproximadas del coeficiente C y la presión de la zona, con el fin de estimar la magnitud del caudal que se está perdiendo por el daño, conocido como caudal de fuga abierta (Q_{FA}).

En la descripción de resultados se presentaron algunos valores preliminares de este coeficiente de acuerdo con las características físicas de la fuga. Sin embargo como ya se mencionó, el amb S.A. E.S.P. debe realizar un proceso de aforo de sus daños, el cual ajustará el valor C.

Otro de los criterios fundamentales para la implementación de la metodología de priorización es encontrar el caudal que se deja de vender mientras duran las reparaciones. Para lograr lo anterior, se desarrolló como objetivo de esta tesis el programa MOVA el cual contiene un módulo de cálculo del caudal que consumen los usuarios afectados por los trabajos.

6.2.2. Implementación de MOVA. El programa MOVA corresponde a una poderosa herramienta que le permite al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. tener información en tiempo real de la afectación y acciones necesarias para aislar cualquier sector de sus redes. Sin embargo, el correcto funcionamiento de éste, depende directamente de la existencia de un modelo calibrado de la zona en cuestión.

6.2.3 Implementación de la metodología de mantenimiento predictivo-preventivo

Tal cual se ha dicho a lo largo de todo el documento, la metodología de mantenimiento predictivo-preventivo, corresponde un avance significativo dentro de la operación de la empresa, siempre y cuando se cuente con la información requerida; esto con el fin de contar con una herramienta capaz de anticiparse a los eventos y dar información confiable y oportuna a los funcionarios del amb S.A. E.S.P. para la gestión de los daños.

Los análisis realizados se centraron básicamente en mostrar la metodología a implementar, conociendo de antemano que los resultados podrían no ser del todo satisfactorios.

La recolección de información es la primera y más importante de las etapas que deben considerarse en la implementación de un modelo de este tipo, ya que condiciona la calidad de los resultados encontrados, independiente de los métodos intermedios utilizados para su procesamiento.

Todos los datos recopilados deben tener un componente geográfico, que permita su posterior análisis y comparación, a través de cualquier software SIG, tal información puede ser: información topológica (con las características propias de

los elementos que componen las redes), información de edades (dada su directa relación con el deterioro de las tuberías y por ende con la ocurrencia de los daños), información de riesgos y amenazas sobre la infraestructura física, información histórica de daños, ya que constituye la principal entrada para cualquier modelo de esta naturaleza y la información hidráulica, dado que evidencia el comportamiento y duración de los elementos que componen un sistema de distribución.

Según la metodología implementada por *Kettler & Goulter*, que implica el agrupamiento de datos de acuerdo con la naturaleza y principales características, es necesario identificar y evaluar tendencias y comportamiento típicos y brindar elementos de juicio para la construcción de grupos, para analizar de manera independiente los efectos de los daños en la red.

Con el uso de este método de creación de grupos, se obtiene una distribución inicial de la información. Sin embargo, dependiendo de las características propias de los datos, probablemente será necesario evaluar algunos ajustes o implementar metodologías adicionales para obtener resultados estadísticamente significativos.

7. CONCLUSIONES

- El Sistema Integrado de Información (SII++) y Extreme Control son fundamentales como herramientas de apoyo a la Gestión de daño, debido a que contienen toda la información necesaria para la prestación del servicio, lo anterior se demuestra con la alta tasa de usuarios dentro de la empresa que lo consideran básico para sus funciones.
- La ausencia en la planificación de los cierres que deben realizarse para atender los daños, trae como desventajas el aumento en los tiempos de atención, la atención tardía de daños prioritarios y dificultades en la información y servicio al cliente.
- Los modelos hidráulicos calibrados son una herramienta eficiente para la estimación de los volúmenes del agua perdida por fugas. Además, facilitan la evaluación del cumplimiento de presiones máximas y mínimas de acuerdo con la normatividad vigente. Tener información de esta naturaleza sobre las redes, contribuye a la generación y seguimiento de indicadores dentro de la empresa.
- La constante actualización de los indicadores directos permite aumentar el control de la red, a la vez que facilita el seguimiento a las soluciones o reparaciones de daños y la conservación de información histórica.
- Como uno de las conclusiones más importantes del presente proyecto investigativo, se encuentra el desarrollo de una herramienta informática (MOVA) capaz de establecer las válvulas que deben cerrarse para aislar un sector de cualquier red de distribución, encontrar los suscriptores afectados por el cierre y al mismo tiempo calcular tanto el caudal que se pierde por el daño como el que se deja de vender mientras duren los trabajos. Todo esto a partir de un modelo hidráulico calibrado, y el uso de las Tecnologías de la Información Geográfica, lo cual hace que este tipo de desarrollos sea único en su clase.
- El programa MOVA representa un avance inmenso en la Gestión Integral de Redes de Distribución, ya que aporta información indispensable para el cálculo de indicadores, priorización de daños y atención al cliente.
- Esta herramienta vanguardista (MOVA), permite en la oficina tener un contacto directo con lo que se está modificando en campo, permite detectar sectores en donde es necesario instalar nuevas válvulas para hacer que menos cuerdas se queden sin agua y por ende, el indicador de usuarios afectados disminuya en pro de un mejor servicio.

- La herramienta (MOVA) es capaz de identificar con exactitud los suscriptores que se quedan sin servicio frente a cualquier evento, estos suscriptores son almacenados en un reporte que debe ser cargado por el SII++ o Extreme Control y transmitido al CRM ubicado en el Call Center para que se dé información clara y actualizada al público. Esto mejora sustancialmente la atención del cliente y por ende la imagen del amb S.A. E.S.P. frente a la ciudad.
- Para el desarrollo de los modelos predictivos-preventivos, la información con la que se cuenta no arroja resultados certeros, que permita desarrollar políticas de planeación y prevención a largo plazo.
- En la literatura se describen muchos modelos matemáticos que permiten simular el comportamiento de los daños a futuro, cada uno de ellos considerando variables físicas de la tubería y de su entorno, pero cuyo alcance se ha definido sobre zonas particulares de estudio y que al ser extrapolado a otros lugares, no se obtienen la misma calidad en los resultados.
- Por priorización se conoce el proceso a través del cual se establece el orden en el que deben atenderse un conjunto de daños que se presentan de forma simultánea en una red de abastecimiento de agua potable. Existen varias maneras de establecer dicho proceso, aunque la mayoría de ellas consideran principalmente la distancia espacial entre los daños y el tamaño de las fugas.
- Actualmente en el amb S.A. E.S.P. los daños se asignan a las cuadrillas de reparación dependiendo de la cercanía al lugar en que se encuentren; y la decisión sobre qué válvulas cerrar o qué daños atender primero, se toma en campo según el criterio del personal que realizará la reparación, a excepción de los daños que afectan la red primaria, los cuales se atienden de manera inmediata. Esto incrementa los tiempos de atención de fallas de la red, disminuyendo la eficiencia de la empresa en cuanto a gestión del daño.
- Una de las variables en las cuales se basa la metodología de priorización de daños desarrollada en conjunto por el CIACUA y el amb S.A. E.S.P. es el caudal de fuga abierta (Q_{FA}), el cual se calcula a partir de los parámetros C y X asociados al tamaño y la forma del daño respectivamente. Para facilitar la determinación de estos, en la metodología se supone de forma genérica de las fugas el orificio circular y a su vez en la misma se definen seis categorías de clasificación de tipos de fugas según su tamaño, las cuales permiten una buena aproximación del coeficiente del tamaño de la fuga C.
- Priorizar la atención a partir de la ubicación geográfica de los daños, tomando como punto de origen la ubicación de la empresa, es el criterio usado actualmente por las prestadoras de servicio público, con el objeto de optimizar

los recorridos y por ende la atención; sin embargo, el análisis realizado para los casos estudiados indica que con este criterio se obtienen los mayores costos asociados a la fuga.

- En este punto, en términos de mejor planificación en rehabilitación y remplazo de tuberías el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. debe invertir en organizar la información que es recolectada. Esto permitirá poder generar bases que permitan realizar análisis con fundamentos de causalidad y estimaciones más precisas. La información está integrada por: información de las tuberías, historias de daños independientes de otros problemas de operación, reportes de operación, costos de procedimientos de mantenimiento y operación, índices de continuidad del servicio para usuarios, afectación del espacio público, condiciones del espacio público sobre las tuberías y gasto de agua en detección de daños y en operaciones de reparación.
- El uso de las Tecnologías de Información Geográfica como herramienta transversal al desarrollo de los procesos operativos, en este caso en la atención correctiva/preventiva/predictiva de los daños, permite la optimización de los mismos y es una herramienta de toma de decisiones y gestión dentro de la empresa.

8. RECOMENDACIONES

- El amb S.A. E.S.P. ha destinado gran parte de sus recursos tecnológicos, técnicos, humanos y financieros para dar pronta atención al daño. Se han generado protocolos de atención, herramientas tecnológicas que apoyan la toma de decisiones filtrando la información proveniente de los clientes que reportan los daños. Es evidente que el paso a seguir dentro del proceso de crecimiento y evolución debe ser la implementación de las metodologías, algoritmos y tecnologías planteadas en el presente proyecto.
- Con el fin de facilitar la evaluación de la gestión que la Empresa hace de los daños que se presentan en su red de distribución, es conveniente dividir el proceso de atención y reparación de daños en varios tiempos, de acuerdo con las actividades específicas realizadas en cada intervalo. Es necesario definir criterios de almacenamiento o de registro para poder persistir cada una de estas categorías de tiempo y así hacer posible la generación de los indicadores.
- Para mejorar la evaluación que actualmente se hace del desempeño de la Empresa, es necesario complementar los indicadores tradicionales incluyendo nuevas variables que influyen dicho desempeño, tales como el número de eventos de afectación total en el mes, el volumen total perdido por fugas abiertas, el volumen total perdido por afectación de usuarios, el caudal de la fuga abierta y de fuga contenida, las fechas de reporte del daño, de cierre, de restablecimiento del servicio, entre otras.
- La metodología de priorización propuesta debe aplicarse a cada uno de los sectores en los que se encuentre dividida la red de distribución para la atención de daños, identificando para cada uno, el número total de daños a atender y calculando para ellos los respectivos costos por fuga abierta y por fuga contenida.
- Es indispensable para implementar este tipo de metodologías tener un manejo y conocimiento muy preciso de la red, por lo cual, un modelo hidráulico calibrado y actualizado es un insumo clave para su operatividad.
- Es importante dedicar esfuerzos a disminuir prácticas de reparación de daños. El procedimiento de reparación de daños es costoso y no aporta beneficios en extensión de ciclo de vida y mejoramiento del funcionamiento de la red.
- Es importante que el amb S.A. E.S.P. analice la eficiencia y la calidad de los procesos que acompaña a las solicitudes de cambio que tiene la División de Sistemas de Información, para posibles mejoras y disminución en los tiempos

de atención. No está dentro del alcance de este proyecto evaluar dichos procesos.

