



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MODELO DECISIONAL PARA LA REPOSICIÓN Y REHABILITACIÓN DE REDES DE ALCANTARILLADO DEL VALLE DE ABURRÁ.

LUZ ANGELA HERNÁNDEZ CHAVARRIAGA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia

2011

MODELO DECISIONAL PARA LA REPOSICIÓN Y REHABILITACIÓN DE REDES DE ALCANTARILLADO DEL VALLE DE ABURRÁ.

LUZ ANGELA HERNÁNDEZ CHAVARRIAGA

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Recursos Hidráulicos

Director:

Ph.D. Universidad Politécnica de Valencia. Magister en Aprovechamiento de Recursos
Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Jaime Ignacio Vélez Upegüi

Asesor:

Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia. Especialista en Gerencia de
Proyectos. Universidad Eafit. Carlos Mario Ángel Montoya

Posgrado en Aprovechamiento Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia

2011

A mi sobrino a quien siempre amaré, extrañaré y lloraré. Te amo, gracias por ser mi razón de vivir aunque fuera por tan corto tiempo.

Agradecimientos

A las Empresas Públicas de Medellín por la oportunidad y apoyo en el proyecto.

A mi familia y amigos, cuyo apoyo me impulsa a seguir adelante y continuar con mi proyecto de vida.

A mis profesores, a quienes les agradezco el conocimiento compartido durante todos los años de estudio.

RESUMEN

En la actualidad un alto porcentaje del sistema de alcantarillado en el Valle de Aburrá ha excedido su vida útil y presenta gran cantidad de daños, lo que conlleva a problemas en el mantenimiento y la operación de la red. Por lo tanto se requiere una metodología para la Gestión y priorización de las reposiciones del Alcantarillado. El modelo decisional se basa en la evaluación de criterios para un listado de variables de factores estructurales, hidráulicos y ambientales y realiza la ponderación de estos asignando pesos según la incidencia de cada variable en el funcionamiento del sistema de alcantarillado en un indicador que se denomina Índice de Reposición de Alcantarillado, calculado para cada uno de los tramos de tubería. El modelo se implementó en un Sistema de Información Geográfica y se encuentra disponible para realizar consultas actualizadas a nivel diario del Índice de reposición para los tramos del sistema. Además permite clasificar cada tramo asignando una criticidad con el fin de priorizar sectores a intervenir y definir planes de acción y de inversión a corto, mediano y largo plazo.

PALABRAS CLAVES

SISTEMAS DE ALCANTARILLADO. Alcantarillado o red de alcantarillado se denomina al sistema de estructuras y tuberías usado para el transporte de aguas residuales o servidas (alcantarillado sanitario), o aguas de lluvia, (alcantarillado pluvial) desde el lugar en que se generan hasta el sitio en que se vierten al cauce o plantas de tratamiento. Los sistemas de alcantarillado pueden ser residuales, aquellos que solo recogen aguas de este tipo, pluviales o de lluvia y los alcantarillados combinados, aquellos que recogen y transportan aguas residuales y lluvias simultáneamente.

REHABILITAR. Incluye todas aquellas actividades relacionadas con reposición, rehabilitación, cambio o reemplazo de la red.

TRAMO DE TUBERÍA: Tubería del sistema de alcantarillado comprendido entre dos estructuras como cámaras de inspección, aliviaderos o descargas.

CONEXIONES ERRADAS. Contribución adicional de caudal debido al aporte de aguas pluviales en la red de aguas sanitarias y viceversa.

COTA DE BATEA. Nivel del punto más bajo de la sección transversal interna de una tubería o colector.

COTA DE CLAVE. Nivel del punto más alto de la sección transversal externa de una tubería o colector.

MANHOLE O CÁMARA DE INSPECCIÓN. Estructura de ladrillo o concreto, de forma usualmente cilíndrica, que remata generalmente en su parte superior en forma tronco-cónica, y con tapa removible para permitir la ventilación, el acceso y el mantenimiento de los colectores.

ABSTRACT

Currently a high percentage of the sewer system has exceeded its service life and presents a great amount of damage, leading to problems in the maintenance and operation of the network, that is why it requires a methodology for the management and prioritization of sewer replacements. The decisional model is based on evaluation criteria for a listing of variables of structural, hydraulic, environmental and performs the weighting of these by assigning weights according to the incidence of each variable in the operation of the sewerage system in an indicator called index sewer replacement, calculated for each of the sections of pipe. The model was implemented in a geographic information system and is available for consultations on a daily updated replacement rate for sections of network database of the company. Classify each segment also allows assigning a criticality to priority sectors to intervene and define action plans and investment in the short, medium and long term.

KEYWORDS

SEWER SYSTEM: sewer or sewer system is known structures and pipelines used to transport wastewater or sewage (sanitary sewer) or rainwater (storm sewer) from the place where it is generated to the site where tipping the channel or treatment plants. Sewer systems can be residual, those who only collect such water, or rain storm and combined sewer, those who collect and transport wastewater and rainfall simultaneously.

REHABILITATION: includes all activities associated with replacement, rehabilitation, change or replacement of the network.

SECTION OF PIPE: pipe sewer system between two structures such as manholes, overflows or discharges.

BOTTOM ELEVATION: lowest level of internal cross-section of a pipe or manifold.

TOP ELEVATION: peak level of the external cross section of a pipe or manifold.

MANHOLE: brick or concrete structure, usually cylindrical form, which usually finishes at the top in a truncated cone, with removable lid to allow ventilation, access and maintenance of the collectors.

CONTENIDO

| | <i>Página</i> |
|---|---------------|
| INTRODUCCIÓN _____ | 1-7 |
| 1. DEFINICIONES _____ | 1-9 |
| 2. ESTADO DEL ARTE _____ | 2-12 |
| 3. JUSTIFICACIÓN _____ | 3-16 |
| 4. OBJETIVOS _____ | 4-18 |
| 5. METODOLOGÍA _____ | 5-19 |
| 5.1 GENERALIDADES _____ | 5-19 |
| 5.2 FUENTES DE INFORMACIÓN _____ | 5-26 |
| 5.3 SELECCIÓN DE VARIABLES _____ | 5-27 |
| 5.4 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN _____ | 5-30 |
| 5.5 CRITERIOS E INDICADORES _____ | 5-35 |
| 6. ÍNDICE DE REPOSICIÓN DE LA RED DE ALCANTARILLADO _____ | 6-45 |
| 6.1 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN EN EL SIG _____ | 6-45 |
| 6.2 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN SEWERGEMS _____ | 6-50 |
| 6.3 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REPOSICIÓN _____ | 6-56 |
| 7. CASO DE APLICACION _____ | 7-59 |
| 8. CONCLUSIONES _____ | 8-74 |
| 9. RECOMENDACIONES _____ | 9-76 |
| 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____ | 10-77 |
| 11. ANEXOS _____ | 11-79 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-------------------|---|------|
| Figura 1. | Red bayesiana para definir la necesidad de inspección | 2-15 |
| Figura 2. | Cuencas sanitarias del sistema | 5-20 |
| Figura 3. | Diámetro de las tuberías del sistema | 5-21 |
| Figura 4. | Material de las tuberías del sistema..... | 5-21 |
| Figura 5. | Edad de las tuberías del sistema | 5-22 |
| Figura 6. | Implementación del modelo de manejo de la infraestructura | 5-25 |
| Figura 7. | Metodología para el modelo decisional para la rehabilitación de redes de alcantarillado | 5-26 |
| Figura 8. | Ubicación de la falla (tomado de epm, 2010)..... | 5-39 |
| Figura 9. | Grado de calificación para el tramo (tomado de epm, 2010) | 5-40 |
| Figura 10. | Asignación de la edad según el proyecto | 6-46 |
| Figura 11. | Asignación de la edad según fecha de la acometida | 6-46 |
| Figura 12. | Profundidad de entrada y salida de la tubería | 6-47 |
| Figura 13. | Ubicación de daños y obstrucciones cuenca Santa Helena | 6-48 |
| Figura 14. | Información disponible en la base de datos SIGMA | 6-49 |
| Figura 15. | Algoritmo para modelar redes de alcantarillado..... | 6-51 |
| Figura 16. | Ejemplo de model builder en SewerGems | 6-52 |
| Figura 17. | Asignación de caudal residual | 6-53 |
| Figura 18. | Curva patrón de entrega caudal residual | 6-53 |
| Figura 19. | Ubicación de las estaciones Pluviométricas | 6-54 |
| Figura 20. | Lluvias para modelar en SewerGems | 6-55 |

| | | |
|-------------------|---|------|
| Figura 21. | Aliviaderos típicos en el Valle de Aburrá..... | 6-56 |
| Figura 22. | Gráfica del sector y la cuenca sanitaria Santa Helena..... | 7-60 |
| Figura 23. | Categoría de los usuarios | 7-61 |
| Figura 24. | Estratificación de los usuarios residenciales..... | 7-61 |
| Figura 25. | Diámetro de las redes del sector | 7-62 |
| Figura 26. | Material de las redes del sector | 7-62 |
| Figura 27. | Edad de las tuberías del sector..... | 7-63 |
| Figura 28. | Daños y obstrucciones..... | 7-63 |
| Figura 29. | Tuberías inspeccionadas empleando Circuito Cerrado de Televisión .. | 7-64 |
| Figura 30. | Capas de elementos modelados del sector cuenca Santa Helena | 7-65 |
| Figura 31. | Usuarios del sector cuenca Santa Helena | 7-67 |
| Figura 32. | Curva patrón para caudales de agua residual del sector cuenca Santa Helena..... | 7-67 |
| Figura 33. | Ubicación de los sensores de nivel de la cuenca..... | 7-67 |
| Figura 34. | Caudal pico de lluvia del Método Racional | 7-68 |
| Figura 35. | IDF estación Villa Hermosa para TR 10 años..... | 7-69 |
| Figura 36. | Resultados de la modelación en SewerGems | 7-70 |
| Figura 37. | Resultados Índice de reposición sector cuenca Santa Helena | 7-71 |
| Figura 38. | Clasificación de los tramos según criticidad del Índice de Reposición.. | 7-72 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|------------------|--|------|
| Tabla 1. | Parámetros planteados por Stein (www.stein.de/awards_en.php , 2008) | 5-24 |
| Tabla 2. | Parámetros planteados por Burkhard et al (2006) | 5-24 |
| Tabla 3. | Variables estructurales | 5-29 |
| Tabla 4. | Variables hidráulicas | 5-29 |
| Tabla 5. | Variables ambientales | 5-30 |
| Tabla 6. | Fuentes de información de las variables | 5-31 |
| Tabla 7. | Grado de calificación del tramo según CCTV | 5-40 |
| Tabla 8. | Relación de los elementos de SIGMA con SewerGems | 6-52 |
| Tabla 9. | Peso de los indicadores | 6-57 |
| Tabla 10. | Criticidad del tramo según Índice de Reposición | 6-57 |
| Tabla 11. | Clasificación de las redes según tipo de red | 7-62 |
| Tabla 12. | Clasificación de las redes según tipo de agua | 7-62 |
| Tabla 13. | Clasificación de los tramos inspeccionados con CCTV sector cuenca Santa Helena | 7-64 |
| Tabla 14. | Resultados parámetros hidráulicos de las redes del sector Santa Helena | 7-70 |
| Tabla 15. | Criticidad Índice De Reposición | 7-71 |
| Tabla 16. | Comparación de resultados Índice de Reposición | 7-71 |
| Tabla 17. | Presupuesto inicial para proyecto de reposición | 7-73 |

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, un alto porcentaje de las redes de alcantarillado en la ciudad han excedido la vida útil, conllevando a problemas en el mantenimiento y la operación de las mismas, tales como: caudales mayores a los de diseño, cargas superiores, deterioro acelerado de la tubería, daños en la red. Asociado a lo anterior se presentan sobrecostos e inconvenientes, no solo en la tubería sino también sociales y ambientales, tales como daños a la estructura del pavimento, afectación a viviendas y comercio, afectación en la prestación de los servicios e incumplimiento de las normas y resoluciones tanto legales como ambientales.

Buscando la mejora de estos procesos y actividades realizadas para el mantenimiento y operación de las redes de alcantarillado surge la necesidad para las empresas prestadoras de este servicio, de contar con las herramientas de gestión que permitan prestar un adecuado servicio y satisfacer la necesidad de los clientes actuando con una conciencia socio ambiental. Partiendo de estas problemáticas se propone realizar una metodología de cara a la gestión del alcantarillado, que permita identificar y clasificar la criticidad del sistema de alcantarillado para la asignación y priorización de las inversiones y los recursos, de manera que a corto plazo sean intervenidos aquellos sectores que más lo requieran y, a mediano y largo plazo se definan planes y proyectos para la intervención de todo el sistema.

La metodología para la gestión del alcantarillado o modelo decisional para la reposición y rehabilitación de redes de alcantarillado se fundamentó en el conocimiento de las variables que más afectan el sistema y formular indicadores para la evaluación de cada tramo de tubería. El modelo se basará en el cálculo de un índice de reposición de tubería, el cual se agrupa por rangos de criticidad para identificar espacialmente aquellas zonas con pronta necesidad de intervención y definir los pasos a seguir para la rehabilitación de la tubería de alcantarillado.

Para la realización de este trabajo se tomó como referencia la información disponible en la base de datos de Empresas Públicas de Medellín, tanto para la determinación de los criterios del índice de reposición como para realizar un caso de aplicación de la metodología.

El resultado de este modelo será entonces un sistema de ayuda para la toma de decisiones, aplicable a las condiciones del entorno y, que permita a los administradores y operadores de las redes de alcantarillado establecer estrategias y planes de mantenimiento de sus infraestructuras enfocando los recursos a aquellos sectores que más lo requieran, en el momento adecuado y antes de que ocurra un daño importante.

1. DEFINICIONES

ACOMETIDA. Tubería que transporta las aguas residuales y/o las aguas lluvias desde la caja domiciliar hasta un colector secundario. Generalmente son de 150 mm de diámetro para vivienda unifamiliar.

ALCANTARILLADO DE AGUAS COMBINADAS. Sistema compuesto por todas las instalaciones destinadas a la recolección y transporte, de aguas residuales y de aguas lluvias conjuntamente.

ALCANTARILLADO DE AGUAS LLUVIAS. Sistema compuesto por todas las instalaciones destinadas a la recolección y transporte de aguas lluvias (provenientes de la precipitación).

ALCANTARILLADO DE AGUAS RESIDUALES. Sistema compuesto por todas las instalaciones destinadas a la recolección y transporte de las aguas residuales domésticas y/o industriales.

ALCANTARILLADO SEPARADO. Sistema constituido por un alcantarillado de aguas residuales y, otro de aguas lluvias que recolectan en forma independiente en un mismo sector.

ALIVIADERO. Estructura diseñada en colectores de alcantarillado combinado, con el propósito de separar los caudales que exceden la capacidad del sistema y conducirlos a un sistema de drenaje de agua lluvia.

ÁREA TRIBUTARIA. Superficie que drena hacia un tramo o punto determinado.

COLECTOR. Conducto cerrado circular, semicircular, rectangular, entre otros, sin conexiones domiciliarias directas que recibe los caudales de los tramos secundarios, siguiendo líneas directas de evacuación de un determinado sector.

CCTV. Circuito Cerrado de Televisión empleado para la inspección de las redes de alcantarillado.