- Lo anterior debe tener como contrapartida en la Sección de Redes la definición clara de los objetivos, indicadores, metas, informes, controles, entre otros, que sean vitales para la Gestión del Daño. Actualmente la Empresa tiene el personal encargado de dicha actividad, pero falta que exista un puente de comunicación exclusivo para la Gestión del Daño entre la Sección Redes (Gerencia de Operaciones) y la División Sistemas de Información.
- Para la Gestión del Daño es muy importante contar con indicadores que evalúen el desempeño de la empresa en cuanto a la atención del daño. Se sugiere que bimestralmente se lleven a cabo reuniones entre el personal de la Gerencia de Operaciones y la División de Sistemas de Información para definir qué nuevos parámetros deben ser medidos.
- Se sugiere que los programas hagan un seguimiento de los pasos que se hacen dentro de la Gestión del Daño para tener un control de las situaciones pendientes mediante alertas o avisos para evitar retrasos y posibles inconvenientes que se pueden generar. Estas alertas deben producirse en tiempo real.
- Pese al tamaño y buen funcionamiento del sistema de atención al cliente y recepción de llamadas con que cuenta actualmente el amb S.A. E.S.P., es necesario que antes de asignar recursos para la atención de daños se realice un proceso de verificación, el cual permite establecer plenamente el estado y la gravedad del suceso. Generalmente el personal encargado de la verificación se moviliza en motocicleta y lleva consigo herramienta básica que le permite realizar algunas labores sencillas, como el cierre de la válvula de entrada a las acometidas domiciliarias, mientras llega el personal encargado de la reparación. Contar con personal exclusivo de verificación de los daños permitirá a la Empresa ahorrar una gran cantidad de tiempo y recursos de los móviles, además de ser una etapa importante dentro de la priorización de los daños
- Para la implementación de la metodología de priorización del CIACUA en conjunto con el amb S.A. E.S.P. es necesario realizar algunos ajustes en la distribución del personal encargado de realizar las reparaciones. Además del empleo de verificadores que tengan la capacidad de recorrer rápidamente todos los sitios en que se reporten eventos y confirmar la magnitud de lo que ocurre, será necesario contar con personal de gran movilidad que realice de forma rápida los cierres a los daños pertenecientes al grupo A, los cuales como se explicó corresponden a aquellos que por sus características resulta muy costoso mantener abiertos.

- La metodología de priorización de daños requiere que el personal verificador en campo tenga la capacidad de estimar la magnitud de los caudales que están saliendo a través de la fuga reportada. Para lograr este cometido es necesario un proceso de capacitación y entrenamiento en los tipos de daños que pueden ocurrir con sus respectivos coeficientes.
- El proceso de estimación del caudal que se pierde a través de un daño específico es iterativo. Esto significa que las categorías y coeficientes consignados en este documento representan un punto de partida. Sin embargo cada daño es único, por lo que deberán probarse de forma rápida distintos valores de C hasta que el modelo arroje resultados coherentes con las observaciones de campo.
- Actualmente el amb S.A. E.S.P. no cuenta con ningún estudio enfocado a medir la cantidad de agua que se pierde a través de los daños de sus redes. Debido a lo anterior se recomienda adelantar investigaciones en campo que permitan cuantificar las fugas y depurar los valores de los coeficientes y exponentes propuestos.
- Para llevar a cabo los cálculos necesarios para la obtención de resultados, el programa MOVA utiliza los parámetros del modelo hidráulico de las redes. Si este no se encuentra correctamente calibrado, buena parte de los resultados encontrados, especialmente los relacionados con los caudales, no representarán lo que sucede en la realidad. Por lo anterior se recomienda como medida inicial para el empleo del software, llevar a cabo un proceso de calibración hidráulica.
- Para que la herramienta MOVA pueda funcionar debidamente, es necesario que además del modelo hidráulico del sector de estudio con todas las válvulas de cierre, se carguen todos los usuarios a los que se les suministra agua y un archivo que determine a que nodo de consumo se encuentra asociado. Para la creación de este último, se recomienda el empleo del programa SIGCONSUMO, el cual después de establecer los consumos de todos los nodos, arroja un archivo de salida con esta información.
- Debido a la naturaleza y al tamaño de las redes que conforman los sistemas de distribución, toda la información relacionada con los elementos topológicos presentan un carácter muy dinámico. Lo anterior hace que frecuentemente surjan o desaparezcan válvulas de cierre o que se presenten cambios en el estado de las existentes. A través de la interfaz gráfica del programa no es posible ingresar nuevos elementos al modelo o variar los existentes. Para lograr esto, es necesario utilizar un programa de simulación hidráulica.

- La estimación del caudal que se pierde por una fuga es un proceso iterativo, ya que en terreno es imposible conocer con certeza el valor del coeficiente C. Por lo anterior, se recomienda al amb S.A. E.S.P. entrenar a su personal operativo para que durante el proceso de verificación en campo pueda establecer un valor aproximado de éste y dar una descripción del daño. Esta información debe transmitirse en tiempo real a las oficinas de la Empresa, para que con su ayuda y a través del uso del programa, se logren reproducir las condiciones de campo.
- El proceso de priorización está ligado al uso de la herramienta MOVA, el cual debe ser manejado por una persona entrenada que esté dedicada exclusivamente a recibir las ordenes de trabajo que van a ser atendidas, ingresar al software los datos necesarios para que puedan calcular los costos y posteriormente se priorice la atención.
- La persona encargada de utilizar el programa debe manejar muy bien las herramientas tecnológicas, especialmente los sistemas de información geográfica. En cuanto a la topología de la red, la persona debe tener un amplio conocimiento de ella para ubicar con facilidad y exactitud los daños.

BIBLIOGRAFÍA

ABDELWAHAB M.; ELSHAFIE A y JAAFAR O. Performance improvement for pipe breakage prediction modeling using regression method. En: International Journal of the Physical Sciences. Malasia. 6 Vol. (23 Octubre de 2011); p. 6025-6035. ISSN 1992-1950. Disponible en: <<http://www.academicjournals.org/IJPS>>

ALONSO GUZMAN, Carlos D. Programación óptima de la renovación de tuberías en un sistema de abastecimiento urbano: Análisis de los factores de influencia. España. 2008. Universidad Politécnica de Valencia. [Consulta 24/03/2015]. Disponible en <<http://riunet.upv.es/handle/10251/14296>>

ARAQUE FUENTES, Diego A. Optimización de redes con el fin de uniformizar el estado de presiones. Bogotá, 2006. Trabajo de grado (Magíster en Ingeniería Civil). Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Disponible en el catálogo público en línea de la Biblioteca de la Universidad de los Andes: <<http://biblioteca.uniandes.edu.co>>

J. CANTO RÍOS, Et al. Methodology for the identification of apparent losses in water distribution networks. En: 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry. Disponible en: <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814000290>

MAVIN K. Predicting the failure of individual water mains. Melbourne (Australia). 1996. Urban Water Research Association of Australia. 187p.

Metodología para la definición de plano óptimo de presiones y reducción de agua no contabilizada”. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Tomo I. 2008.

MOLPECERES, Alberto. Procesos de desarrollo: RUP, XP, FDD. 2003. [consulta: 10/02/2015]. Disponible en <<http://www.willydev.net/descargas/articulos/general/cualxpfddrup.PDF>>

SALDARRIAGA, Juan G. CONTRERAS, Felipe S. Metodología para la determinación del plano óptimo de presiones en una red de distribución de agua potable. En: XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA. (2002), La Habana.

SALDARRIAGA J.G, OCHOA S, MORENO M, ROMERO N & CORTÉS O. Renovación priorizada de redes de distribución utilizando el concepto de potencia unitaria. En: Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes. #31, (2010); p 7-15.

SALDARRIAGA J.G, OCHOA-RODRIGUEZ S, NIÑO CA, et al., 2009, Water distribution system corrective maintenance supported by real-time use of hydraulic models, Kansas City, USA, World Environmental & Water Resources Congress 2009: Great Rivers, Pages 1-11.

SENN, James. Análisis y diseño de Sistemas de Información. 2 ed. Argentina: McGraw-Hill, 1988. 643 p. ISBN: 968-422-165-7.

SHRIDHAR YAMIJALA. Statistical Estimation of Water Distribution System Pipe Break Risk. Texas (USA), 2007. Trabajo de Grado de Maestría. Universidad de Texas A&M. [Consulta: 18/05/2015]. Disponible en el catálogo público en línea de la Biblioteca de la Universidad de Texas A&M. <<http://reposotory.tamu.edu.co>>

PRESSMAN, Roger. Ingeniería del software. 5 ed. Madrid: McGraw-Hill, 2002. 589 p. ISBN 0-07-709677-8

WANG, Y.; MOSELHI O.; ASCE F. y ZAYED T. Study of the suitability of existing deterioration models for water mains. 2009. En: Journal of performance of constructed facilities. [Consulta: 18/05/2015]

WEIFENG Li, Et al. Development of systems for detection, early warning, and control of pipeline leakage in drinking water distribution: A case study. 2011. [Consulta 24/03/2015]. Disponible en: <www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22432305>

ANEXOS

ANEXO A.
DICCIONARIO DE DATOS DE LA BASE DE DATOS DEL APLICATIVO MOVA

NOMBRE DEL OBJETO	NODOS	TIPO	Alfanumérico
DEFINICIÓN	Tabla de nodos de caudal leídos desde el archivo de EPANET		
ATRIBUTOS			
NOMBRE DEL ATRIBUTO	TIPO	TAMAÑO	DESCRIPCIÓN
Id	Texto		Identificador del nodo de caudal
x_coord	Double		Coordenada X del nodo
y_coord	Double		Coordenada Y del nodo
Sector	Texto		Sector hidráulico del nodo

NOMBRE DEL OBJETO	CIERRE	TIPO	Espacial
DEFINICIÓN	Cobertura de puntos que determina las válvulas a cerrar para dar atención al evento presentado		
ATRIBUTOS			
NOMBRE DEL ATRIBUTO	TIPO	TAMAÑO	DESCRIPCIÓN
id_tubo	Texto		Identificador del tubo afectado por el cierre
Valvula	Texto		Identificador de la válvula a cerrar
x_coord	Double		Coordenada X de la válvula a cerrar
y_coord	Double		Coordenada Y de la válvula a cerrar

NOMBRE DEL OBJETO	TUBOS	TIPO	Espacial
DEFINICIÓN	Cobertura de Líneas, que determina las tuberías dentro de la red de distribución		
ATRIBUTOS			
NOMBRE DEL ATRIBUTO	TIPO	TAMAÑO	DESCRIPCIÓN
id_tubo	Entero		Identificador del tubo
Tipo_tubo	Texto	50	Tipo de tubo (diam y material)
FechaInst	Texto	10	Fecha instalación del tubo
Superficie	Texto	50	Superficie (Andén, zona verde)
Estado	Texto	50	Buen Estado, Mal Estado
Barreal	Texto	50	Barrio donde se encuentra el tubo
Jerarquia	Texto	20	Distribucion, Conducción, aducción
Diametro	Entero		Diametro de la tuberia en pulg.
Unidad	Texto	5	Unidades
Edad	Entero	10	Edad de la tuberia
Sector	Texto	50	Sector Hidráulico
Profundidad	Texto	50	Profundidad en metros

NOMBRE DEL OBJETO	USU_CIERRE	TIPO	Espacial
DEFINICIÓN	Cobertura de puntos que determina los usuarios afectados por el cierre		
ATRIBUTOS			
NOMBRE DEL ATRIBUTO	TIPO	TAMAÑO	DESCRIPCIÓN
id_usuario	Texto		Identificador del usuario afectado por el cierre
x_coord	Double		Coordenada X del usuario
y_coord	Double		Coordenada Y del usuario

NOMBRE DEL OBJETO	PRUEBA2	TIPO	Alfanumérico
DEFINICIÓN	Tabla de distancias de las válvulas al tubo afectado por el evento		
ATRIBUTOS			
NOMBRE DEL ATRIBUTO	TIPO	TAMAÑO	DESCRIPCIÓN
distancia	Double		Distancia de la válvula al tubo afectado (mts)
idvalv	Texto		Identificador de la válvula
idtubo	Texto		Identificador del tubo afectado
nodoini	Texto		Nodo inicial del tubo
nodofin	Texto		Nodo final del tubo

NOMBRE DEL OBJETO	NODOSOUT	TIPO	Alfanumérico
DEFINICIÓN	Tabla de nodos con el consumo acumulado en litros por segundo		
ATRIBUTOS			
NOMBRE DEL ATRIBUTO	TIPO	TAMAÑO	DESCRIPCIÓN
Campo1	Texto		Identificador del nodo de caudal
Campo2	Double		Consumo en lps

NOMBRE DEL OBJETO	PRUEBA	TIPO	Alfanumérico
DEFINICIÓN	Tabla de tubos válvulas		
ATRIBUTOS			
NOMBRE DEL ATRIBUTO	TIPO	TAMAÑO	DESCRIPCIÓN
Id_Valvula	Texto		Identificador Tubo Valvula
NodoInicial	Texto		NodoInicial de la valvula
xinicial	Double		Coordenada X del nodo inicial
yinicial	Double		Coordenada Y del nodo inicial
nodofinal	Texto		NodoFinal de la valvula
xfinal	Double		Coordenada X del nodo final
yfinal	Double		Coordenada Y del nodo final
diametro	Texto		Diametro de la tuberia valvula
Sector	Texto		Sector hidraulica de la tuberia valv.

NOMBRE DEL OBJETO	PRUEBA1	TIPO	Alfanumérico
DEFINICIÓN	Tabla del tubo afectado por el evento		
ATRIBUTOS			
NOMBRE DEL ATRIBUTO	TIPO	TAMAÑO	DESCRIPCIÓN
Id	Texto		Identificador Tubo evento
NodoInicial	Texto		NodoInicial del tubo evento
xinicial	Double		Coordenada X del nodo inicial
yinicial	Double		Coordenada Y del nodo inicial
nodofinal	Texto		NodoFinal del tubo evento
xfinal	Double		Coordenada X del nodo final
yfinal	Double		Coordenada Y del nodo final
diametro	Texto		Diametro de la tubería
Sector	Texto		Sector hidraulica de la tubería

NOMBRE DEL OBJETO	USUARIOSOUT	TIPO	Alfanumérico
DEFINICIÓN	Tabla de usuarios con su nodo de caudal y su consumo		
ATRIBUTOS			
NOMBRE DEL ATRIBUTO	TIPO	TAMAÑO	DESCRIPCIÓN
Campo1	Texto		Identificador del usuario
Campo2	Texto		Identificador del nodo de caudal
Campo4	Double		Consumo en lps

ANEXO B. MANUAL DE USUARIO DEL APLICATIVO MOVA

Antecedentes. Como se ha mencionado, determinar las válvulas a cerrar y las áreas afectadas por la ocurrencia de un daño dentro de un sistema de distribución, se realizan de forma manual, tomando como criterio el conocimiento experto del operario del sistema. Con el transcurrir del tiempo, estas personas se volvieron grandes fuentes de referencia, dado que conocen las redes a profundidad y los elementos que componen las mismas.

Tradicionalmente las diferentes regiones en el mundo, llevan a cabo sus tareas de mantenimiento y reparación de las redes, partiendo del conocimiento de dicho personal, lo que no garantiza resultados óptimos ni inmediatos. Así mismo, no existe forma alguna de determinar los usuarios afectados ni el caudal que se dejó de facturar por las obras.

Con respecto a la modelación informática de sistemas de distribución, se han adelantado investigaciones encaminadas a desarrollar métodos numéricos que permitieran solucionar el sistema matricial resultante de aplicar las ecuaciones de resistencia fluida. Como resultado de estos han surgido métodos como el de Hardy-Cross, Newton-Rapshon, Teoría Lineal y Gradiente, a través de los cuales se puede simular el comportamiento de los sistemas de distribución. La implementación y difusión de los programas de cálculo que utilizan estos métodos es verdaderamente reciente, debido a la necesidad de equipos de cómputo de muy buenas especificaciones, los cuales se masificaron sólo durante la década pasada.²⁵

Dentro de las actividades de diseño y operación de los sistemas de abastecimiento, los programas de modelación de redes de distribución de agua son de suma importancia. En el mercado se encuentran algunos paquetes de alto costo y otros de libre distribución, algunos de los cuales ofrecen módulos de simulación de calidad o integran elementos de los sistemas de información geográfica. En Colombia, los programas más utilizados para la simulación de redes de distribución son EPANET y WATERCAD.

Requerimientos Computacionales Mínimos. Para el correcto funcionamiento del programa MOVA es obligatorio en cuanto al hardware, a continuación se listan los requerimientos mínimos recomendados para hacer uso eficiente y productivo de la herramienta:

Procesador: Pentium IV
Velocidad: 3.0 MHz

²⁵ “Metodología para la definición de plano óptimo de presiones y reducción de agua no contabilizada”. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Tomo I. 2008

Memoria RAM: 8 GB
Disco Duro: 1 TB

Archivos de entrada - Archivos (*.INP). La determinación de los cierres necesarios para aislar una zona específica dentro de un sistema distribución, es una labor que depende fundamentalmente de la hidráulica de la red, cuya determinación requiere de un modelo hidráulico de la zona, el cual debe tener algunas características especiales que le permitan al programa MOVA establecer la ubicación de las válvulas para aislar cualquier tubo seleccionado.

Los modelos hidráulicos de las zonas que desean evaluarse a través del programa MOVA deben ingresarse a través de un archivo (*.INP), que corresponde al tipo de archivo de intercambio utilizados dentro de la modelación hidráulica de sistemas de distribución de agua potable. Un archivo (*.INP) está formado por un conjunto de tablas que contienen toda la información referente al sistema analizado.

Entre los principales elementos que conforman un modelo hidráulico se destacan:

- **Nodos:** encargados de representar el punto de unión de las tuberías y demás elementos que conforman la red. Algunos de los atributos de los nodos de consumo son: coordenadas XYZ, demanda, coeficiente del emisor y patrón de consumo.
- **Tubos:** representan los conductos a través de los cuales circula el agua. Algunos de sus atributos son: nodo inicial, nodo final, longitud, diámetro, rugosidad, estado, coeficiente de pérdidas menores.
- **Tanques:** simulan el efecto de almacenamiento de agua. Un tanque se representa a través de su altura, geometría, dimensiones, curva de gasto.
- **Reservorios:** encargados de suministrar el agua que demanda el sistema. Representan las fuentes de abastecimiento.
- **Bombas:** suministran energía a sectores de la red.
- **Válvulas de control:** elementos encargados de modelar la existencia de accesorios especiales como válvulas reguladoras de presión o caudal.

Como se observa, dentro de la modelación hidráulica de sistemas de distribución no existe un elemento destinado exclusivamente a la simulación de las válvulas de cierre, por lo que típicamente se emplean tramos de tubería a las cuales se les varía el estado de “abierto” a “cerrado”.

Dentro de las redes de agua potable las válvulas de cierre se clasifican en tres categorías de acuerdo con su estado y con el tipo de uso que se les dé:

- Válvulas de cierre permanente: encargadas de aislar constantemente algunos sectores del sistema. Este tipo de elementos sólo se opera en caso de emergencias.
- Válvulas cerradas: se encuentran aislando temporalmente un sector por labores de operación o mantenimiento.
- Válvulas abiertas: pueden ser utilizadas para interrumpir el flujo de agua de alguna zona.

Para que el programa identifique correctamente el sitio y el estado de las válvulas de cierre del modelo, éstas deben representarse a través de tuberías cuyo identificador tenga como primer carácter la letra "V". En el caso de las tuberías que cumplan esta característica, el programa leerá su estado; si éste es "CERRADO", sabrá que se trata de una válvula de cierre permanente. En caso contrario sabrá que es una válvula que se encuentra abierta y que podrá utilizarla para aislar cualquier sector.