CONEXIONES ERRADAS. Contribución adicional de caudal debido al aporte de aguas pluviales en la red de aguas sanitarias y viceversa.

COTA DE BATEA. Nivel del punto más bajo de la sección transversal interna de una tubería o colector.

COTA DE CLAVE. Nivel del punto más alto de la sección transversal externa de una tubería o colector.

GESTA: Base de datos que contiene la información histórica de los trabajos realizados para la operación y mantenimiento de las redes de distribución secundaria de acueducto y la recolección y transporte de las redes de alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín.

IPID: Identificador único de cada uno de los elementos del sistema en la base de datos SIGMA.

MANHOLE O CÁMARA DE INSPECCIÓN. Estructura de ladrillo o concreto, de forma usualmente cilíndrica, que remata generalmente en su parte superior en forma tronco-cónica, y con tapa removible que permite la ventilación, el acceso y el mantenimiento de los colectores.

REHABILITACIÓN. Incluye todas aquellas actividades relacionadas con reposición, rehabilitación, cambio o reemplazo de la red.

SISTEMAS DE ALCANTARILLADO. Red de alcantarillado es un sistema de estructuras y tuberías usado para el transporte de aguas residuales o servidas (alcantarillado sanitario), o aguas de lluvia, (alcantarillado pluvial) desde el lugar en que se generan hasta el sitio en que se vierten al cauce o plantas de tratamiento. Los sistemas de alcantarillado pueden ser residuales, aquellos que solo recogen aguas de este tipo, pluviales o de lluvia y los alcantarillados combinados, aquellos que recogen y transportan aguas residuales y lluvias simultáneamente.

SIGMA: Base de datos del sistema de acueducto y alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín.

TRAMO. Red de alcantarillado comprendida entre dos cámaras de inspección o entre una cámara y una descarga o aliviadero.

TUBO Ó TUBERÍA. Conducto prefabricado, o construido en sitio, de concreto, concreto reforzado, plástico, polietileno, asbesto-cemento, otro material cuya tecnología y proceso de fabricación cumplan con las normas técnicas correspondientes. Por lo general su sección es circular.

2. ESTADO DEL ARTE

Para establecer la metodología de reposición y rehabilitación de redes, de uso propio de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P., se consultaron varias fuentes de información, entre ellas: artículos, páginas web, investigaciones y cursos con la participación de expertos internacionales en el tema.

Desde los años 70, en Inglaterra y asociado al notable deterioro de las redes que presentaba hundimientos y colapsos, surgió la necesidad de inspeccionar las redes de alcantarillado para mejorar y aumentar la vida útil de la red. Desde entonces se han empleado diferentes métodos de inspección como los son: inspección visual con linternas, videocámaras, sistemas con circuito cerrado de televisión (CCTV), sonar y sistema láser, todos ellos empleados con el fin de conocer el estado de la red (EPM, 2010).

Durante los últimos años se han desarrollado metodologías relacionadas con el uso de los resultados de la inspección con CCTV para el diagnóstico y mantenimiento de la misma, principalmente de tipo preventivo y a partir de los resultados, planear la rehabilitación de la red.

Existen varias metodologías conocidas y empleadas en el mundo para la clasificación del estado de la red, en función de los resultados de CCTV, entre las cuales se pueden mencionar: la Norma EN 13508 de origen Europeo, que tiene como objeto establecer las condiciones del alcantarillado, mediante la inspección, codificación del estado y consideración de factores externos. La PACP de Estados Unidos realizada por la NASSCO (Organización Nacional del Comercio para la Industria de la Rehabilitación) clasifica los daños en la red bajo cuatro categorías que son estructurales, operacionales, constructivos y otros, similar a la presentada por el Water Research Center en Inglaterra en 1978. A nivel Nacional se han desarrollado metodologías diseñadas con base a las normas anteriores como lo son la NS – 058 de la *Empresa de*

Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y la Metodología para el diagnóstico y evaluación de las redes de alcantarillado con CCTV de las *Empresas Públicas* de Medellín.

Actualmente existen metodologías propuestas para la rehabilitación de redes de alcantarillado, todas ellas parten del hecho de que se tiene inspeccionado un alto porcentaje del sistema, y emplean dichos resultados como insumo para evaluar el estado de la red de alcantarillado y luego priorizar el mantenimiento según la gravedad del daño estructural de la tubería (Trujillo, 2008); estas metodologías han sido empleadas en Alemania, Estados Unidos, España, Inglaterra y Holanda. La mayoría de ellas se basan en el análisis de los tipos de defectos que pueden presentarse en las tuberías y definir la necesidad de rehabilitación para cada uno de ellos, considerando como más graves aquellas puntuales que afectan el estado estructural de la tubería (p.e una fractura) y menos graves aquellas que afectan solo la operación (p.e presencia de raíces). Con base a criterios previamente definidos para cada uno de los tipos de defectos y combinado con diferentes alternativas de solución, se plantean estrategias para las nuevas inspecciones.

Las metodologías desarrolladas recomiendan conocer la forma en que envejece la red de alcantarillado de un sector o la totalidad del sistema. Para ello, se requiere hacer varias inspecciones con CCTV, con frecuencia de años entre una y otra, con el objeto de modelar matemáticamente el deterioro. La forma más sencilla de modelar matemáticamente el deterioro estructural es mediante inspecciones repetidas sobre un mismo elemento. Con ayuda del modelo de envejecimiento de la red y el estado actual, se puede realizar una proyección de la probabilidad de estado de conservación de la red en el medio y largo plazo. Estos modelos se desarrollan, mejoran y calibran con datos reales de la red relacionados con aspectos estructurales, ambientales e hidráulicos, con el fin de permitir la proyección del año en que es probable que el tramo de alcantarillado entre en una condición crítica. A partir de ello, se pueden definir periodicidades de inspección o programar la reposición y rehabilitación (Trujillo, 2008).

A pesar del gran impacto que generan los problemas de hundimientos y colapsos de las redes de alcantarillado en la sociedad y considerando que la mejor alternativa sería

contar con la inspección de todas las redes, las empresas prestadoras de servicios públicos en Colombia cuentan con recursos limitados para realizar la inspección de todas las redes y aplicar estas metodologías. Para el caso del Valle de Aburrá con los rendimientos actuales de las empresas de inspección con CCTV se tardarían aproximadamente 10 años en realizar la inspección completa de todo el sistema; en la ciudad de Bogotá apenas en el año 2010 iniciaron labores para inspeccionar todas sus redes con contratos que tardarán varios años.

Como se ha mencionado las metodologías que se fundamentan en las inspecciones con CCTV, permiten evaluar el estado de la red y determinar la necesidad de rehabilitación, sin embargo asociada a la falta de información de inspecciones de la red y la carencia de una metodología aplicable a nuestra disponibilidad y manejo de información surge la necesidad de plantear metodologías propias que partan de la información existente y definir sectores con alta criticidad que requieran una pronta inspección o rehabilitación, y de esta manera enfocar los recursos hacia las zonas que más lo requieran (Posada, 2008).

La definición de las zonas críticas debe realizarse con base a la información existente, conociendo primero las variables de la red y encontrar relaciones entre el comportamiento de la red y estas variables, para luego definir criterios de falla a partir del comportamiento de la red, al igual que sus consecuencias. Encontrar la relación entre la red y sus variables puede ser una tarea difícil, debido a la gran cantidad de variables (p.e edad, material, diámetro, profundidad, longitud, entre otras), a su distribución espacial y temporal.

Los métodos empleados mundialmente para definir sectores críticos, emplean cientos de variables, para lo cual es necesaria una base de datos muy completa de la información, incluyendo variables que aun en países en vía de desarrollo no se tienen para toda la red, razón por la cual se consideran estos métodos poco útiles en nuestro país (Posada, 2008). Algunos de los métodos empleados en Colombia simplifican el problema, suponiendo una relación lineal entre las variables y sin tener en cuenta la

naturaleza del mecanismo de falla ni sus consecuencias (Castrellón 2004, Grucon-IEH-Soprin 1999).

En el año 2008 se planteó para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá una metodología basada en la utilización de redes Bayesianas y las curvas de envejecimiento de Herz, para definir la necesidad de un tramo de red de ser inspeccionado, sin embargo toma como base la información de algunas inspecciones realizadas en la empresa en períodos anteriores (Posada, 2008).

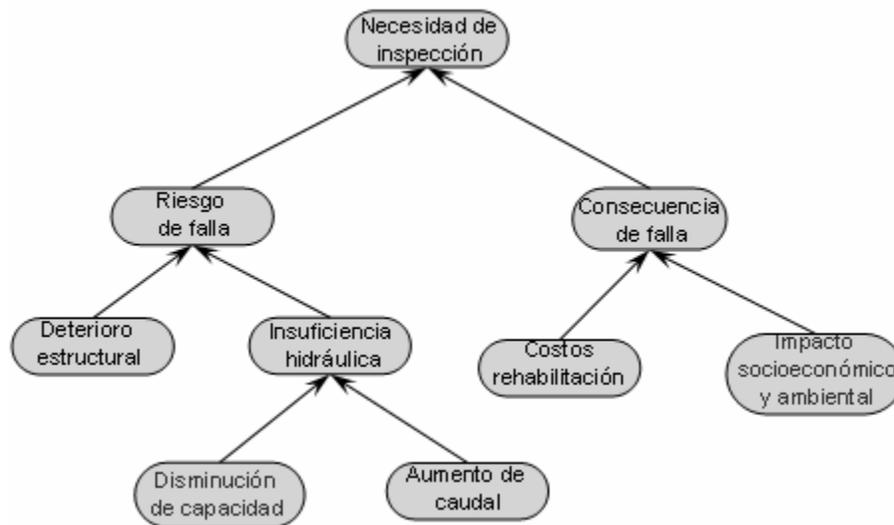


Figura 1. Red bayesiana para definir la necesidad de inspección

Ninguna de las metodologías antes mencionadas se considera aplicable en el caso del Valle de Aburrá, dado que se tienen muy pocos tramos inspeccionados y la necesidad de rehabilitación de algunas zonas es muy notable, no obstante lo anterior, es importante anotar que Las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. deberán implementar políticas conducentes a que estas actividades de inspección de todo el sistema se planeen y se realicen en el mediano plazo. Paralelamente se optó por un método indirecto, que identifique mediante el uso de las variables de la red, los tramos que requieren ser prioritarios para rehabilitar.

3. JUSTIFICACIÓN

Las redes de alcantarillado sufren problemas de colapsos, falta de capacidad hidráulica y degradación que tienen por consecuencia daños estructurales, contaminación de las corrientes receptoras, inundaciones, impactos en la circulación vehicular por obras y quejas de los ciudadanos.

Las causas principales de estos problemas son un efecto combinado de factores como:

- El envejecimiento de las infraestructuras.
- La utilización inadecuada de la red por parte de los usuarios al verter materiales que pueden deteriorar la calidad de los materiales de la tubería.
- El sometimiento a caudales mayores a los de diseño que ocasionan esfuerzos de presión que disminuyen su capacidad estructural, y altas velocidades de flujo que producen corrosión del material de las tuberías.
- Procesos constructivos no adecuados.
- Los materiales de baja calidad.
- Carga alta sobre la tubería.
- El suelo de fundación.
- La estanqueidad de las juntas.
- Otros aspectos externos e internos a ellas.

El objetivo general del documento es presentar una metodología o modelo para la toma de decisiones respecto a la rehabilitación de redes aplicable a nuestro medio, con el fin de mejorar la funcionalidad estructural, hidráulica y ambiental de los sistemas de alcantarillado.

Dado que la red de alcantarillado es una infraestructura altamente costosa, se ha de asegurar que únicamente se repone y rehabilita lo que es necesario, en el momento

adecuado, minimizando no solo los costos directos, sino también los costos socio-ambientales. De otra manera, las inversiones no se emplearían adecuadamente y los niveles de servicio se reducirían en el futuro.

La implantación de la metodología propuesta permitirá a los administradores de la operación y del mantenimiento resolver las siguientes preguntas:

- ¿Por qué se ha de rehabilitar la red de alcantarillado? ¿Cuál es el nivel de servicio que estoy ofreciendo? ¿Es adecuado? ¿Qué consecuencias tendré si sigo actuando como hasta ahora?
- ¿Dónde se encuentran los tramos de red dañados? ¿En qué orden de prioridad debería reponerlos o rehabilitarlos? ¿Hay alguno con la estabilidad comprometida sobre el que debería actuar urgentemente?
- ¿En qué momento debo realizar la reposición o la rehabilitación, para actuar con apropiada antelación antes de que la falla ocurra, sin invertir antes ni desde luego después? ¿A qué ritmo está envejeciendo la red?

4. OBJETIVOS

GENERAL

Plantear una metodología para la toma de decisiones respecto a la reposición y rehabilitación de redes aplicable a nuestro medio, con el fin de mejorar la funcionalidad estructural, hidráulica y ambiental de los sistemas de alcantarillado, basados en la información de las redes de las Empresas Públicas de Medellín.

ESPECÍFICOS

- Definir los parámetros hidráulicos, estructurales y ambientales que caracterizan el funcionamiento del sistema de alcantarillado.
- Establecer rangos de evaluación de los parámetros que permitan identificar el estado del funcionamiento de cada uno de los tramos.
- Plantear un indicador a partir de la evaluación de los diferentes parámetros que identifique la necesidad de reponer el tramo de red (Índice de Reposición).
- Aplicar modelos para establecer parámetros estructurales como la edad de la tubería y por parámetros hidráulicos como la capacidad de la red.
- Realizar un caso de aplicación de la metodología para definir los indicadores en cada tramo, establecer las cantidades a reponer, y desarrollar un plan de reposición.

5. METODOLOGÍA

5.1 GENERALIDADES

El sistema de alcantarillado de las Empresas Pública de Medellín está conformado por todas las tuberías y estructuras que se localizan en las redes de alcantarillado de aguas residuales, aguas lluvias, aguas combinadas y en los sistemas de tratamiento del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Dentro del concepto de integralidad, la función del sistema es recolectar el agua a través de redes secundarias (combinadas, residuales y lluvias), transportarla por colectores e interceptores, para ser conducida finalmente a las respectivas Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. La infraestructura de la red secundaria de alcantarillado en el año 2011, tuvo una longitud de 4000 km, los colectores una longitud 322 km y el interceptor una longitud de 34 km. De la información anterior se separan en los siguientes porcentajes según la clasificación de tipo de alcantarillado: 37.6% de aguas combinadas, 27.1% de aguas lluvias y 35.3% de aguas residuales.

Actualmente, el sistema de alcantarillado cuenta con 60 Cuencas Sanitarias, cuya distribución y división se basa en los flujos de la red de drenaje hacia quebradas y colectores, estas cuencas son completamente diferentes a las hidrográficas, aunque siempre están ubicadas a los costados de las quebradas (Ver Figura 2). Dentro de cada cuenca sanitaria puede hablarse de subdivisiones o Unidades de Gestión Ambiental (UGA), que corresponden a subáreas de redes que tributan a una misma descarga o entrega al colector. La idea de manejar estas UGAs es mantener el control de las entradas y salidas a la red, como lo son las viviendas, empresas, descargas, aliviaderos, entre otros.