Archivos de entrada – Archivos de usuarios. Otro de los aspectos importantes relacionados con la información de entrada al programa está asociado a la ubicación espacial de los usuarios, sus consumos y los nodos a los cuales fueron asignados.

La información de los consumos debe cargarse a través de un archivo plano el cual contenga el identificador de cada usuario, sus coordenadas XYZ y su consumo. El nodo de consumo al cual fue asignado cada suscriptor, se determina ingresando el archivo de salida de los suscriptores "nodos out" del programa SIGCONSUMO, el cual contiene el identificador de cada usuario y el valor del nodo de consumo al que fue asignado.

Instalación del programa. Los siguientes archivos hacer parte del paquete de ficheros que deben almacenarse en un directorio del equipo, dado que MOVA es un archivo ejecutable:

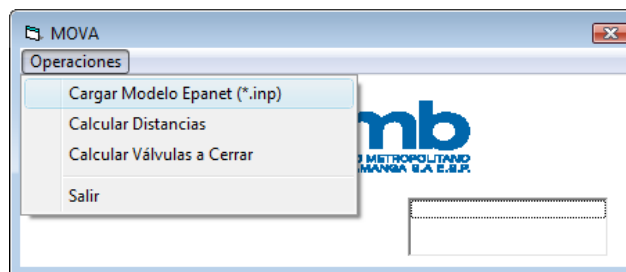
Epanet2.dll
MOVA.exe
BasedeDatos.mdb
ModeloHidraulico.inp

Menús gráficos. Como se mencionó anteriormente, la herramienta se desarrolló como un software desktop pero con un componente de sistemas de información geográfico. Para acceder a sus opciones, se debe ejecutar el programa “MOVA.exe”.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
centinella	25/06/2015 7:54 a. ...	Microsoft Access ...	1,244,036 KB
cierres.map	11/05/2012 2:41 p....	Archivo MAP	12 KB
cierres.php	11/05/2012 2:44 p....	Archivo PHP	30 KB
epanet2.bas	04/02/2011 7:49 a. ...	Archivo BAS	9 KB
epanet2.dll	25/02/2008 4:00 p....	Extensión de la apl...	212 KB
Form1.frm	02/06/2015 2:15 p....	Archivo FRM	39 KB
Form1.frx	02/06/2015 2:15 p....	Archivo FRX	537 KB
ModeloHidraulicoAMB_CENTINELA.inp	08/02/2011 9:10 a. ...	Archivo INP	14,360 KB
ModeloHidraulicoAMB_CENTINELA.rpt	25/06/2015 7:54 a. ...	Archivo RPT	9 KB
MOVA	30/03/2015 2:59 p....	Aplicación	624 KB
Project1	08/02/2011 3:52 p....	Aplicación	612 KB
Project1.PDM	08/02/2011 5:33 p....	Archivo PDM	10 KB

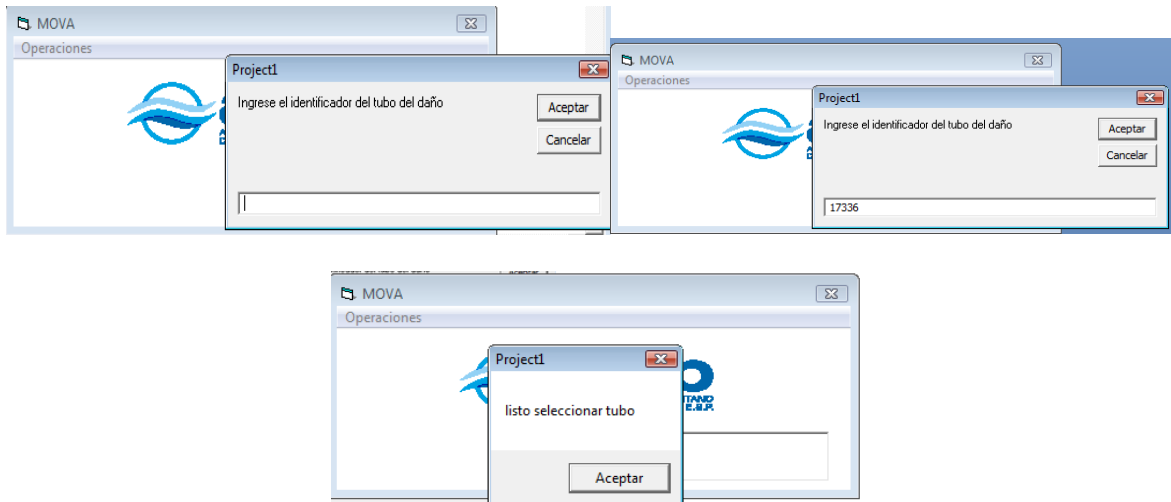


El Botón “Operaciones” contiene todas las opciones necesarias para la realización del “cierre óptimo” y la impresión de los resultados. Las opciones disponibles en éste son:



- **Menú Cargar Modelo Epanet (*.inp):** en ésta se define la ruta y el nombre del archivo que representa la red que se va a utilizar. A su vez almacena la información de las tuberías, válvulas y nodos de caudal dentro de la base de datos.
- **Menú Calcular Distancias:** calcula las distancias entre las válvulas del modelo a fin de tener una referencia, para el cálculo final.
- **Calcular válvulas a cerrar:** Una vez procesados los archivos de entrada, el paso siguiente es determinar en cuál tubo de la red ocurrió el daño, para que el programa establezca la zona que se verá afectada por las labores de

reparación o mantenimiento. Para realizar lo anterior, el usuario debe utilizar este botón y digitalizar el identificador único del tubo, tal cual se muestra:

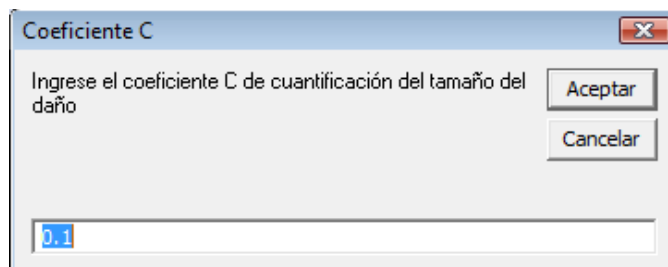


Una vez escogido el punto para cual se realizarán los análisis, debe hacerse clic en el botón “Aceptar”, una vez salga “Listo seleccionar tubo”, lo que significa que el ID del tubo existe dentro de la base de datos e inicie el proceso de cálculo.

Como cada uno de los daños que suceden en las redes, debe seguir un proceso a través de las distintas dependencias de la empresa hasta su reparación, los resultados que arroja el programa MOVA deben poder ser utilizados por el SII++ para su posterior procesamiento y almacenamiento.

En el cuerpo de este documento, se presentó una metodología de priorización de atención de daños basada en la cantidad de agua que se pierde por una fuga y la cantidad de agua que se deja de vender por los cierres necesarios para los trabajos de reparación.

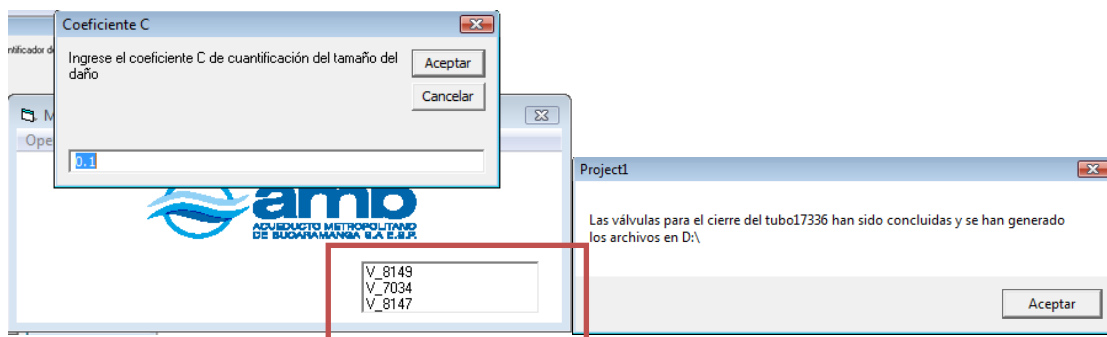
En la siguiente figura se muestra la ventana de entrada del dato del coeficiente del tamaño de la fuga, necesario para el cálculo del agua que se pierde por el daño.



- **Coeficiente del tamaño de la fuga (C):** se encarga de cuantificar el tamaño del daño para el cual se determina la pérdida de caudal. Su valor debe estimarse en campo por operarios entrenados.
- **Presión (m.c.a.):** presión del flujo medida en sitio del evento, para esta versión del software, dicho parámetro es calculados por medio del modelo hidráulico.
- **Coeficiente de forma (x):** representa la forma del daño que ocasionó la fuga. Típicamente se emplea un valor de 0.5 que representa daños de forma circular.

El valor del metro cúbico de agua (en pesos) para que el programa automáticamente haga el cálculo del Costo de la Fuga Contenida, a partir de este valor y del caudal demandado por los usuarios afectados por los cierres. Para el caso de MOVA, dicho valor corresponde a 1261.53 \$/m³, que es el valor de la tarifa de consumo vigente para el estrato 3 del municipio de Bucaramanga.

Una vez ingresados los valores requeridos, el programa realiza operaciones de procesamiento de la información y generación de resultados.



Como se muestra en la figura, al ejecutar el programa, se obtienen los identificadores de las válvulas a cerrar y se crean dos nuevos shapes:

- **Usuarios afectados:** contiene el registro de suscriptores afectados por las labores.
- **Cierre Indicado:** formado por las válvulas que deben operarse para dejar sin agua el sector en que se presentó el suceso, afectando al menor número de usuarios posibles, de acuerdo con la modelación hidráulica de la red.

Sistema Geográfico de Informa... x +

http://localhost/mfd_win/cierres.php

Vive amb **amb** ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A.E.S.P.

Orden de Trabajo Móviles Personal Redes Cierres Complementarias Informes amb

Bienvenido, Sistema de Información Geográfico de Atención de Daños - Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

>>> Layers

- Perimetro de Servicio
- Tubos
- Distritos de Presión
- Cierre Indicado
- Construcciones
- Zonificación amb
- Comunas Bucaramanga
- Tanques de Almacenamiento
- Válvulas Reguladoras
- Hidrantes
- Válvulas de Purga
- Ventosas
- Barrios
- Malla Vial Bimanga
- Malla Vial Floridablanca
- Malla Vial Girón
- Usuarios Afectados
- Válvulas Cerradas
- Tubo Daño

>>> Leyenda

- Barrios
- Comunas Bucaramanga
- Zonificación amb
- Construcciones
- Malla Vial Girón
- Malla Vial Floridablanca
- Malla Vial Bucaramanga
- Tubería Daño
- Tubería
- Ventosas
- Válvulas de Purga
- Hidrantes
- Válvulas Reguladoras
- Tanques de Almacenamiento
- Usuarios afectados
- Cierre
- Distritos de Presión
- Perimetro de Servicio

>>> Acueducto de Bucaramanga

amb

>>> Gestión Integral de Redes

Sistema Geográfico de Informa... x +

http://localhost/mfd_win/cierres.php

Vive amb **amb** ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A.E.S.P.

Orden de Trabajo Móviles Personal Redes Cierres Complementarias Informes amb

Bienvenido, Sistema de Información Geográfico de Atención de Daños - Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

>>> Layers

- Perimetro de Servicio
- Tubos
- Distritos de Presión
- Cierre Indicado
- Construcciones
- Zonificación amb
- Comunas Bucaramanga
- Tanques de Almacenamiento
- Válvulas Reguladoras
- Hidrantes
- Válvulas de Purga
- Ventosas
- Barrios
- Malla Vial Bimanga
- Malla Vial Floridablanca
- Malla Vial Girón
- Usuarios Afectados
- Válvulas Cerradas
- Tubo Daño

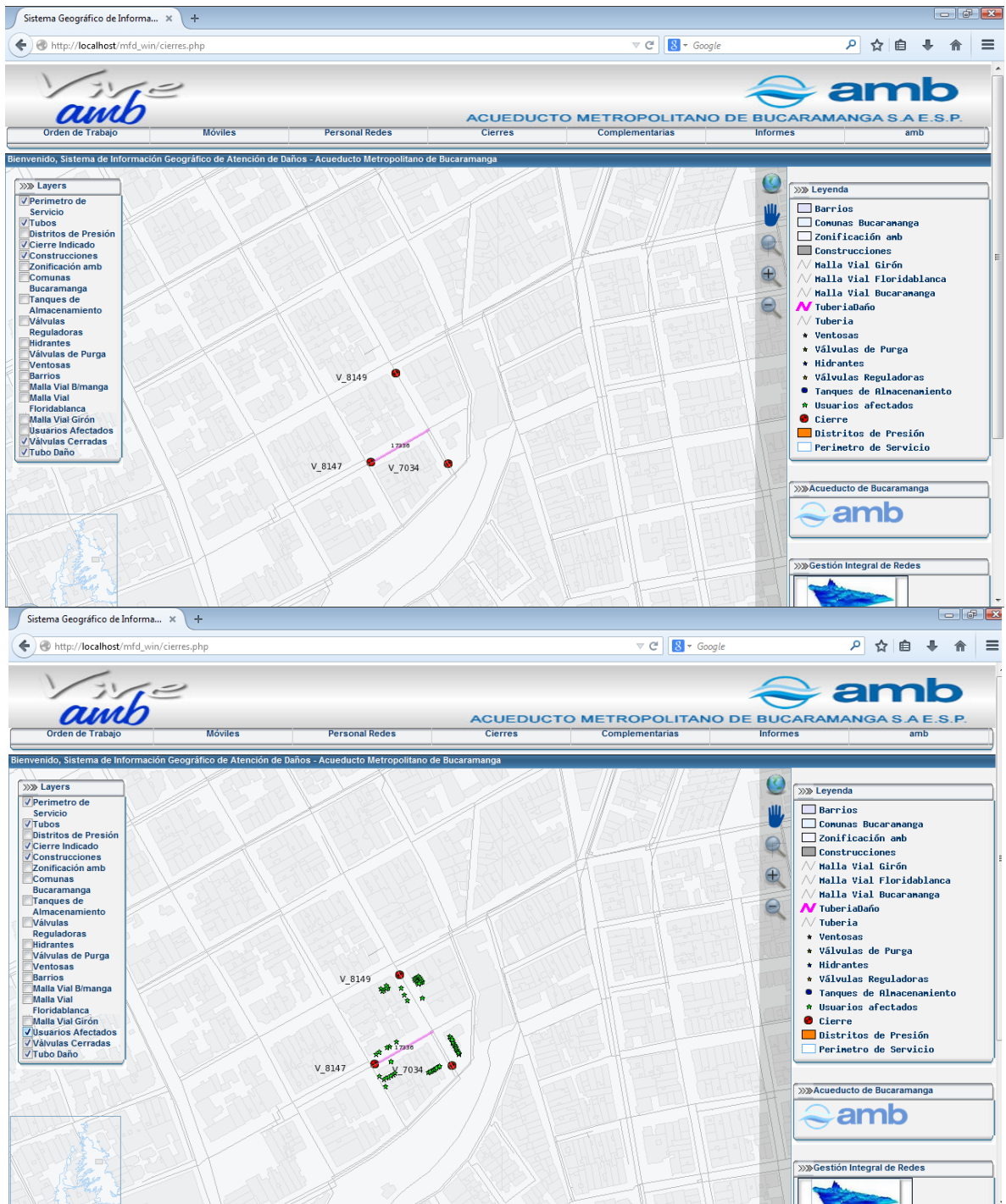
>>> Leyenda

- Barrios
- Comunas Bucaramanga
- Zonificación amb
- Construcciones
- Malla Vial Girón
- Malla Vial Floridablanca
- Malla Vial Bucaramanga
- Tubería Daño
- Tubería
- Ventosas
- Válvulas de Purga
- Hidrantes
- Válvulas Reguladoras
- Tanques de Almacenamiento
- Usuarios afectados
- Cierre
- Distritos de Presión
- Perimetro de Servicio

>>> Acueducto de Bucaramanga

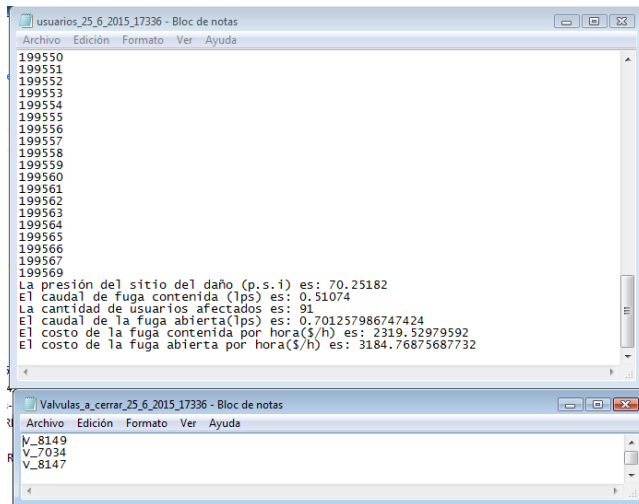
amb

>>> Gestión Integral de Redes



Archivos de salida. Además de contar con un amplio despliegue gráfico de todos los resultados obtenidos, el programa MOVA cuenta con un completo registro de los datos, el cual se almacena en un archivo plano ubicado en el disco "D:". El nombre del primer archivo se definió de tal manera que tenga el formato

“usuarios_dd_mm_yyyy_idtuberiadaño” y el segundo archivo con el formato “válvulas_a_cerrar_dd_mm_yyyy_idtuberiadaño”.



A continuación se presentan las etiquetas que conforman el archivo de salida del programa MOVA:

- <Cantidad de usuarios afectados>
- <Caudal de la fuga abierta>: cantidad de agua que se pierde por el daño en L/s.
- <Caudal de la fuga contenida>: cantidad de agua que se deja de vender por los cierres realizados para lograr las reparaciones, en L/s.
- <Costo de la fuga abierta>: costo del agua que se pierde debido al daño por cada hora que permanezca abierto, en \$/hora.
- <Costo de la fuga contenida>: costo del agua que se deja de vender por cada hora que duren los cierres, en \$/hora.
- <Usuarios afectados>: listado con el identificador de los suscriptores que resultaron afectados por las reparaciones.
- <Válvulas a operar>: listado con el identificador de las válvulas que deben ser operadas para afectar la menor cantidad de usuarios.

Con cada ocurrencia de un daño se creará un reporte con estas características para que el sistema de información de la Empresa lo cargue y reciba.

Limitaciones de esta versión. En la actualidad el programa cuenta con algunas limitaciones relacionadas con la modificación del modelo hidráulico de la red, cuyo manejo se presenta a continuación.

Los elementos topológicos que forman las redes de distribución tienen un carácter dinámico debido a que su estado varía constantemente. Todos los días se instalan nuevas válvulas o se presentan nuevos daños en las existentes. En la actualidad,

a través de la interfaz del programa MOVA no es posible efectuar de forma directa ningún cambio en los elementos de la red. Sin embargo, estos pueden realizarse de forma muy sencilla a través de cualquier programa de simulación hidráulica.

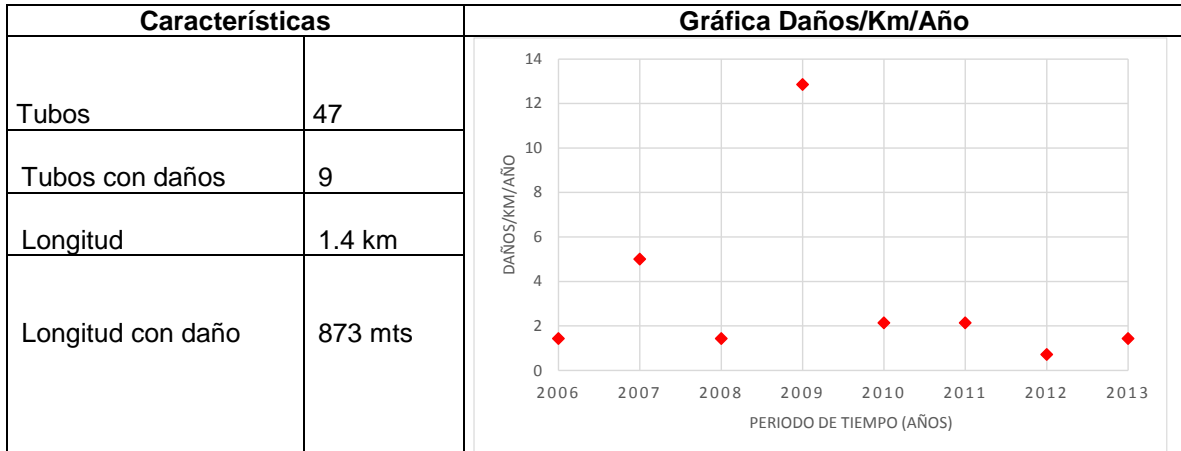
Supóngase que una retroexcavadora rompe una tubería. Al llegar el reporte a la sección de redes y correr el programa MOVA, se encuentra que deben cerrarse cinco (5) válvulas. Sin embargo el personal operativo en campo encuentra que una de las válvulas presenta un problema y no puede operarse, por lo que solicita al funcionario encargado del programa que determine una configuración de cierres diferente para aislar el sector afectado.