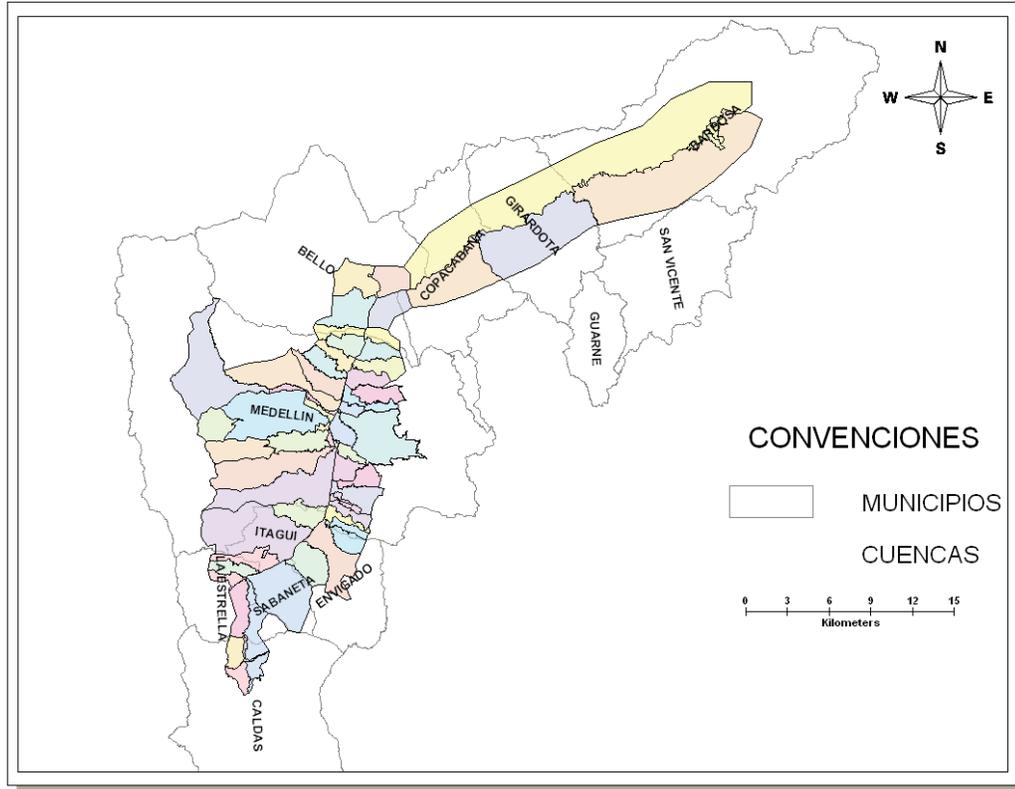


Figura 2. Cuencas sanitarias del sistema

La base de datos SIGMA contiene varios atributos para cada uno de los tramos de la red: Diámetro, Material, Fabricante, Tipo de cimentación, Tipo de red, Profundidad de entrada, Profundidad de salida, Longitud, Tipo de alcantarillado, Fecha de instalación. Aunque la base de datos cuenta con estos atributos, muchos de ellos no se encuentran completos y como se explica en el capítulo de Procesamiento de la Información, algunos de ellos fueron calculados a partir de métodos de sobreposición y proximidad. La distribución de diámetros, materiales y edades del sistema se presenta en la Figura 3, Figura 4 y Figura 5.

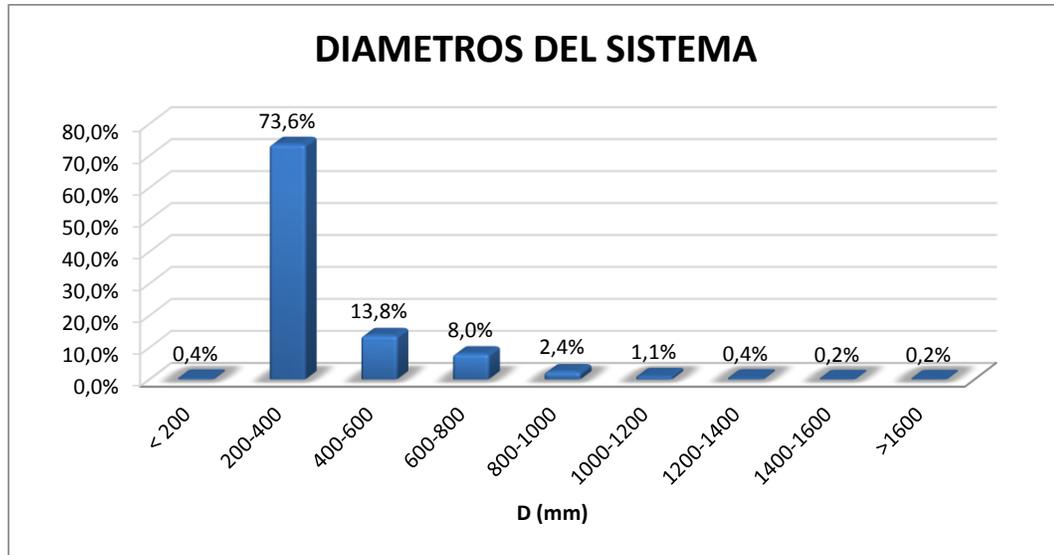


Figura 3. Diámetro de las tuberías del sistema



Figura 4. Material de las tuberías del sistema

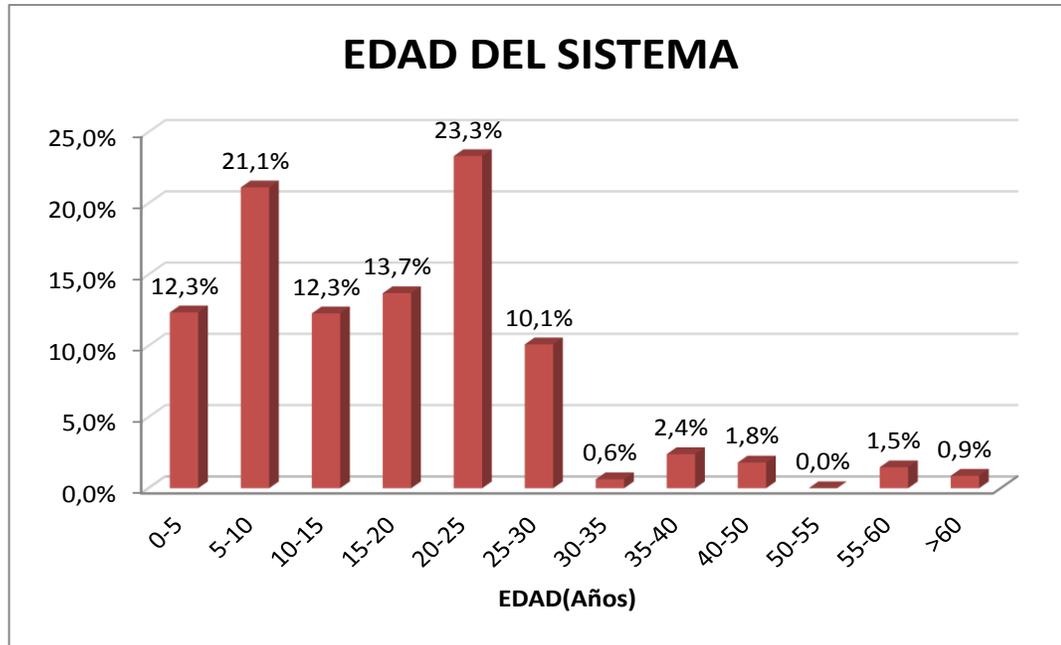


Figura 5. Edad de las tuberías del sistema

Algunas de las cuencas del sistema, principalmente las rurales y ubicadas en zonas más pendientes, presentan problemas de sedimentación y conexiones erradas provenientes de canteras y ladrilleras; algunas quebradas en ocasiones entran a la red presentando problemas de insuficiencia hidráulica, mientras que las cuencas más centrales presentan problemas de obstrucciones e inundaciones en época de lluvia. El agua lluvia en la ciudad es llevada hasta la red en lugar de llevarse a las quebradas cercanas, lo que conlleva también a problemas de incapacidad hidráulica, principalmente en las zonas más planas y próximas al río Medellín.

Los daños presentados en la red originaban demandas, acciones de tutela y reclamaciones, con consecuencias como: demoras en la atención al cliente, soluciones parciales no integrales, deterioro de la Imagen institucional, baja capacidad de reacción e incumplimiento en los objetivos del Sistema de Gestión de la Calidad del proceso Recolección y Transporte Aguas Residuales, hacen que a corto plazo se agudice el problema en el sistema incrementando la necesidad de reposición de redes.

Asociado a lo anterior, se hizo necesario plantear una metodología basada en los datos existentes de la red, su funcionamiento y de los datos históricos de mantenimiento; ello con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta principal para la obtención de la información, cuyo uso para la planeación de las actividades con el fin de determinar las inversiones en reposición de redes cobra vital importancia, pues estas herramientas son empleadas a nivel mundial y facilitan la interacción de diferentes bases de datos para el logro del objetivo.

Para la obtención de un Modelo para la Rehabilitación de tuberías de Alcantarillado, se plantearon las siguientes bases como inicio aplicable a EPM asociado a la base de datos y a las herramientas empleadas.

- Construcción de una lista de indicadores
- Evaluación del estado estructural de las redes
- Evaluación de la capacidad hidráulica del sistema
- Criterios para la evaluación de los indicadores
- Construcción de un Índice de Reposición

Se realizó una lista de indicadores para cuantificar el estado estructural, hidráulico y ambiental de cada tramo de la red. Estas categorías han sido definidas con base a estudios realizados en otros países como Alemania y España, donde elaboraron metodologías similares (Ver Tabla 1 y Tabla 2).

Tabla 1. Parámetros planteados por Stein (www.stein.de/awards_en.php, 2008)

| | |
|-------------|----------------------|
| Ambiental | Obstrucciones |
| | Daños |
| Estructural | Material |
| | Diámetro |
| | Espesor |
| | Nivel Freático |
| | Suelo |
| | Cargas |
| Hidráulico | Capacidad Hidráulica |
| | Sedimentación |

Tabla 2. Parámetros planteados por Burkhard et al (2006)

| | |
|--------------|--|
| Constructivo | Tipo de construcción |
| | Daños |
| | Nivel Freático |
| | Tipo de agua transportada |
| | Edad |
| | Material |
| | Inspección con Cámara TV |
| | Coordinación con otros servicios |
| | Características especiales de construcción |
| Hidráulico | Cálculo hidrodinámico |
| | Inundaciones |
| Especial | Características del suelo |
| | Tuberías sumergidas en NF |

Para la formulación de los indicadores y la estructuración del Modelo para la Rehabilitación de Redes de Alcantarillado, se tomaron como base los planteamientos formulados en un modelo para el manejo de la infraestructura de las redes de

alcantarillado de la Asociación Nacional de Agencias para el Agua Limpia NACWA (2007) que contempla los siguientes pasos:

1. Emplear la información existente
2. Evaluar las consecuencias y probabilidades de riesgo
3. Identificar fallas y priorizar necesidades
4. Refinar la planeación y las actividades de mantenimiento

Partiendo de los pasos anteriores la NACWA plantea el siguiente esquema de implementación para el manejo de la infraestructura:

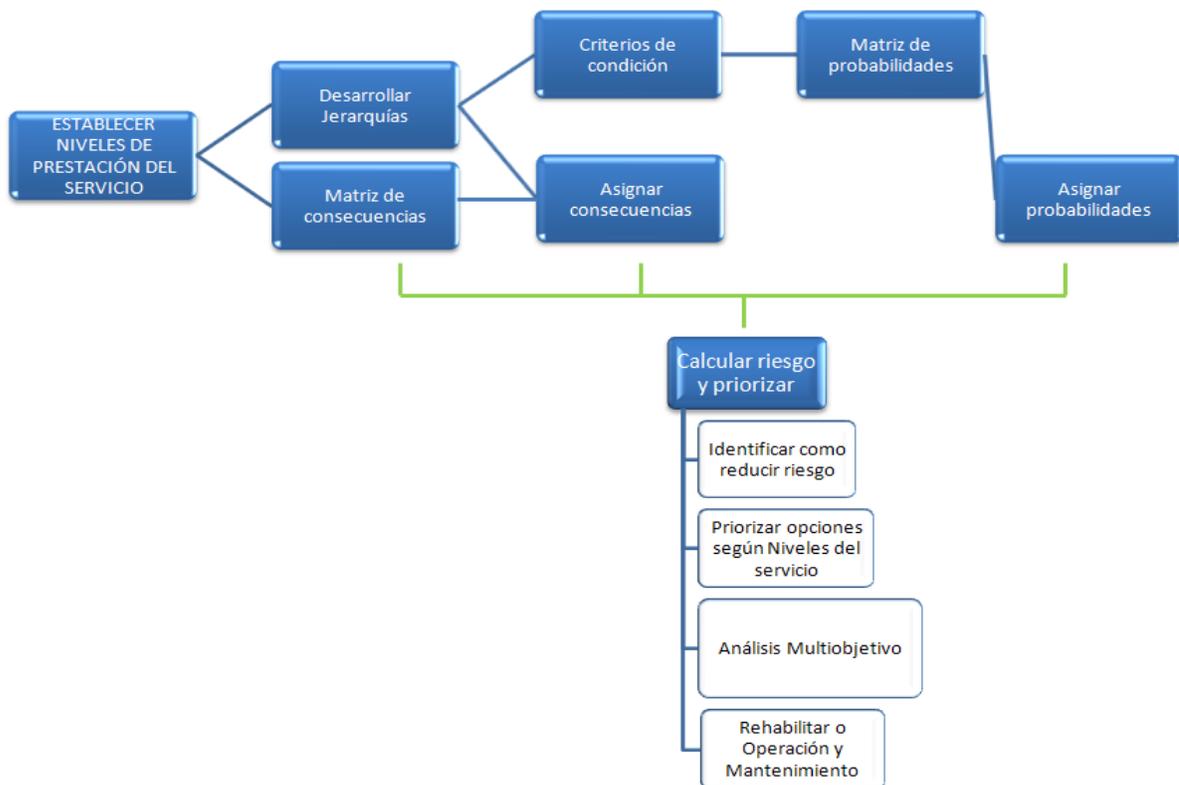


Figura 6. Implementación del modelo de manejo de la infraestructura

Siguiendo el esquema de la Figura 6, se planteó una metodología para la estructuración e implementación del modelo decisional, el cual se muestra en la Figura 7.

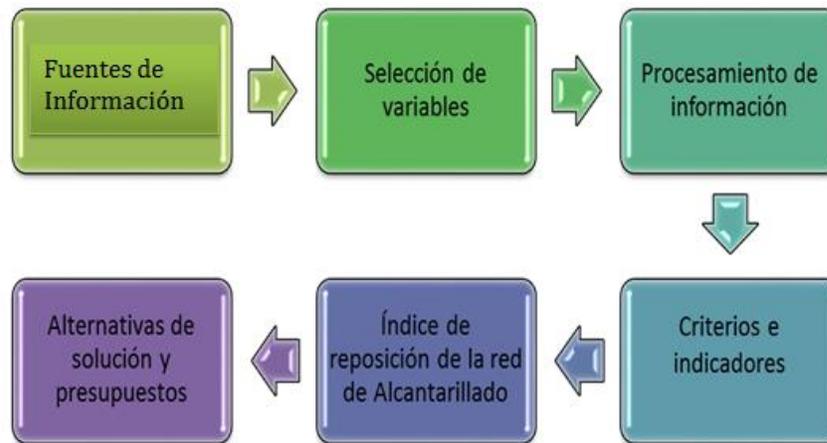


Figura 7. Metodología para el modelo decisional para la rehabilitación de redes de alcantarillado

La descripción de cada uno de los pasos de la Figura 7 se realizó en los capítulos posteriores, mostrando fuentes de información, procedimientos realizados y resultados obtenidos.