Una de las limitaciones del software MOVA, es tener la posibilidad de analizar esta nueva condición.

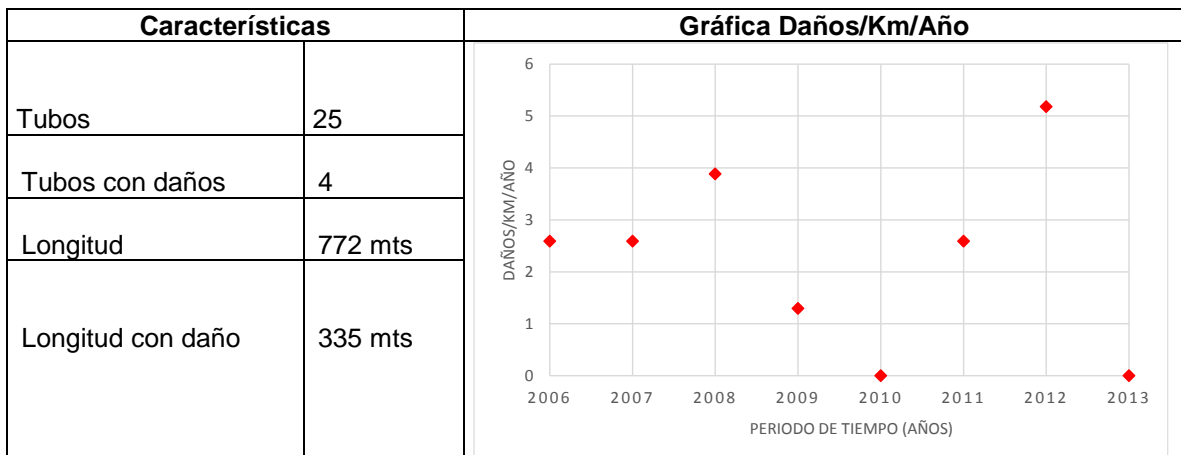
Otra de las restricciones del programa, se refiere a que parámetros como el costo del metro cúbico, se asumen y no son digitalizados por el usuario.

ANEXO C. CARACTERÍSTICAS GRUPOS HOMOGENEOS

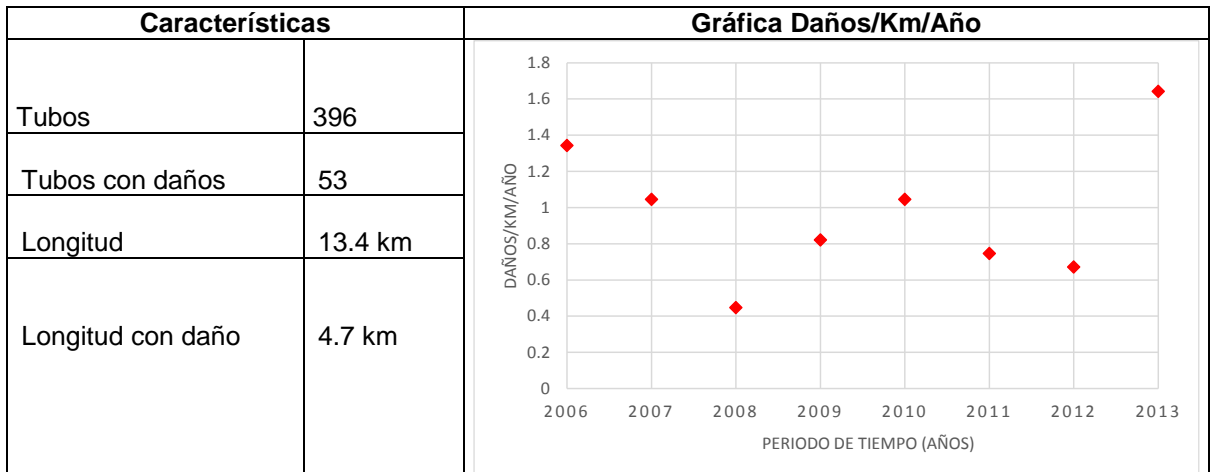
Características del Grupo 9.



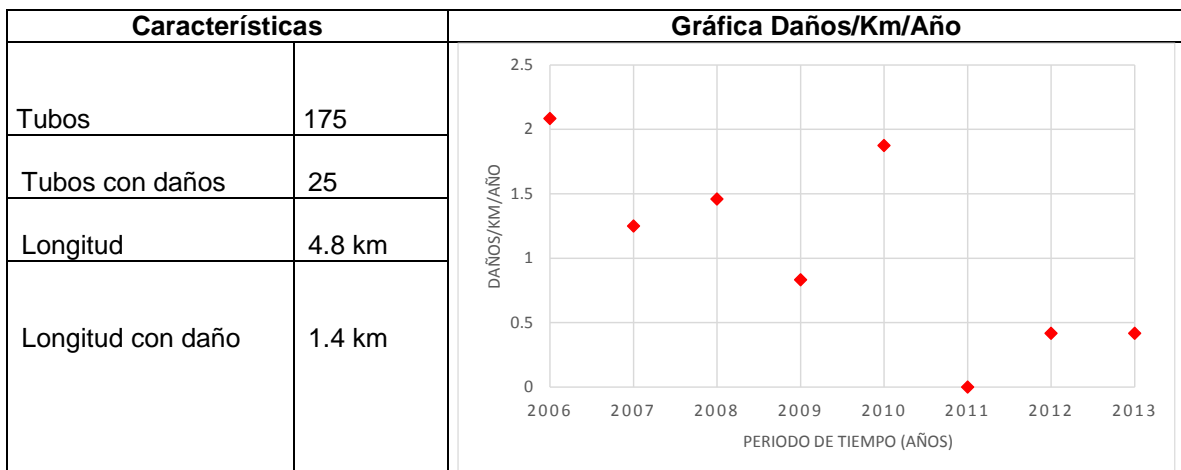
Características del Grupo 10.



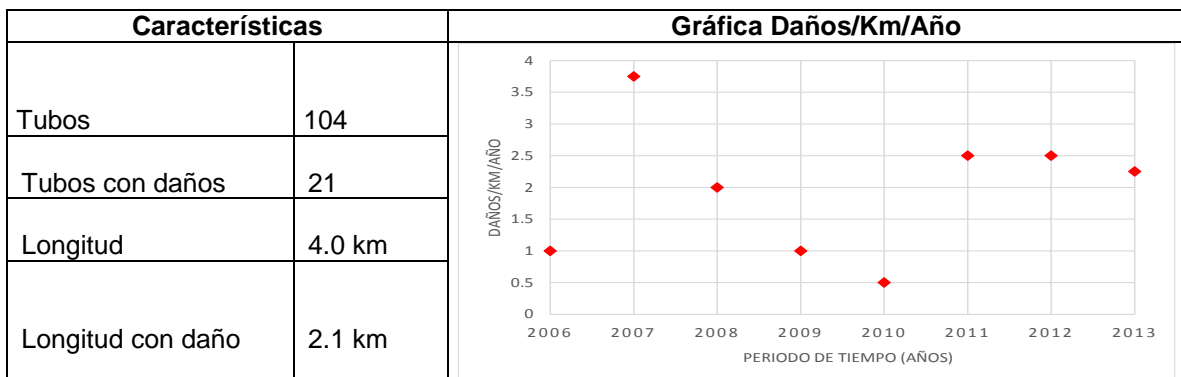
Características del Grupo 11.



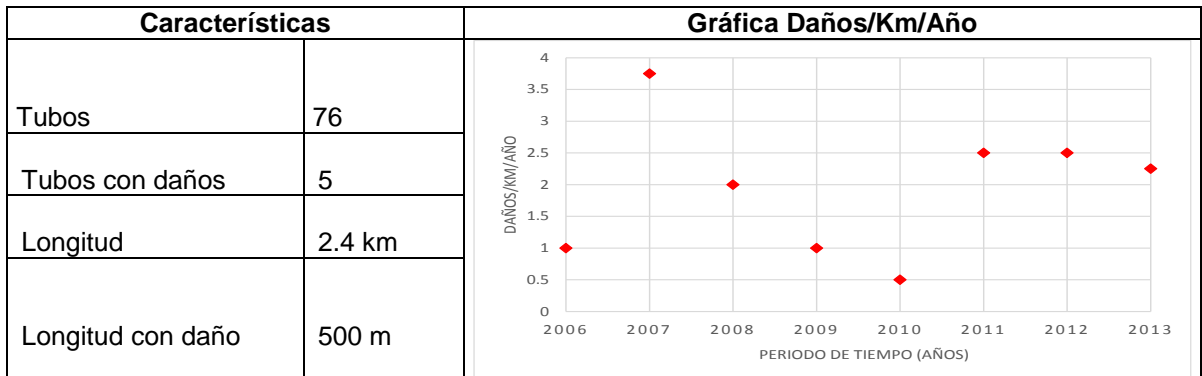
Características del Grupo 12.



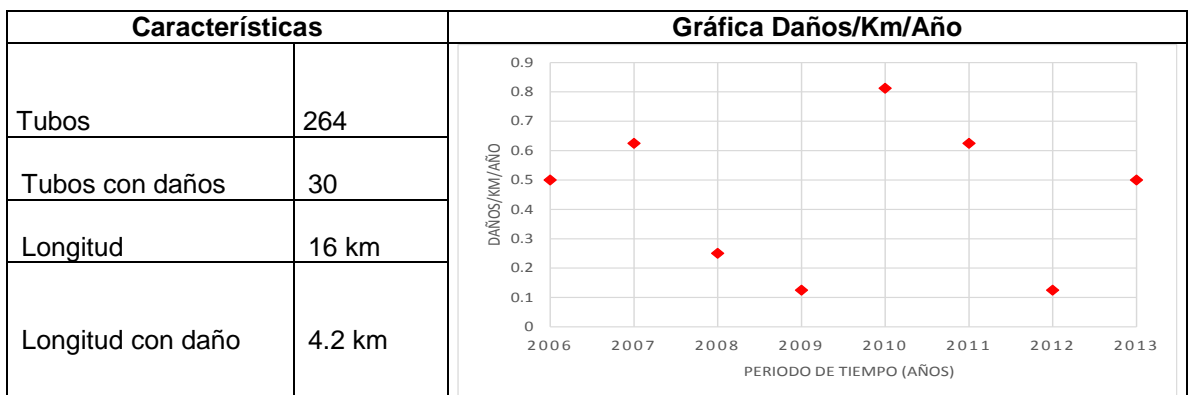
Características del Grupo 13.



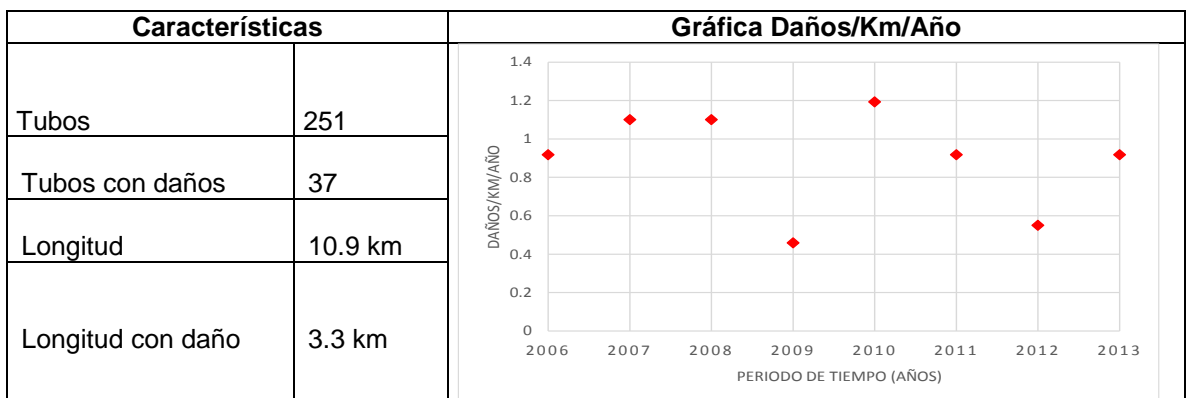
Características del Grupo 14.



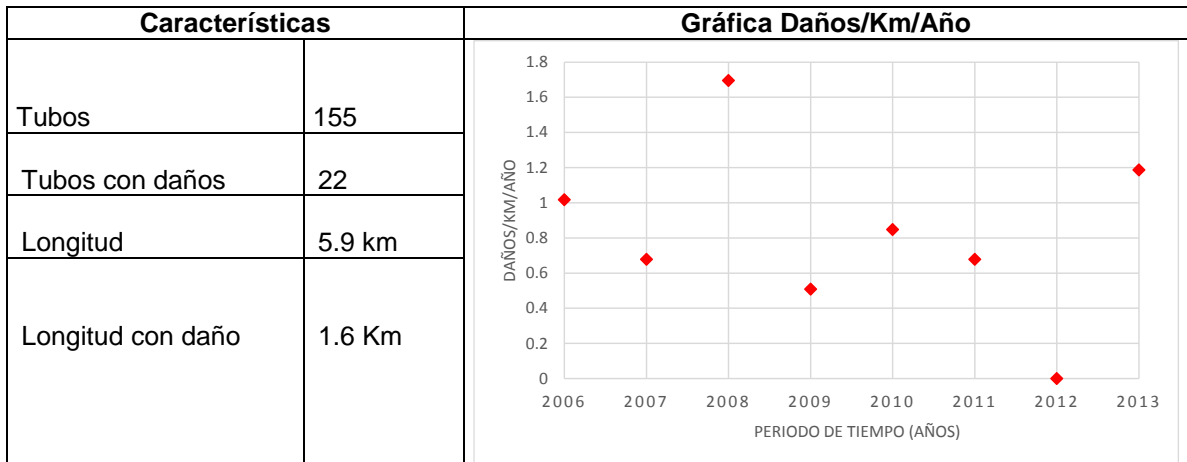
Características del Grupo 15.



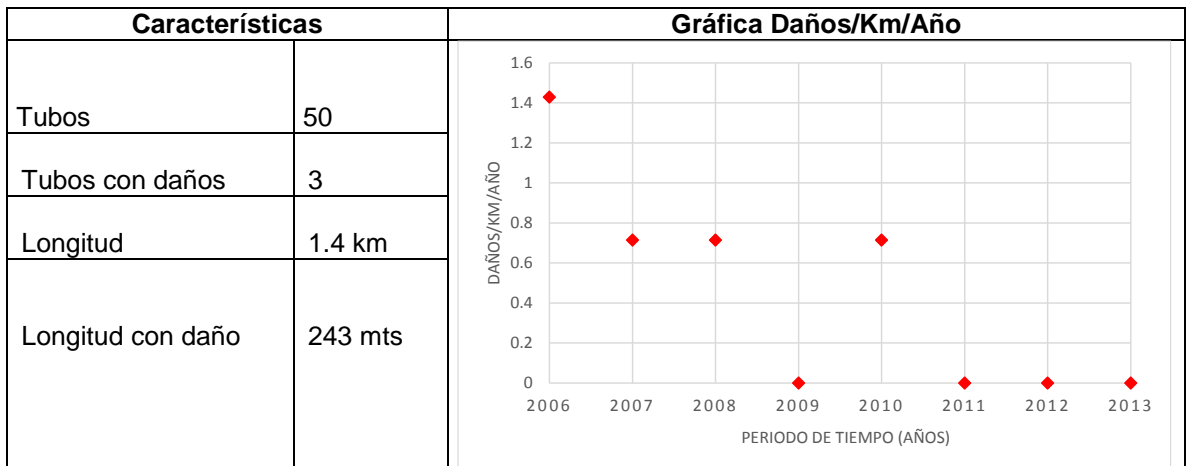
Características del Grupo 16.



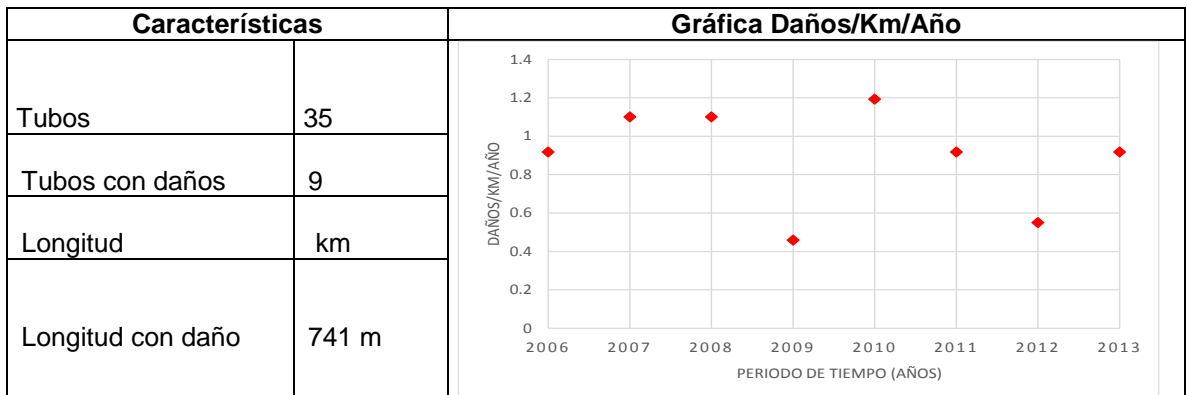
Características del Grupo 17.



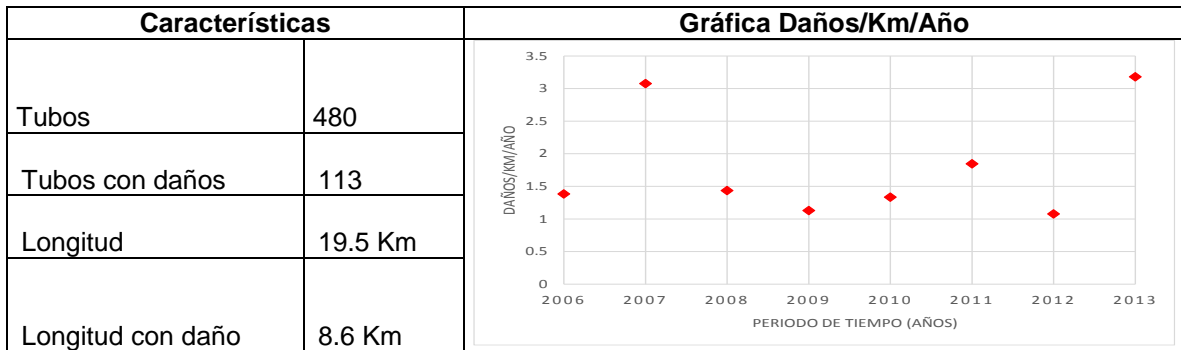
Características del Grupo 30.



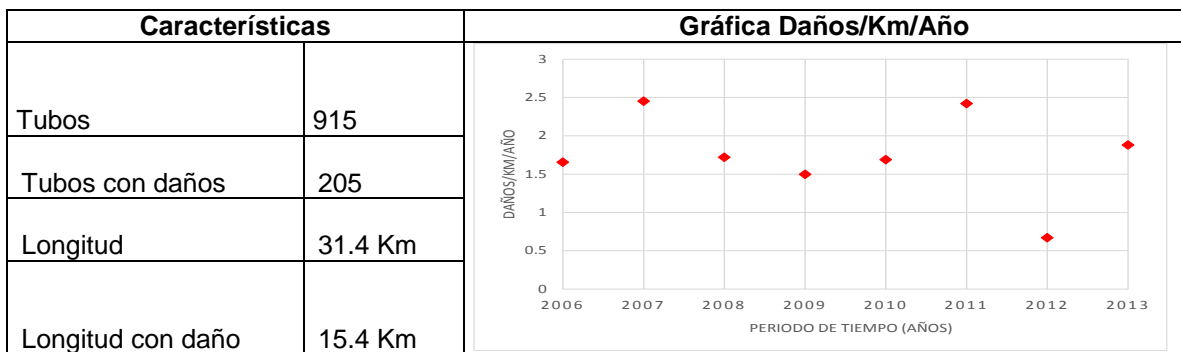
Características del Grupo 33.