5.2 FUENTES DE INFORMACIÓN

La principal fuente de información de las redes fue el modelo de red o base de datos SIGMA, facilitada directamente por las Empresas Públicas de Medellín. La base de datos cuenta con información de las redes de acueducto y alcantarillado, de tipos lineal, punto y polígono, entre los elementos lineales se encuentran tuberías, coberturas y quebradas, entre los elementos tipo punto se encuentran manholes o cámaras de inspección, descargas, aliviaderos, entre otros; y de tipo polígono se encuentran las manzanas, lagos o lagunas, entre otros. Para cada uno de los elementos se almacenan varios atributos, en especial para éste trabajo fueron empleados: Diámetro, material, fecha de instalación, longitud, número de acometidas.

Para obtener información de la ubicación y Número de Acometidas, se empleó la base de datos de facturación donde se tiene almacenada la información del registro único de cada usuario, la dirección y la fecha en la cual se construyó la acometida, además la categoría o uso del servicio y el estrato.

Otra base de datos empleada se denomina GESTA, la cual contiene la información de los trabajos realizados diariamente, esta información proviene de las órdenes de trabajo mediante las cuales se atienden las solicitudes internas y del cliente que administra el sistema FÉNIX, en el cual se clasifican por elementos afectados, ítems de contrato, suministros, recurso humano y por tipos de actividad ejecutadas. De esta base de datos se consultaron principalmente las órdenes de trabajo de los daños, hundimientos y obstrucciones en la red, de los cuales se tienen registros históricos desde el año 2003.

Actualmente se está almacenando la información de la calificación de los tramos inspeccionados con CCTV, como resultado de aplicar la *“Metodología para el diagnóstico y evaluación de las redes de alcantarillado con CCTV de las Empresas Públicas de Medellín (EPM, 2010)”*. A la fecha se ha inspeccionado el 10% del total del sistema, y aunque es poco estos resultados se emplearon para el modelo de reposición de alcantarillado.

La información de capacidad hidráulica de la red no se tiene almacenada ni modelada, por lo cual fue necesario implementar un modelo de simulación de redes de alcantarillado, para el caso de EPM, es el software SEWERGEMS.

5.3 SELECCIÓN DE VARIABLES

Para el modelo de reposición, se definió como escala espacial de trabajo el **tramo de red**, ya que la base de datos SIGMA almacena los atributos de la tubería a este nivel y las demás variables se pueden asociar también a cada tramo.

Después de revisar las diferentes fuentes de información se procedió a identificar aquellas variables a las cuales se les podía hacer seguimiento histórico y que además se pudieran relacionar a nivel de tramo de red. Los criterios tenidos en cuenta en la selección de las variables de los indicadores fueron:

- Representar aspectos relevantes sobre el funcionamiento de la red y del servicio prestado.
- Estar claramente identificados, con un significado concreto.
- Existencia de datos en los sistemas de Empresas Públicas de Medellín E.S.P., o en otras entidades que puedan brindar la información.

Se definieron tres categorías para las variables:

- Estado estructural
- Estado hidráulico
- Estado ambiental

El estado estructural hace referencia a todos aquellos parámetros que debe cumplir la red en cuanto a materiales, espesor, tamaño, cantidad de daños, para una adecuada operación de la red. El estado hidráulico se refiere a la capacidad hidráulica de los tramos de la red, para el transporte del caudal que garantice la prestación adecuada del servicio. Y por último el estado ambiental se refiere a las condiciones que garanticen que el servicio se está prestando de manera adecuada sin afectación de los usuarios por inundaciones, malos olores o problemas que puedan causar daños en la salud.

Haciendo uso de la categorización anterior, se planteó un listado de indicadores para cuantificar y calificar el estado del tramo de la red, empleando variables como: Diámetro, material, profundidad, edad, acometidas, uso del suelo, daños, obstrucciones, tipo de red, capacidad de la red, inspecciones con CCTV.

Variables del Estado Estructural

La evaluación estructural involucra valorar todos aquellos defectos estructurales observados bien sea desde su construcción o con el paso del tiempo, entre las variables estructurales están:

Tabla 3. Variables estructurales

| VARIABLE | IMPORTANCIA |
|----------------------------|-------------|
| Edad | Alta |
| Profundidad | Media |
| Material | Media |
| Diámetro | Media |
| Número de Acometidas | Media |
| Grado de calificación CCTV | Alta |

El grado de importancia fue incluido en la asignación del peso de cada variable en la formulación de un indicador que agrupa todas las variables y califica cada tramo de red según la necesidad de rehabilitación, denominado “**Índice de Reposición**”.

Variables del Estado Hidráulico

La evaluación del estado hidráulico incluye la revisión de todos parámetros mínimos que según las Normas de Diseño de Redes de Alcantarillado de EPM, garantizan el adecuado funcionamiento hidráulico de la red y la autolimpieza.

Tabla 4. Variables hidráulicas

| VARIABLE | IMPORTANCIA |
|---|-------------|
| Velocidad Mínima | Alta |
| Velocidad Máxima | Alta |
| Capacidad Hidráulica (Relación de llenado) | Alta |
| Régimen de Flujo (Froude) | Alta |

Variables del Estado Ambiental

El estado ambiental hace referencia a aquellos aspectos que afectan a los usuarios, las vías, la adecuada prestación del servicio o que pueden conllevar a problemas salubres. Entre estas variables, se incluyen:

Tabla 5. Variables ambientales

| VARIABLE | IMPORTANCIA |
|-----------------|-------------|
| Daños en la red | Alta |
| Obstrucciones | Alta |

Las obstrucciones hacen referencia a todos aquellos inconvenientes en la red que ocasionan inundaciones, como taponamiento de la tubería, desbordamiento del agua, entre otros.

5.4 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Para plantear el modelo decisional para redes de alcantarillado fueron empleadas diferentes bases de datos mencionadas en el capítulo de Fuentes de Información, con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible a nivel de tramo de la red. Lo ideal sería tener un mayor número de variables o incluir otras que son importantes como el nivel freático, el tipo de suelo, cargas sobre la red, entre otras. Las fuentes de información empleadas para cada variable estructural, ambiental e hidráulica se muestran en la Tabla 6.

El modelo decisional fue montado en un sistema de información geográfica, de manera que pueda ser usado por cualquier usuario y filtrar zonas geográficas para obtener el comportamiento de la red y el índice de reposición para los tramos de red. Para realizar este montaje algunos de los datos como se explica a continuación debieron ser geocodificados, es decir convertir la dirección de calle y carrera en coordenadas espaciales, con el fin de ubicarlos en el mapa y poder realizar operaciones con la información.

Tabla 6. Fuentes de información de las variables

| VARIABLE | FUENTE |
|----------------------------|--|
| Edad | Modelo de Red de EPM e información de Acometidas |
| Profundidad | Modelo de Red EPM |
| Material | Modelo de Red EPM |
| Diámetro | Modelo de Red EPM |
| Número de Acometidas | Base de datos Facturación |
| Grado de calificación CCTV | Base de datos Metodología CCTV |
| Velocidad Mínima | Modelación hidráulica |
| Velocidad Máxima | Modelación hidráulica |
| Capacidad hidráulica | Modelación hidráulica |
| Régimen de Flujo | Modelación Hidráulica |
| Daños en la red | Base de datos GESTA – FÉNIX |
| Obstrucciones | Base de datos GESTA – FÉNIX |

Los programas empleados para realizar el montaje en el Sistema de Información - Geográfica y el ajuste de la información a nivel de tramo de red, se describen a continuación.

GEOMEDIA

El sistema de información geográfica Geomedia, es un GIS de Intergraph con herramientas de visualización y análisis. El producto permite combinar datos geográficos con diferentes recursos, fuentes y formatos, y maneja mapas en las diferentes proyecciones y sistemas de coordenadas. El software facilita las consultas espaciales o de atributos. Geomedia permite trabajar con archivos CAD, Shapes, MDB, Imágenes, archivos de Excel, entre otros. La principal ventaja del software es que maneja una única base de datos compartida para todos los usuarios, que solo algunos administradores pueden modificar, y se pueden actualizar los datos del modelo de red.

El modelo decisional se basa principalmente en la información espacial; es por ello que el cálculo del Índice de Reposición resultado del modelo decisional puede ejecutarse en el SIG Geomedia, para cualquier zona dentro del Valle de Aburrá y actualizarse automáticamente, aunque los indicadores de cada una de las variables podrían

calcularse en cualquier otro SIG o incluso en Excel, si se cuenta con la información asociada a cada tramo.

SEWERGEMS

Este programa es una herramienta para la simulación de sistemas de alcantarillado con sus diferentes componentes e interacciones como Manholes, descargas, aliviaderos, coberturas, quebradas, tuberías, entre otros. Permite modelar conjuntamente, o de manera separada, las redes de aguas lluvias, residuales y combinadas.

El programa puede tener varias aplicaciones como: la planificación de la infraestructura, el diseño y la revisión de la capacidad hidráulica de la red, además permite realizar cambios en la alineación y configuración de la red para la optimización del sistema, convirtiéndose en una gran herramienta de apoyo en la toma de decisiones y la planeación.

Entre las ventajas del software se destacan: permite importar la información base desde archivos Shape, la asignación de cargas sanitarias puede realizarse de manera espacial, además, pueden cargarse patrones de comportamiento horario de las descargas a la red, los caudales de aguas lluvias pueden asignarse manualmente si se desea, o importar las áreas de drenaje al modelo, de igual manera el software permite modelar la hidrología, empleando distintos modelos lluvia escorrentía. Un mismo modelo puede tener diferentes escenarios ya sea de caudales sanitarios o de eventos de lluvia, con el fin de modelar caudales reales o proyecciones a futuro, e identificar la capacidad hidráulica de cada uno de los tramos de la red.

En SewerGems existe la posibilidad de trabajar con dos motores de cálculo, éstos son: el denominado método implícito (Implicit) cuyo algoritmo es el recomendado por el diseñador del software y, el método explícito (Explicit SWMM 5). Debe tenerse en cuenta que si se selecciona el método de escorrentía de la EPA SWMM para la cuenca, debe usarse el método de infiltración por defecto especificado en las opciones SWMM, de lo contrario puede emplearse cualquier otro método. El programa permite

escoger fecha y hora de inicio de la simulación, y seleccionar el método de fricción para las tuberías (Manning, Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Kutters).

El software soluciona las ecuaciones de Saint Venant para flujo unidimensional no permanente en tuberías o canales abiertos. El algoritmo es el modelo de tránsito de avenidas FLDWAV, el cual está basado en la ***solución implícita*** por diferencias finitas de las ecuaciones completas unidimensionales de Saint Venant de flujo no – permanente y que permite modelar redes de canales; adicionalmente, este modelo posee algoritmos mejorados para simular flujo mixto y opciones adicionales que permiten disminuir las dificultades numéricas y aumentar la estabilidad del modelo, y de esta manera hacer más precisos los resultados de la simulación.

El método de infiltración le permite determinar cómo se calculará el modelo de infiltración de la precipitación en la zona superior del suelo de las subcuencas; dentro de las opciones se encuentran la de Horton, Green-Ampt, y SCS NC.

Mediante este motor de cálculo, existe la posibilidad de seleccionar entre tres consideraciones de flujo: *Flujo Uniforme*, *Onda Cinemática* y *Onda Dinámica*. El modelo puede realizar análisis con fluidos newtonianos o no – newtonianos, regímenes de flujo con variaciones de subcrítico a supercrítico o viceversa, y flujos a superficie libre a flujo presión.

Condiciones de flujo

El modelo SewerGems trabaja bajo las siguientes condiciones de flujo, para poder validar y calcular la red de alcantarillado:

Flujo libre a gravedad (parcialmente lleno). Las redes de alcantarillado sanitario y de aguas lluvias se diseñan para que funcionen por gravedad, a flujo parcialmente lleno.

Flujo a gravedad bajo sobrecarga. Aunque las tuberías de alcantarillado no se diseñan a tubo lleno, durante la modelación se evidenciará con los perfiles si, en algún momento, la tubería trabaja bajo dicha condición.

GESTA

El proyecto Gesta nació en la Gerencia de Aguas ante la necesidad de información oportuna e integrada que facilitara la gestión táctica y la gestión operativa.

La finalidad del proyecto es proveer los mecanismos, los procedimientos y las herramientas informáticas necesarias que permitieran poner a disposición, tanto de los funcionarios encargados de hacer la gestión táctica, como los encargados de hacer la gestión operativa, la información requerida para apoyar la toma de decisiones relacionada con los procesos Distribución Secundaria Acueducto y Recolección y Transporte de Aguas Residuales.

La base de datos GESTA son un conjunto indicadores y dimensiones donde la información se encuentra pre calculada y estructurada de acuerdo a las definiciones de diseño basadas en las necesidades de análisis de los usuarios y la forma como estos entienden el negocio.

El uso de la base de datos GESTA es mediante una Tabla Dinámica de Excel, por lo que cualquier funcionario puede realizar sus consultas, según necesidad y formato deseado, y se pueden consultar los datos históricos de daños, obstrucciones, inventario de infraestructura, entre otros.

FÉNIX

El sistema Fénix, corresponde al soporte y generación de ordenes de trabajos reportadas ya sea por personal de la empresa o problemas o necesidades reportadas por los clientes, de trabajos relacionados con: Agua Potable, Agua Residual, Revisión y Calibración de Medidores, Limpieza y desobstrucción redes particulares alcantarillado, Investigación redes particulares alcantarillado con cámaras, Agua Cruda, Revisión y Aprobación de Diseño Acueducto, Revisión y Aprobación de Diseño Alcantarillado, Certificados de disponibilidad servicio acueducto y alcantarillado, Análisis de Calidad de Aguas, Acta de recibo de Obra, Quejas, Reclamaciones.

5.5 CRITERIOS E INDICADORES

Para cada una de las variables definidas en la Tabla 6 se establecieron criterios de calificación teniendo en cuenta un adecuado nivel de prestación del servicio, y partiendo de la información del Modelo de Red, proveedores de materiales, y las Normas de diseño y construcción de redes de Alcantarillado de EPM (2009) y opinión de expertos en el tema del mantenimiento de la red y su operación.

Cada indicador tiene una **fórmula de cálculo** y un **peso de ponderación** al indicador, dependiendo de su incidencia e importancia en el funcionamiento de la red, como se muestra a continuación:

Criterio Edad

La edad representa una indicación del tiempo que la red ha estado en operación expuesta a carga y al medio ambiente. El tiempo de la falla puede no estar asociado solo a la edad si se consideran problemas asociados al material o al proceso constructivo, por lo cual varios autores sugieren emplear varios criterios y no solo la edad de la tubería.

La vida útil de la tubería es de 60 años en promedio para tuberías de materiales diferentes al concreto, como el PVC (PAVCO, 2004) o el polietileno y de 40 años para tuberías en concreto (EPM, 2009). Estas dos edades fueron asumidas como los valores óptimos para la edad de la tubería según el material de cada tramo de la red (60 años para PVC o Polietileno y 40 años para otros materiales). Para el caso de las ciudades colombianas, las tuberías más viejas que aún están en servicio, pueden oscilar entre 40 y 50 años y podrían no presentar fallas visibles.

Fórmula 1. Edad tubería/(Vida Útil material)

Donde la Edad de la tubería corresponde a la fecha de instalación como se muestra en el capítulo 6.

Varios estudios a nivel internacional han sugerido que la edad de la tubería puede ser un indicador de la necesidad de reemplazo (Boxal et al, 2007), aunque se considera que debe combinarse con otra información que permita conocer la red para obtener información más exacta. Se considera que la edad constituye uno de los factores de mayor relevancia en los modelos de deterioro y vulnerabilidad asociados a los elementos de un sistema de acueducto o alcantarillado, Posada (2008), pero no un factor definitivo.

Criterio Material

La capacidad de una tubería de resistir las fuerzas inducidas por la presión interna de flujo o externa del suelo está en función de la resistencia del material y el espesor de pared, por lo que es de esperarse que el material y el espesor de la tubería sean factores determinantes en su desempeño.

La evaluación de este criterio está incluido en el criterio Edad, al calificar de manera diferente las edades según el material, considerando que el PVC y el Polietileno tiene más durabilidad que la de otros materiales y que de igual manera puede estar más expuesto a riesgos desde el proceso constructivo.

Criterio Profundidad

Las tuberías durante su vida útil se encuentran sometidas a distintos estados de carga: presiones verticales y horizontales del terreno, peso propio, presión interna, cargas superficiales estáticas o dinámicas, y esfuerzos sísmicos. La magnitud de las cargas que deberá soportar una tubería dependerá de la rigidez entre la tubería y el suelo. Las cargas de servicio en las tuberías dependen fundamentalmente de la calidad y nivel de compactación del material del lleno.

Se considera según las Normas de Diseño y Construcción de Redes de Alcantarillado (EPM, 2009) que las tuberías de alcantarillado deben estar a una profundidad mínima de 0.8 metros, y se considera que a profundidades mayores de 2 metros se dificulta el mantenimiento de la red, asociado a la exposición a cargas dinámicas, al proceso constructivo, problemas de compactación del material y dificultad en la instalación.

Para los tramos de tubería que tengan una profundidad promedio inferior o igual a 0.8 m, la fórmula para el cálculo del criterio será la Fórmula 2; para aquellos con profundidad mayor a 0.8 m, el cálculo del criterio será Fórmula 3.

Fórmula 2. Profundidad Mínima/Profundidad a la Clave

Fórmula 3. Profundidad Clave/(2 m)

Donde el (2 m) corresponde a una profundidad de dos metros que es similar al promedio de todo el sistema, y que es la profundidad ideal hasta la cual se facilita un adecuado mantenimiento.

Criterio Diámetro

Al realizar un análisis de la información de los daños de la red históricos almacenados desde el año 2003, se encontró que el mayor porcentaje de los daños se presentaron en diámetros inferiores a los 600 mm, lo cual es coherente con los procesos de fabricación de tuberías de alcantarillado, ya que a partir de este diámetro se refuerzan las tuberías para agregar más resistencia y evitar la deformación de la misma. Asociado a lo anterior, para cuantificar el criterio del diámetro se empleó la Fórmula 4, donde se dió un mayor peso del criterio a las tuberías con diámetro inferior a 600 mm, considerando que tienen mayor riesgo de falla y en caso de falla incurren en severas consecuencias económicas, sociales y ambientales, caso contrario a lo registrado para las redes de Agua Potable.

Fórmula 4. 0.8 si Diámetro < 600 mm
0.2 si Diámetro >= 600 mm

De igual manera, como se especifica en las normas de diseño (EPM, 2009), se sugiere que las tuberías de alcantarillado tengan diámetros superiores a los 150 mm.

Número de Acometidas

El Número de Acometidas asociadas a un tramo de red aumentan la probabilidad de falla del mismo, debido a problemas en el empalme con la red y a prácticas indebidas, donde se conectan varias acometidas de un mismo sector directamente a la red o sin las uniones correctas, es por ello que se considera un aumento de la probabilidad de falla de la red cuanto más acometidas tenga conectadas, aunque a su vez al igual que la cantidad de daños dependerá de la longitud del tramo.

Fórmula 5. _____

Donde la longitud promedio del sistema se obtuvo del total de redes en operación del sistema de alcantarillado de EPM, y el número de acometidas para esta longitud fue consultado a opinión de conocedores del tema.

Grado de Calificación CCTV

La metodología para la codificación y calificación de las redes diagnosticadas con CCTV realizada para las Empresas Públicas de Medellín en el año 2010, involucra los siguientes aspectos:

- Condiciones estructurales
- Condiciones operacionales
- Otros aspectos

La evaluación estructural involucra el estado de las tuberías inspeccionadas dependiendo de los defectos estructurales observados durante la inspección. Para las condiciones estructurales se tuvieron en cuenta las siguientes clasificaciones de los

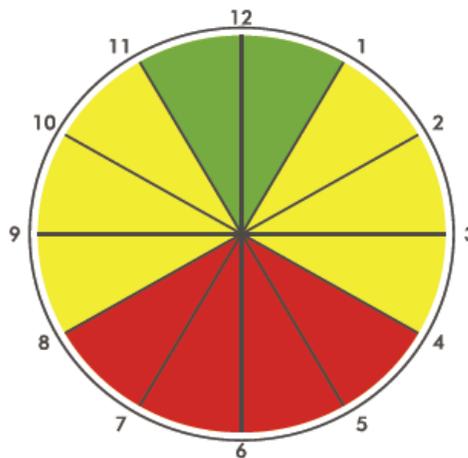
daños: Fisura Fractura, Rotura, Huevo, Deformación, Colapso, Junta, Superficie Deteriorada.

La evaluación de los aspectos operacionales hacen referencia a todos aquellos aspectos que tienden a reducir o limitar la capacidad de transporte de las aguas a través de la red disminuyendo o afectando la sección transversal de la misma, tales como: Raíces, Infiltración, Exfiltración, Depósitos, Obstáculos, Empaquetadura defectuosa, Alineamiento, Estado de la Acometida, Estado de reparaciones, Estado de la cámara de caída.

En el listado de otros aspectos que no caben en la clasificación de estructurales u operacionales, se encuentran: Cambio de diámetro entre tramos, cambio de material, y empozamiento.

De acuerdo con la criticidad de la observación, la cual está relacionada con la característica del daño (operacional o estructural) y su ubicación, según el sentido horario (ver Figura 8), se asigna a cada uno de los daños la clasificación de la red, de acuerdo con su estado. Para conocer el detalle de la asignación de la calificación, remitirse a EPM (2010).

El sentido horario establecido para la calificación es el siguiente



Siempre se mide la posición de la observación teniendo en cuenta el sentido horario.

Figura 8. Ubicación de la falla (tomado de epm, 2010)

Es posible clasificar la red según cinco grados de acuerdo con su estado y así proceder a generar recomendaciones para el tratamiento del mismo tal como se describe en la Figura 9 y la Tabla 7.

| INTERVALOS | TOTAL | | | | ESTRUCTURAL | | | | OPERACIONAL | | | | | |
|------------|-------|--|----|-----|-------------|-----|----|------|-------------|------|----|-----|----|-----|
| | | | < | 1,1 | | | < | 1,8 | | | < | 0,4 | | |
| 1 | | | >= | 1,1 | <= | 3,9 | >= | 1,8 | <= | 4,1 | >= | 0,4 | <= | 1,3 |
| 2 | | | >= | 3,9 | <= | 12 | >= | 4,1 | <= | 9,2 | >= | 1,3 | <= | 3,3 |
| 3 | | | >= | 12 | <= | 41 | >= | 9,2 | <= | 21,6 | >= | 3,3 | <= | 8,6 |
| 4 | | | >= | 41 | | | >= | 21,6 | | | >= | 8,6 | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 9. Grado de calificación para el tramo (tomado de epm, 2010)

De acuerdo a las recomendaciones realizadas en EPM (2010), los tramos cuya calificación sea mayor a Grado 3, requieren diferentes tipos de intervenciones, por lo cual para el Índice de Reposición de Alcantarillado, aquellos tramos con grado 5 requerirán intervención inmediata y en menor importancia los de grado 4 y 3 respectivamente.

Tabla 7. Grado de calificación del tramo según CCTV

| DIAGNÓSTICO | RECOMENDACIÓN |
|---|--|
| GRADO 1: NO SE ENCONTRARON DEFECTOS O LOS POCOS DEFECTOS ENCONTRADOS NO SON IMPORTANTES Y NO COMPROMETEN LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL Y/O OPERACIONAL DEL TRAMO. | GRADO 1: SE RECOMIENDA REALIZAR NUEVA INSPECCIÓN EN UN PLAZO DE 7 A 10 AÑOS, PARA VERIFICAR EL ESTADO ESTRUCTURAL Y OPERACIONAL DEL TRAMO. |
| GRADO 2: LOS DEFECTOS ENCONTRADOS PRESENTAN UNA MAYOR IMPORTANCIA, PERO NO COMPROMETEN LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL Y/O OPERACIONAL DEL TRAMO INSPECCIONADO A CORTO PLAZO. | GRADO 2: SE RECOMIENDA REALIZAR LAS ACCIONES DE MANTENIMIENTO CON EL FIN DE CORREGIR LOS DAÑOS ENCONTRADOS Y HACER NUEVA INSPECCIÓN EN UN PLAZO DE 5 A 7 AÑOS PARA ANALIZAR EL RIESGO ESTRUCTURAL Y/O OPERACIONAL. |
| GRADO 3: LOS DEFECTOS ENCONTRADOS GENERAN PROBLEMAS PUNTUALES DE TIPO ESTRUCTURAL Y/O OPERACIONAL, SE DEBEN TOMAR ACCIONES CORRECTIVAS O PREVENTIVAS CON EL FIN DE MINIMIZAR LA PROBABILIDAD DE FALLA. | GRADO 3: SE DEBEN REALIZAR ACCIONES DE MANTENIMIENTO QUE PERMITAN CORREGIR LOS DEFECTOS PRIORIZANDOS DE ACUERDO CON LA GRAVEDAD O CALIFICACIÓN, SE RECOMIENDA REALIZAR NUEVA INSPECCIÓN EN UN PLAZO DE 3 A 5 AÑOS PARA VERIFICAR CON EL RESULTADO DE LAS ACCIONES REALIZADAS QUE NO SE HA INCREMENTADO EL RIESGO ESTRUCTURAL Y/O OPERACIONAL. |
| GRADO 4: LOS DEFECTOS ENCONTRADOS PUNTUALES O SECTORIZADOS SON DE GRAN IMPORTANCIA Y COMPROMETEN EL ESTADO ESTRUCTURAL Y/O OPERACIONAL DEL TRAMO INSPECCIONADO. | GRADO 4: SE DEBEN TOMAR MEDIDAS PREVENTIVAS O CORRECTIVAS REALIZANDO ACCIONES DE MANTENIMIENTO QUE IMPIDAN UNA GENERALIZACIÓN DEL DAÑO; PRIORIZANDO LOS DEFECTOS SEGÚN LA GRAVEDAD O CALIFICACIÓN, PROGRAMAR NUEVA INSPECCIÓN EN UN PLAZO DE 1 A 3 AÑOS PARA ANALIZAR EL RESULTADO DE LAS ACCIONES EJECUTADAS. |
| GRADO 5: PRESENTA DEFECTOS DE GRAN IMPORTANCIA EN TODO EL TRAMO QUE ESTRUCTURALMENTE Y/O OPERATIVAMENTE REQUIEREN DE INTERVENCIÓN INMEDIATA. | GRADO 5: REALIZAR LAS ACCIONES DE MANTENIMIENTO ESTRUCTURAL Y/O OPERATIVO DE CARÁCTER URGENTE PARA DEJAR EN OPERACIÓN EL TRAMO AFECTADO, SE DEBE ANALIZAR LA POSIBILIDAD DE UNA REPOSICIÓN O REHABILITACIÓN DEL TRAMO. |

Parámetros hidráulicos

Según las Normas de Diseño y Construcción de Alcantarillado (EPM, 2009) se establece que las redes deben cumplir con las siguientes especificaciones para su correcto funcionamiento.

La velocidad mínima es de 0.45 m/s para alcantarillados de aguas residuales y 0.75 m/s para alcantarillados de aguas lluvias y combinadas.

La velocidad máxima es de 10 m/s para tuberías plásticas y de 5 m/s para otro tipo de materiales.

Para el caso de EPM se determinaron los parámetros hidráulicos de cada tramo de red a partir de los resultados de la modelación hidráulica, empleando el software SEWERGEMS.

Fórmula 6.

Donde

El valor máximo permisible de la Capacidad hidráulica, es función del diámetro de la tubería, variando entre el 70% y el 85% del diámetro real interno de cada uno de los tramos.

Fórmula 7.

Con respecto al régimen de flujo, el flujo uniforme en una tubería o ducto de un sistema de alcantarillado, puede ser crítico, subcrítico o supercrítico de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Fr=1$$

$$Fr<1$$

$$Fr>1$$

Donde el número de Froude esta descrito mediante la ecuación mostrada a a continuación:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD}}$$

Donde,

Fr = Numero de Froude (adimensional).

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

D = Profundidad hidráulica (m).

v = Velocidad de flujo (m/s).

Una de las características del flujo crítico y cuasicritico (cuando el número de Froude se encuentra entre 0.7 y 1.5 aproximadamente) es su inestabilidad y la variabilidad de la profundidad de flujo alrededor de la profundidad critica de flujo. Por consiguiente, se recomienda que el diseño bajo flujo uniforme evite aquellas velocidades de flujo que impliquen un número de Froude en este intervalo. En particular, se debe entender el efecto que se tiene sobre la posible socavación de la cámara de llegada y la generación de ruidos.

Si el régimen de flujo es supercrítico, el diseño debe poner especial cuidado en la posible generación de ondas translacionales en las tuberías. La presencia de este tipo de ondas va acompañada de generación de ruidos molestos en las tuberías de alcantarillados, así como posibles problemas de socavación por choques del chorro en la cámara de aguas abajo. En caso de que se tenga un régimen de flujo supercrítico en las tuberías, el diseño debe analizar y prever los problemas causados por cambios bruscos de pendiente, la posible presencia de resaltos hidráulicos en el interior de las tuberías, y las formas apropiadas para resolver la problemática. En caso de que existan problemas de ruido causados por el flujo, el diseño debe analizar en cada caso particular la forma de controlar el ruido de las tuberías.

Fórmula 8.

Criterio de daños

La información histórica de daños que se almacenan en la base de datos GESTA proporciona un conocimiento importante del estado del sistema. Esta base de datos se encuentra continuamente actualizada y contiene información histórica desde el año 2003. Entre la información almacenada de los daños en la red se encuentra la ubicación, tipo de reparación, tiempos de reparación, costos, entre otros.