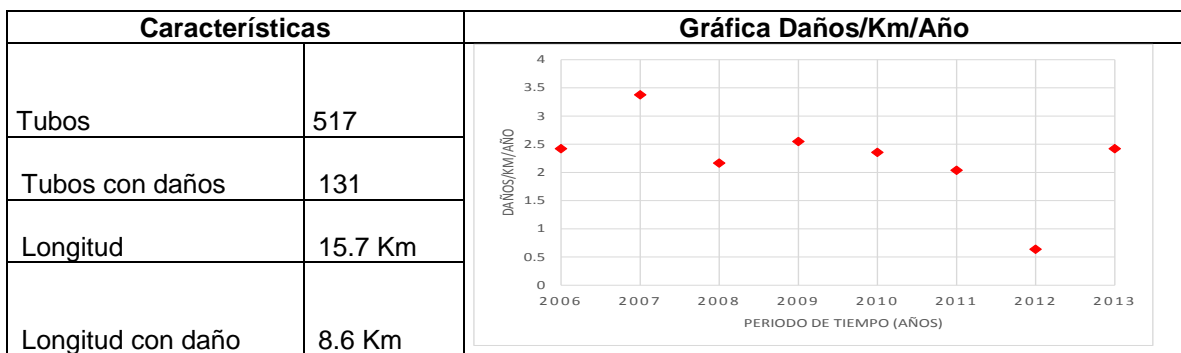
Características del Grupo 40.



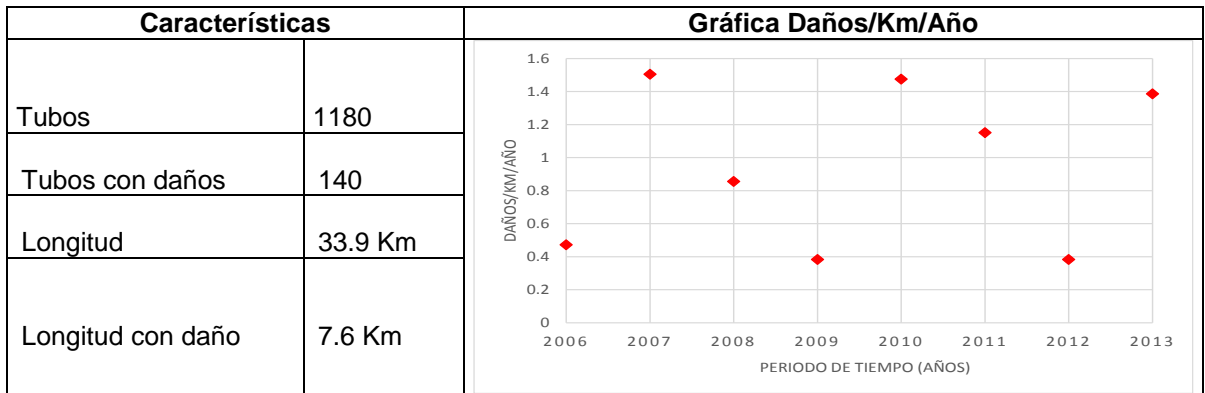
Características del Grupo 41.



Características del Grupo 42.



Características del Grupo 52.



ANEXO D. RESUMEN ANALITICO

Título del proyecto	MODELO DE GESTIÓN Y OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL DE LOS DAÑOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA
Presidente	RIAÑO M., Orlando oriano@umanizales.edu.co Ing. de Sistemas, Matemático, Profesor titular, Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”.
Tipo de documento	Trabajo de grado
Referencia documento	ANAYA E., Sergio A. Modelo de gestión y optimización operacional de los daños en redes de distribución de agua. Manizales, 2015, 162 p. Trabajo de grado (Magister en Tecnologías de la Información Geográfica). Universidad de Manizales, Facultad de Ingeniería, Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica.
Institución	Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Manizales.
Palabras claves	Daños en redes de distribución de agua potable, métodos y algoritmos de optimización, modelo de regresión lineal múltiple, mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo y predictivo, Sistemas de Información Geográfica.
Descripción	Este documento presenta la aplicación de una metodología simplificada para el desarrollo de un modelo de gestión, que permita optimizar la atención correctiva de los eventos sobre sistemas de distribución de agua potable, haciendo uso de áreas del conocimiento tales como la modelación hidráulica y los Sistemas de Información Geográfica y estableciendo como criterio principal del algoritmo para la priorización de los daños, la cantidad y costos asociados de agua que se pierden mientras el daño no es reparado, así como la cantidad y costos del agua que se deja de vender a los usuarios mientras duran los trabajos de reparación. Como complemento a este

documento se introduce un modelo de predicción de regresión lineal múltiple que sirve como herramienta operacional muy valiosa para predecir las fallas para cada tubería durante su vida.

Fuentes

ABDELWAHAB M.; ELSHAFIE A y JAAFAR O. Performance improvement for pipe breakage prediction modeling using regression method. En: International Journal of the Physical Sciences. Malasia. 6 Vol. (23 Octubre de 2011); p. 6025-6035. ISSN 1992-1950. Disponible en: <<http://www.academicjournals.org/IJPS>>

MAVIN K. Predicting the failure of individual water mains. Melbourne (Australia). 1996. Urban Water Research Association of Australia. 187p.

Metodología para la definición de plano óptimo de presiones y reducción de agua no contabilizada”. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Tomo I. 2008.

SALDARRIAGA, Juan G. CONTRERAS, Felipe S. Metodología para la determinación del plano óptimo de presiones en una red de distribución de agua potable. En: XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAÚLICA. (2002), La Habana.

SALDARRIAGA J.G, OCHOA-RODRIGUEZ S, NIÑO CA, et al., 2009, Water distribution system corrective maintenance supported by real-time use of hydraulic models, Kansas City, USA, World Environmental & Water Resources Congress 2009: Great Rivers, Pages 1-11.

SHRIDHAR YAMIJALA. Statistical Estimation of Water Distribution System Pipe Break Risk. Texas (USA), 2007. Trabajo de Grado de Maestría. Universidad de Texas A&M. [Consulta: 18/05/2015]. Disponible en el catálogo público en línea de la Biblioteca de la Universidad de Texas A&M. <<http://repository.tamu.edu.co>>

WANG, Y.; MOSELHI O.; ASCE F. y ZAYED T. Study of the suitability of existing deterioration models for water mains. 2009. En: Journal of performance of constructed facilities. [Consulta: 18/05/2015]

Contenido

El documento contiene dentro su estructura los componentes necesarios para dar respuesta a la problemática planteada, partiendo de desglosar la fundamentación teórica necesaria para el correcto entendimiento del problema, a través del marco teórico. Posteriormente se trabaja sobre los conceptos de “Fuga Abierta” y “Fuga Contenida” como pilares de la optimización operacional correctiva en la atención de los daños, a través en este documento de la aplicación de ejemplos, cuyas fuentes de información son procesadas por el segundo propósito de esta tesis, que es el desarrollo de una herramienta computacional que gestione los cierres y usuarios afectados por los daños en redes de distribución de agua, haciendo uso de las tecnologías de información geográfica y la modelación hidráulica. Por último el desarrollo de un modelo matemático determinístico que permite predecir la tasa de daños anual en cada tubería, a partir de la edad de las mismas, partiendo de la agrupación de datos y análisis de los mismos.

Metodología

Dentro del marco de este proyecto y dada las características del mismo, se realizará una investigación cuyo tipo de innovación es de desarrollo tecnológico, esto ya que dentro de los objetivos definidos se busca mejorar procesos operativos de atención de daños, mediante la aplicación de un desarrollo computacional de carácter innovador.

De igual manera también se califica como un tipo de investigación aplicada, que representa la generación de nuevo conocimiento en respuesta a un problema o necesidad identificada, como lo es la optimización operacional dentro del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.

El cuerpo de desarrollo de este proyecto se gesta a partir de tres (3) fases: la primera corresponde al desarrollo de la herramienta computacional MOVA, el segundo a la puesta en marcha de la metodología de

priorización y atención de eventos correctivos y la última al desarrollo de una metodología predictiva de la tasa de daños anual en las tuberías, a partir de regresiones lineales.

Conclusiones

La ausencia en la planificación de los cierres que deben realizarse para atender los daños, trae como desventajas el aumento en los tiempos de atención, la atención tardía de daños prioritarios y dificultades en la información y servicio al cliente.

Los modelos hidráulicos calibrados son una herramienta eficiente para la estimación de los volúmenes del agua perdida por fugas. Además, facilitan la evaluación del cumplimiento de presiones máximas y mínimas de acuerdo con la normatividad vigente. Tener información de esta naturaleza sobre las redes, contribuye a la generación y seguimiento de indicadores dentro de la empresa

Como uno de las conclusiones más importantes del presente proyecto investigativo, se encuentra el desarrollo de una herramienta informática (MOVA) capaz de establecer las válvulas que deben cerrarse para aislar un sector de cualquier red de distribución, encontrar los suscriptores afectados por el cierre y al mismo tiempo calcular tanto el caudal que se pierde por el daño como el que se deja de vender mientras duren los trabajos. Todo esto a partir de un modelo hidráulico calibrado, y el uso de las Tecnologías de la Información Geográfica, lo cual hace que este tipo de desarrollos sea único en su clase.

Para el desarrollo de los modelos predictivos-preventivos, la información con la que se cuenta no arroja resultados certeros, que permita desarrollar políticas de planeación y prevención a largo plazo.

El uso de las Tecnologías de Información Geográfica como herramienta transversal al desarrollo de los procesos operativos, en este caso en la atención correctiva/preventiva/predictiva de los daños, permite la optimización de los mismos y es una herramienta de toma de decisiones y gestión dentro de la empresa.

Anexos

Anexo A. Diccionario de datos de la base de datos del aplicativo MOVA.

Anexo B. Manual de usuario del aplicativo MOVA

Anexo C. Características de los grupos homogéneos.