Mediante un análisis del histórico de daños en las tuberías, varios autores han reportado como una de las conclusiones más relevantes, que después de la primera falla, el número de fallas en una tubería incrementa exponencialmente con el tiempo (Boxall, 2007).

La fórmula empleada para el cálculo del criterio de daños es la Fórmula 9 donde se evalúa la presencia de daños en cada tramo y se cuantifica respecto a la longitud del mismo, de éste modo un tramo pequeño con muchos daños respecto a uno largo con la misma cantidad de daños tendrá un peso mayor del Índice de reposición y será por tanto más factible para la reposición.

Fórmula 9. _____

Donde la longitud promedio del sistema con reparaciones es de 36.8 m y las reparaciones promedio del sistema tienen un valor de 0.08 reparaciones/año, de igual manera se considera que un tramo puede tener como máximo 1 reparación a lo largo de su vida útil. Éste es uno de los parámetros con mayor peso en la evaluación del Índice de Reposición, considerando que un tramo que ya presentó una reparación es más propenso a la falla.

Criterio de obstrucciones

En las redes de alcantarillado cuando se presenta un cambio brusco de pendiente o hay elementos que impidan el flujo normal en la tubería (por ejemplo raíces o sedimentos), es común la presencia de obstrucciones sin considerarla como una

condición correcta de funcionamiento. Aunque el peso de este criterio es inferior al de daños, tiene menos incidencia en el comportamiento estructural de la tubería.

Fórmula 10. _____

Donde la longitud promedio del sistema con obstrucciones es de 33.9 m y las obstrucciones promedio del sistema 0.10 obstrucciones/año por tramo. Además, se considera que un tramo puede tener máximo 1 obstrucción por año.

6. ÍNDICE DE REPOSICIÓN DE LA RED DE ALCANTARILLADO

Para el montaje del modelo decisional para la reposición y rehabilitación de redes de alcantarillado del Valle de Aburrá, se realizó una metodología basada principalmente en la información que se obtiene al aplicar los criterios de las variables en el Sistema de Información Geográfica, en el cual se puede calcular el Índice de Reposición de cada uno de los tramos de la red. La metodología se basa en la aplicación de las fórmulas del subcapítulo 5.5, con las que se evalúa cada uno de los criterios, y se agrega toda la información espacialmente o relacionándola a nivel del tramo de red.

La metodología se basa en la implementación de los siguientes pasos:

- Análisis de los Indicadores para la evaluación estructural, hidráulica y ambiental.
- Cálculo de criterios en el SIG.
- Codificación de los resultados de las inspecciones con CCTV.
- Modelación hidráulica.
- Ponderación de los indicadores.
- Calificación según el índice de reposición.

6.1 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN EN EL SIG

La principal fuente de información para la edad de la tubería fue el Modelo de Red, sin embargo algunos tramos no contaban con esta información por lo cual se implementaron algunos criterios para obtener la edad de los tramos, aunque, lo ideal sería contar con la fecha de instalación para todos los tramos de la red. Para aquellos tramos que no tenían la información de edad, el primer paso fue obtener la Fecha de Instalación de otro tramo cercano que hubiera sido construido en el mismo proyecto (Ver Figura 10).

El paso siguiente fue obtener la fecha de instalación de la acometida más antigua que estuviera, como máximo, a 10 metros de distancia (Distancia máxima para una acometida según EPM, 2009) del tramo de la tubería. Para los tramos en los cuales las dos consultas anteriores no se le asignó la fecha de instalación, se tomó la de la tubería de acueducto más cercana.

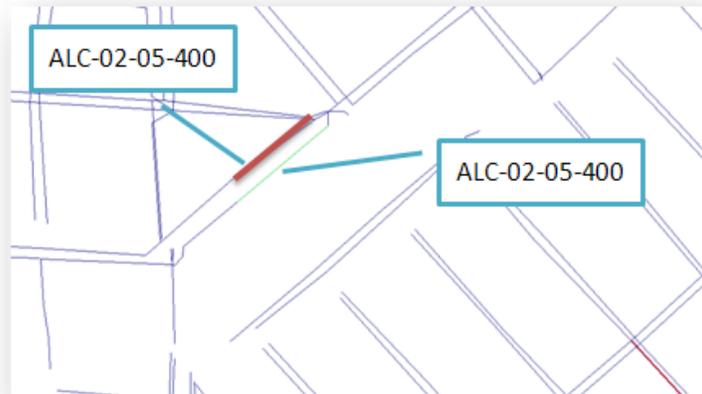


Figura 10. Asignación de la edad según el proyecto

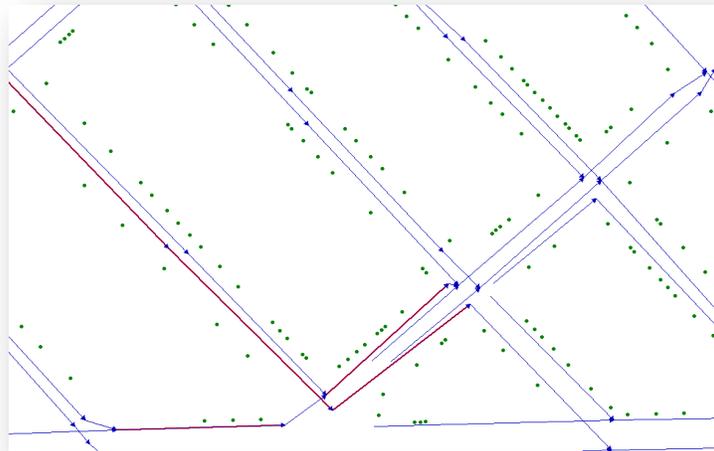


Figura 11. Asignación de la edad según fecha de la acometida

Aplicando las consultas anteriores se logró completar la información de la edad de algunos tramos, sin embargo no todos quedan con esta información, para los cuales se recomienda la inspección con CCTV.

Se procedió a montar en el SIG el cálculo del *Criterio Edad*, aplicando la Fórmula 1 a cada tramo.



De esta manera los tramos que tienen un material diferente al PVC o el Polietileno tendrán una calificación de este criterio mayor, por lo cual el Índice de Reposición de alcantarillado arrojará un valor mayor para estos materiales y serán más propensos a la reposición.

Para el cálculo del criterio de Profundidad, se realizaron unas consultas en el SIG de la información de cada tramo. El primer paso fue calcular la profundidad promedio de las profundidades de clave de entrada y salida del tramo (Ver Figura 12), paso siguiente se aplican la Fórmula 2 y Fórmula 3.

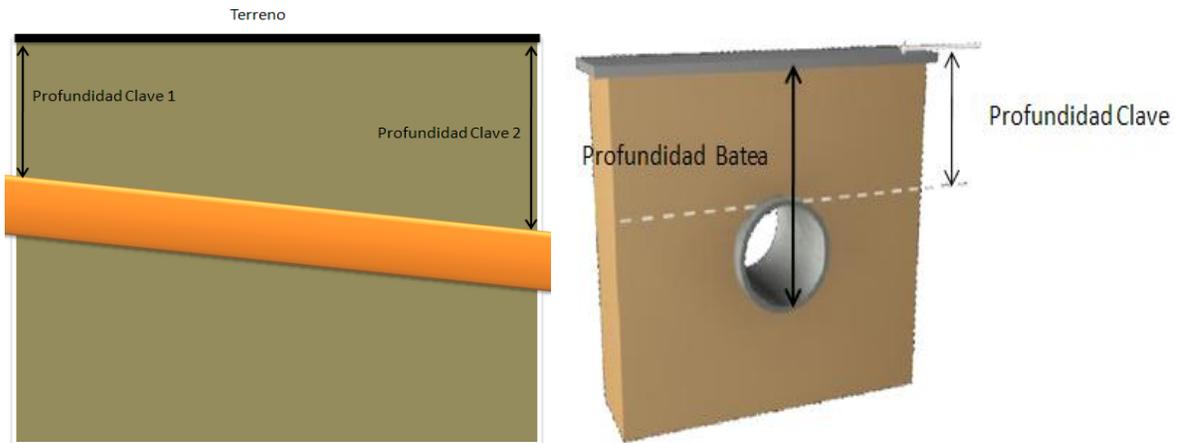


Figura 12. Profundidad de entrada y salida de la tubería

El criterio que se aplicó en la consulta en el SIG a cada tramo fue el siguiente:

La información de los daños y obstrucciones con registros históricos desde el año 2003, se obtuvo de la base de datos GESTA, y luego se asociaron a cada tramo realizando una relación al tramo más cercano en un radio de 10 metros de la tubería.

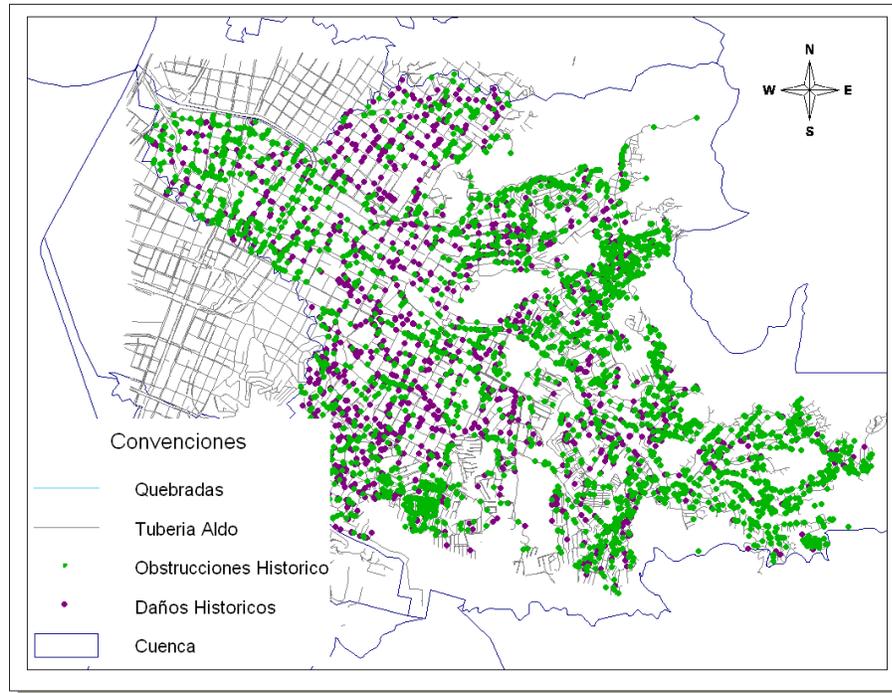


Figura 13. Ubicación de daños y obstrucciones cuenca Santa Helena

Posterior al cálculo del número de obstrucciones y reparaciones o daños en cada tramo, se procedió a aplicar la Fórmula 9 y Fórmula 10 respectivamente, con el fin de evaluar el valor del criterio de daños y obstrucciones.

Para evaluar el criterio de Diámetro, en la base de datos de SIGMA se encuentra almacenado el diámetro de la tubería. Con este dato, a cada tramo se le aplicó la Fórmula 4.

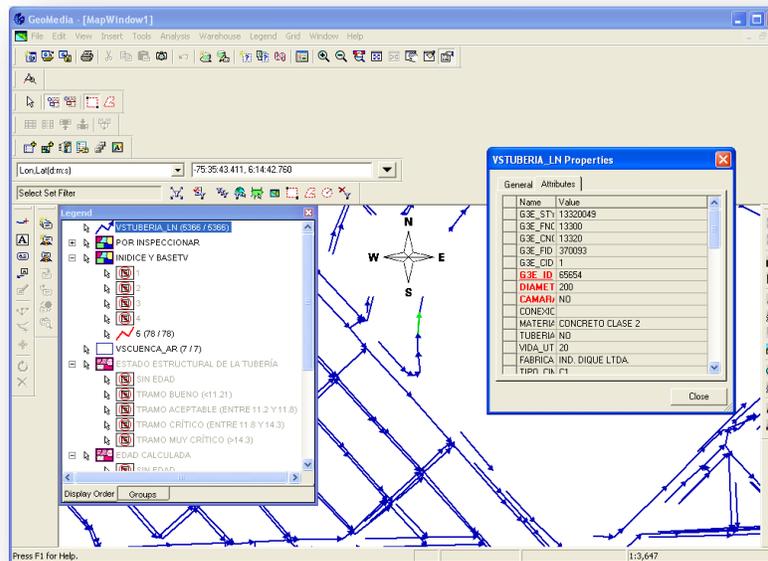


Figura 14. Información disponible en la base de datos SIGMA

La información del número de cometidas para cada tramo de red, se obtuvo de la base de datos de facturación, donde se encuentra referenciado el 94% del total de acometidas operadas por EPM. El procedimiento propuesto fue georreferenciar las acometidas en el SIG y, posteriormente asociarlas a cada tramo de red de agua residual y combinada, empleando el criterio de cercanía.

Según la opinión de expertos se considera que un tramo de tubería debe tener un máximo de acometidas equivalentes al 10% de la longitud del tramo con el fin de no afectar la funcionalidad estructural del tramo; así por ejemplo, un tramo con una longitud de 33 metros, cuyo 10% corresponde a 3.3 m, tendría un máximo de 22 acometidas, asumiendo que el diámetro promedio de acometidas es de 6" (15.24 cm).

El Grado de Calificación CCTV se obtuvo del procedimiento planteado por EPM (2010), dicho procedimiento fue empleado para codificar las inspecciones históricas de las Empresas Públicas de Medellín. Toda la información de las inspecciones es almacenada en una base de datos donde se asocia a cada IPID (Identificador único de cada tramo) el grado de calificación según la metodología. El procedimiento empleado

para el índice de reposición de alcantarillado en el SIG fue realizar una relación de la tabla con los resultados de la inspección con la capa de las tuberías del Modelo de Red, el criterio para esta variable fue el siguiente:

6.2 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN SEWERGEMS

Según las Normas de Diseño de Alcantarillado (EPM, 2009) se establece que las redes deben cumplir con ciertos parámetros de funcionamiento, los cuales se determinaran a partir de los resultados de la modelación hidráulica, empleando el software SewerGems. En el año 2007 se realizó el trabajo “*Metodología para modelar el sistema de drenaje urbano (alcantarillado) a partir de una proyecto piloto*” en EPM, del cual se obtuvieron los pasos a seguir para la modelación de las redes de alcantarillado (Ver Figura 15). En el año 2010 en convenio con la Universidad Nacional de Colombia se realizó el proyecto “*Metodología para la evaluación del balance hídrico en una cuenca sanitaria - cuenca de la quebrada La Picacha*” en el cual se mejoró esta metodología y se identificó la manera de calibrar los modelos empleando el software MATLAB.

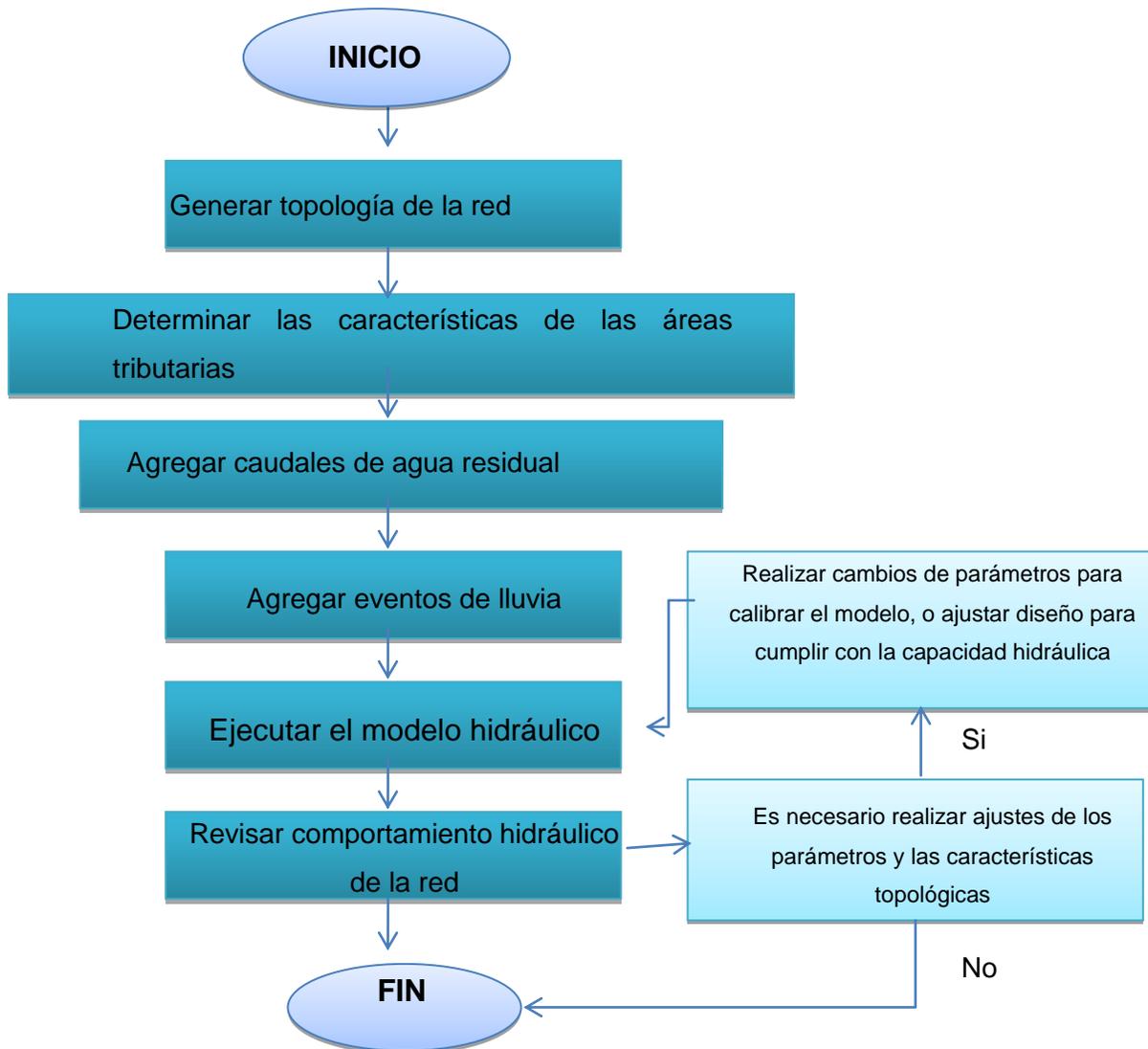


Figura 15. Algoritmo para modelar redes de alcantarillado

La información inicial para la modelación es obtenida del SIG, donde se exportan las siguientes capas de información con cada uno de sus atributos a archivos Shape:

- Divisoria de la zona de estudio
- Áreas tributarias
- Tuberías de alcantarillado
- Manholes o cámaras de inspección
- Descargas

- Aliviaderos
- Elementos especiales
- Usuarios de alcantarillado, con sus respectivos consumos

Esta información se importa al software SewerGems a través de la herramienta *ModelBuilder* y se relaciona con los elementos del software como se muestra en la *Tabla 8*.

Tabla 8. Relación de los elementos de SIGMA con SewerGems
(Tomado de UNAL – EPM, 2010)

| Elemento SIG | Tipo Elemento SEWERGEMS |
|----------------------|-----------------------------------|
| Cámara | Manhole |
| Aliviadero | Manhole con estructura de control |
| Elementos especiales | Manhole |
| Descargas | Outfall |
| Tuberías | Conduit |
| Áreas tributarias | Catchment |

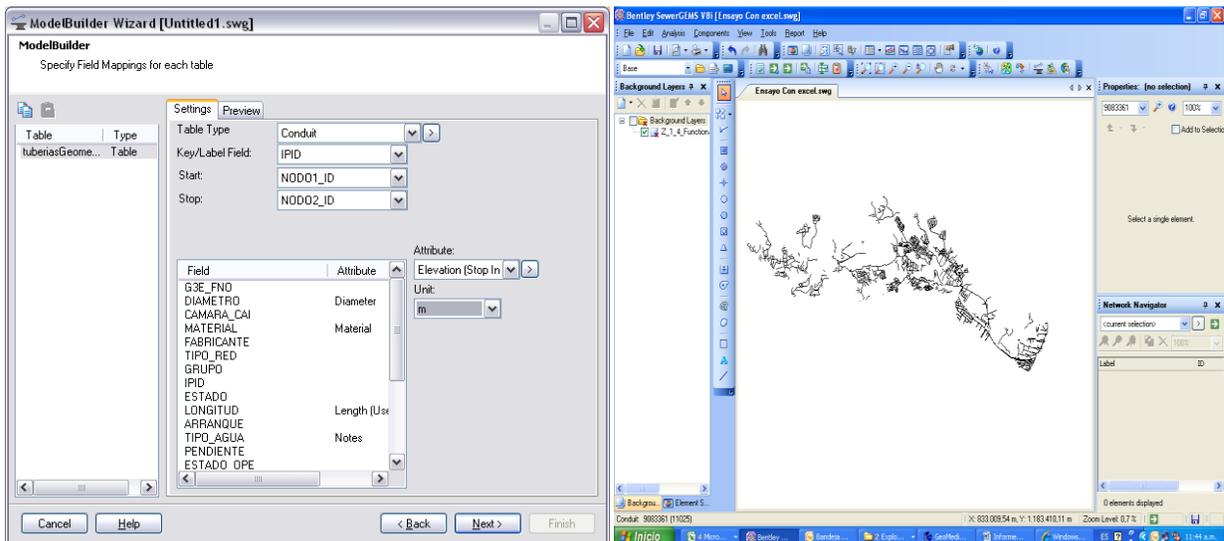


Figura 16. Ejemplo de model builder en SewerGems

El paso a seguir fue el trazado de las áreas tributarias para el caudal de aguas residuales en GEOMEDIA, para la asignación del caudal residual. Las opciones para asignar el caudal de manera espacial son las siguientes:

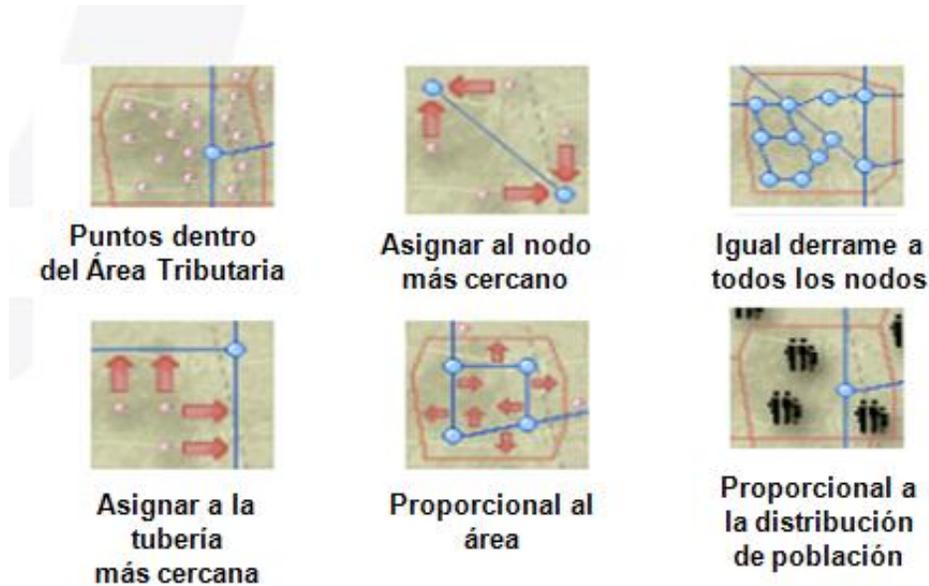


Figura 17. Asignación de caudal residual

Al caudal residual se le aplica una curva patrón que muestra el comportamiento de las descargas en las diferentes horas del día, dicha curva es obtenida con base a las estaciones de medición de caudal ubicadas en la entrega de las cuencas al interceptor principal.

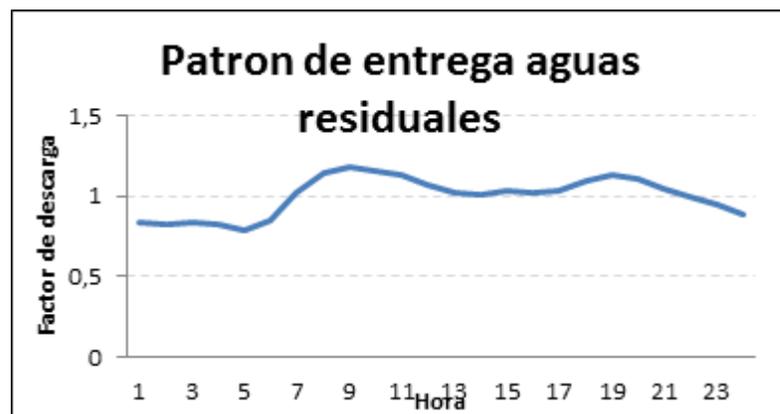


Figura 18. Curva patrón de entrega caudal residual

La metodología a seguir para obtener los eventos de lluvia para la modelación parte de seleccionar la estación pluviométrica más cercana, y analizar la información histórica de las lluvias almacenada con intervalos de tiempo cada 5 minutos, seleccionar los máximos anuales y sus duraciones. Analizar las frecuencias de duración y las tormentas con los picos más altos y las más largas, se sugiere modelar los siguientes eventos para verificar el comportamiento de la red:

- Lluvia más frecuente en la zona
- Lluvia de máxima precipitación registrada
- Curva IDF de TR de 10 años como sugiere la Norma EPM (2009)

En el software SewerGems se puede ingresar la IDF de la estación pluviométrica o un Hietograma que se construye a partir de la información de la IDF y empleando el método de distribución por bloques de Ven Te Chow para los diferentes períodos de retorno.

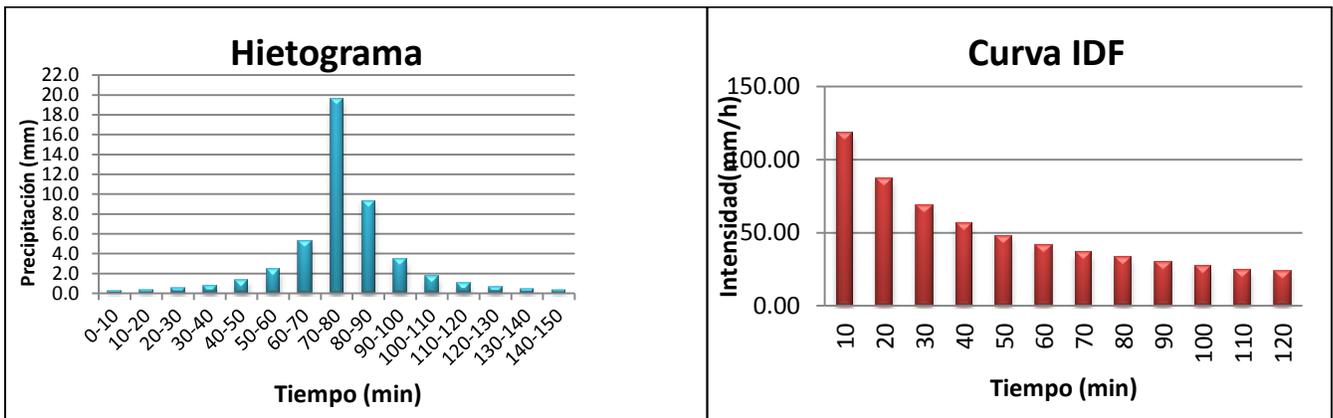


Figura 20. Lluvias para modelar en SewerGems

Para la modelación de las redes de alcantarillado también se deben incluir las estructuras de control de flujo, como lo son para el caso del Valle de Aburrá los Aliviaderos, éstas estructuras pueden ser de tres tipos como se observa en la Figura 21.

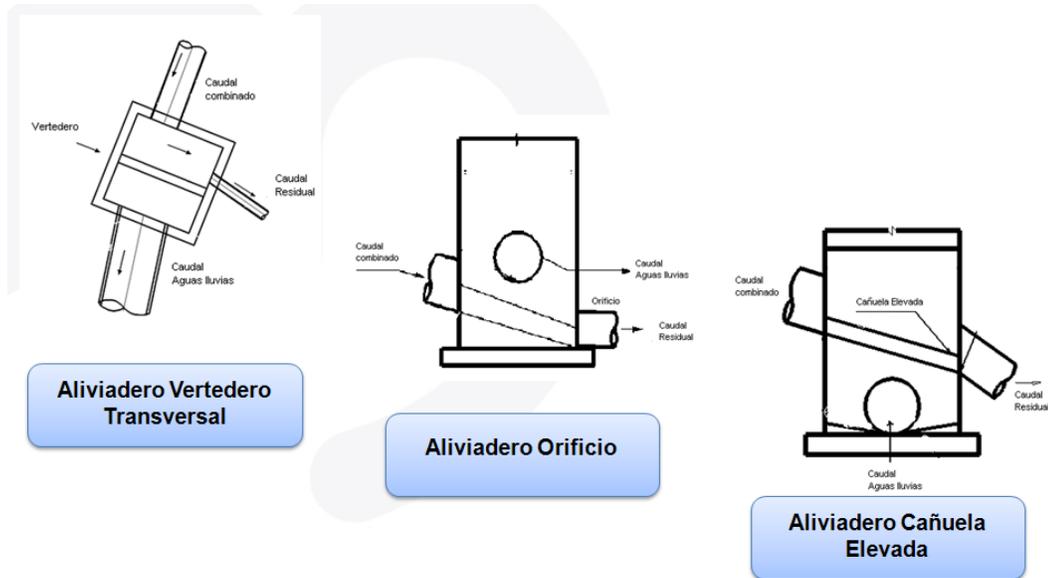


Figura 21. Aliviaderos típicos en el Valle de Aburrá

Estas estructuras son ingresadas al modelo como vertederos, cuya diferencia entre los tres tipos es la forma de verter (Lateral, transversal u orificio) y se ingresan las cotas de la estructura de vertimiento.

El software SewerGems puede emplearse con diferentes fines: Configuración actual, expansión de algún sector, optimización de la red, obstrucción de un colector o tubería. El cálculo de los parámetros hidráulicos para del Índice de reposición de alcantarillado se calculan a partir de la modelación y posteriormente se debe realizar un procedimiento en Excel para aplicar las fórmulas de los indicadores hidráulicos de cada tramo, para posteriormente agregarlos en el SIG mediante el IPID (Identificador único de cada tramo).

6.3 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REPOSICIÓN

Una vez se tienen calculados cada uno de los criterios a escala de **tramo de red**, se procede a agregarlos a la fórmula para el Índice de Reposición, donde se ponderan

asignando pesos diferentes según la incidencia de cada variable en el comportamiento de la red.

Fórmula 11.

En la Tabla 9 se muestran los pesos asignados a los criterios de cada variable.

Tabla 9. Peso de los indicadores

| VARIABLE | PESO |
|----------------------------|------|
| Edad | 10 |
| Profundidad | 1 |
| Material | 1 |
| Diámetro | 1 |
| Número de Acometidas | 1 |
| Grado de calificación CCTV | 8 |
| Velocidad Mínima | 5 |
| Velocidad Máxima | |
| Capacidad hidráulica | 8 |
| Régimen de Flujo | 5 |
| Daños en la red | 2 |
| Obstrucciones | 1 |

Según los resultados del Índice de reposición se establecieron rangos de criticidad para la calificación del tramo, teniendo en cuenta los valores óptimos de cada variable como se muestra a continuación:

Tabla 10. Criticidad del tramo según Índice de Reposición

| CRITICIDAD | DEFINICION |
|-----------------|--|
| Tramo Bueno | Edad menor a 35 años, menos de una reparación a lo largo de su vida útil, menos de dos obstrucciones a lo largo de su vida útil |
| Tramo Aceptable | Edad entre los 35 y 40 años, menos de una reparación a lo largo de su vida útil, menos de dos obstrucciones a lo largo de su vida útil, o calificación del Grado de CCTV de 1,2 o 3. Recomendable su cambio para proyectos viales. |
| Tramo Crítico | Edad entre los 40 y 50 años, más de una reparación a lo largo de su vida útil, más de dos obstrucciones a lo largo de su vida útil, o calificación del Grado de CCTV de 4 o 5. Se recomienda su reposición. |

| CRITICIDAD | DEFINICION |
|--------------------------------|---|
| Tramo Muy Crítico | Edad mayor a 50 años, más de una reparación a lo largo de su vida útil, más de dos obstrucciones a lo largo de su vida útil. Se recomienda su reposición. |
| Tramo para Inspección con CCTV | Aquellos tramos que no tienen Edad y que los otros parámetros arrojaron un valor alto del índice. |

7. CASO DE APLICACION

Para el caso de aplicación se seleccionó un sector de los más críticos en la ciudad de Medellín, que por necesidades de la ciudad requiriera pronta intervención. El sector seleccionado se ubica dentro de la cuenca sanitaria Santa Helena, y abarca las redes de todo el sector norte de esta cuenca. Este sector se delimitó abarcando las descargas del costado norte de la cuenca sanitaria y todas aquellas redes que descargan al colector Santa Helena, el cual tiene un punto de muestreo y medición en la entrega al río Medellín.

La cuenca sanitaria comprende un área total de 14 km², de la cual el 87% de la cuenca se encuentra en el perímetro urbano con una alta densidad poblacional. El sector seleccionado para el caso de aplicación comprende 5 km² del costado norte de la cuenca, los límites del área están definidos al norte por las cuencas de las quebradas Los Ataudes y El Ahorcado, al sur por la quebrada Santa Helena, al oriente con las cuencas de las quebradas La Castro y San Antonio y al occidente por los barrios Jesús Nazareno y Villanueva.

En la parte alta de la cuenca se ubican asentamientos subnormales, tales como: San Antonio, Villatina, Trece de Noviembre, Llanaditas, La Ladera y Los Mangos. Las condiciones de infraestructura de saneamiento de estos sectores, como es de esperarse, no son las más adecuadas, teniendo en cuenta que carecen de planeación y manejo técnico, situación que genera en la actualidad la descarga incontrolada de aguas residuales a las corrientes, y el asentamiento de viviendas en zonas de difícil recolección para las aguas residuales. En esta parte alta, la pendiente del terreno es bastante pronunciada, y oscila entre el 30% y el 40%. La pendiente se va reduciendo, hasta encontrar la conformación de terrenos caracterizados por la presencia de material aluvial, a través de estos la pendiente continua reducida hasta la confluencia con el río Medellín, sitio donde se encuentran ubicados dos sensores de medición de nivel de los colectores.

La disminución de la sección hidráulica por invasión de los cauces (el asentamiento en zonas inundables) además de representar un peligro en sí misma, afecta la dinámica fluvial de las corrientes, trayendo como consecuencia que durante los caudales mayores, el confinamiento del flujo provoque un aumento de su velocidad y la eliminación de la disipación de energía por el movimiento del agua en las zonas inundables, con el consiguiente aumento del poder erosivo del agua en el fondo y en las riberas, lo cual aumenta las tasas de socavación lateral de las bases de los taludes y se incrementa la probabilidad de que se presenten movimientos en masa.

Actualmente se está adelantando la intervención para ésta cuenca, por lo que se considera importante plantear cuales redes deben ser cambiadas o revisadas para los diseños y la construcción de las mismas, la cantidad de redes a reponer se obtendrá empleando el Índice de Reposición de alcantarillado, resultado del Modelo Decisional.

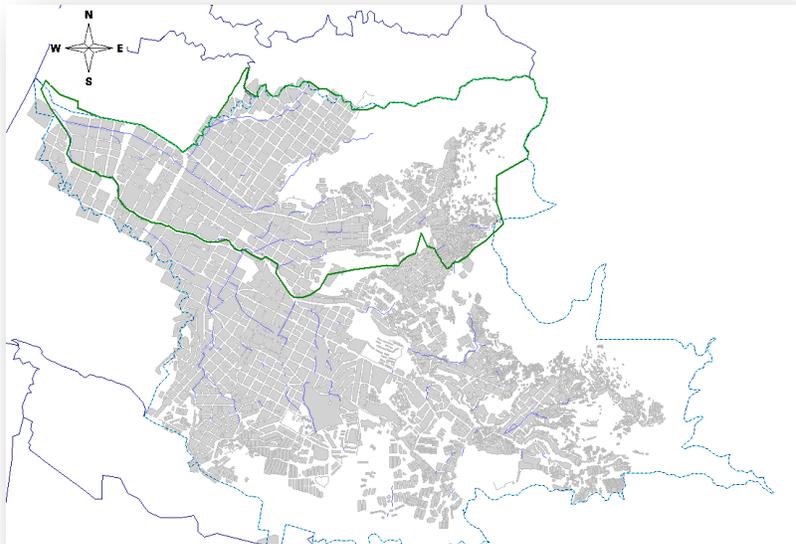


Figura 22. Gráfica del sector y la cuenca sanitaria Santa Helena

El sector está compuesto principalmente por usuarios residenciales como se muestra en la Figura 23. Casi el 86% de los usuarios es residencial y los usuarios comerciales ocupan un 13% del total de los usuarios. El porcentaje más alto de los usuarios residenciales se encuentran en el Estrato 3, y en el sector las viviendas típicas son

casas unifamiliares, por lo cual las redes tienen varias acometidas directamente conectadas, en la zona alta del sector hay varias descargas de aguas combinadas vertiendo directamente a las quebradas, por lo cual se requiere ejecutar el proyecto que recoja las descargas y dentro del mismo enmarcar la reposición de las redes para no impactar dos veces la misma comunidad.

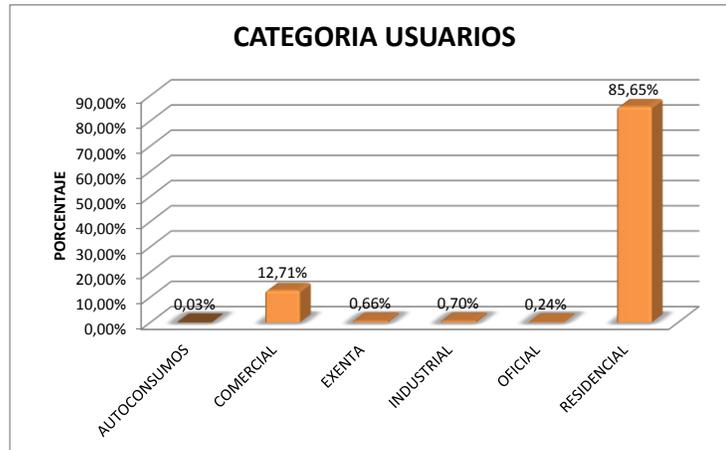


Figura 23. Categoría de los usuarios



Figura 24. Estratificación de los usuarios residenciales

Las redes del sector de la parte norte de la cuenca Santa Helena suman un total de 112 km, con un 91,2% de redes secundarias y un 8,8% de colectores, el porcentaje más alto de las redes son combinadas y tienen diámetros entre los 200 y 400 mm, y en material de concreto, siguiendo en porcentaje las redes en PVC (Ver Figura 25 y Figura 26).

Tabla 11. Clasificación de las redes según tipo de red

| TIPO RED | PORCENTAJE |
|------------|------------|
| COLECTOR | 8,8% |
| SECUNDARIA | 91,2% |

Tabla 12. Clasificación de las redes según tipo de agua

| TIPO AGUA | PORCENTAJE |
|------------|------------|
| COMBINADAS | 64,7% |
| LLUVIAS | 12,2% |
| RESIDUALES | 23,0% |

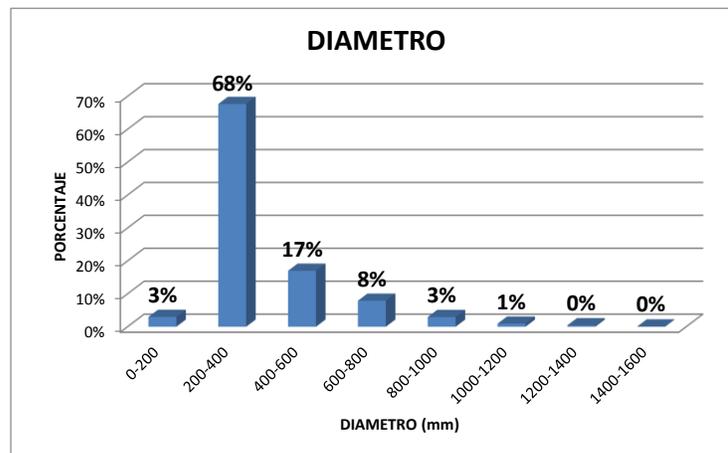


Figura 25. Diámetro de las redes del sector

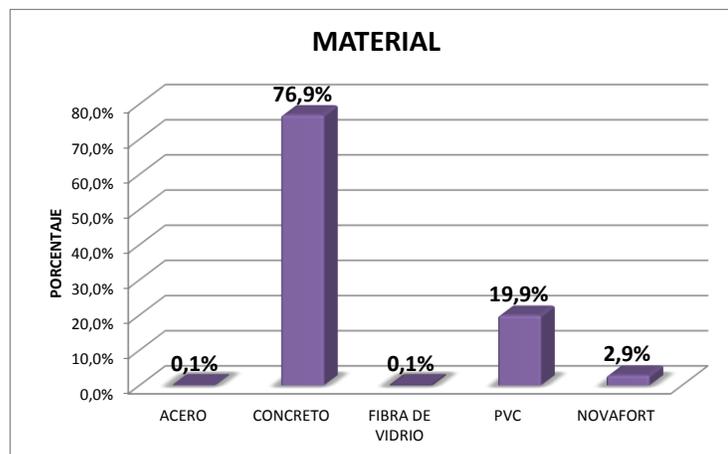


Figura 26. Material de las redes del sector

Los porcentajes más altos de las redes se encuentran en edades inferiores a los 40 años de vida útil, aunque no tienen mucha edad se debe verificar la cantidad de daños

presentados en las tuberías. En el sector se han presentado un total de 880 daños y 1562 obstrucciones desde el año 2003 hasta la fecha, evidenciando problemas principalmente de capacidad hidráulica de la red y desgaste de materiales en otros sectores.

En este sector se han inspeccionado un total de 31 km, cuyos grados de calificación aplicando la metodología de CCTV (EPM, 2010) se relaciona en la Tabla 13, donde el 24% de la longitud inspeccionada fue calificada en GRADO 5 y, el 16% se calificó en GRADO 4.

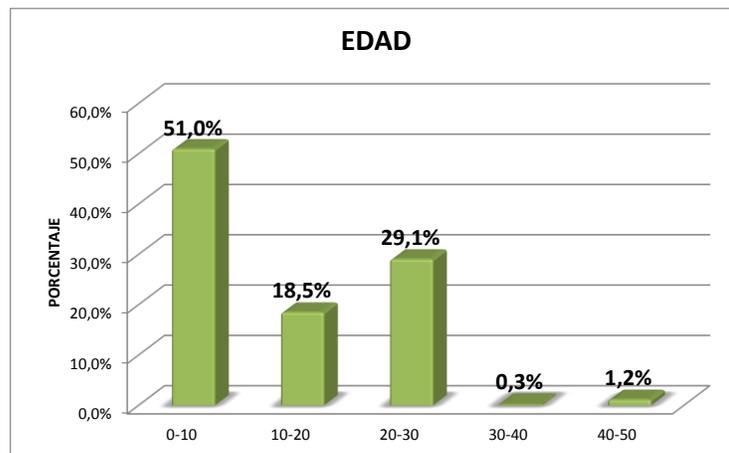


Figura 27. Edad de las tuberías del sector

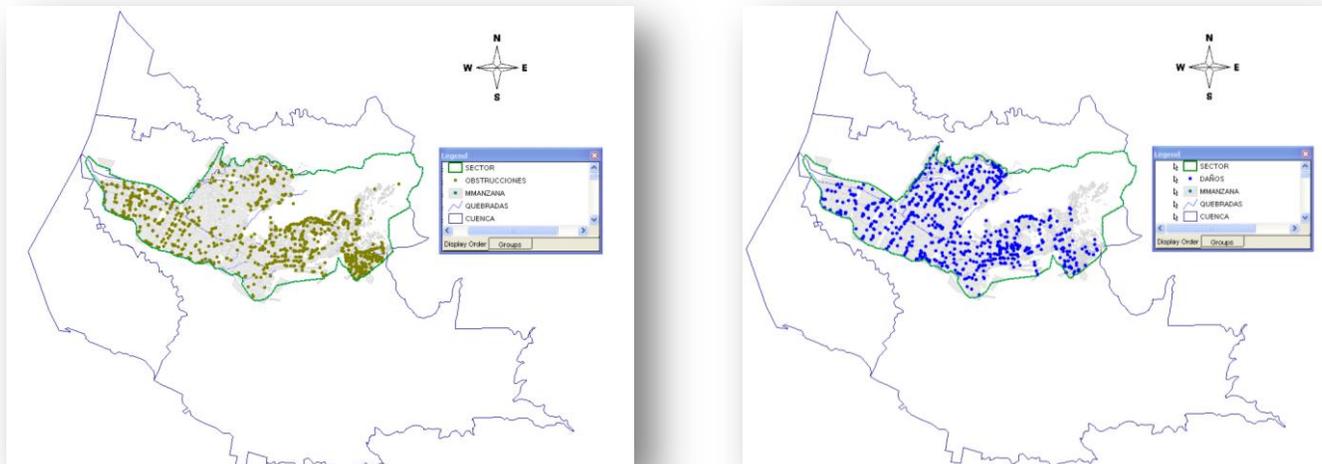


Figura 28. Daños y obstrucciones

Tabla 13. Clasificación de los tramos inspeccionados con CCTV sector cuenca Santa Helena

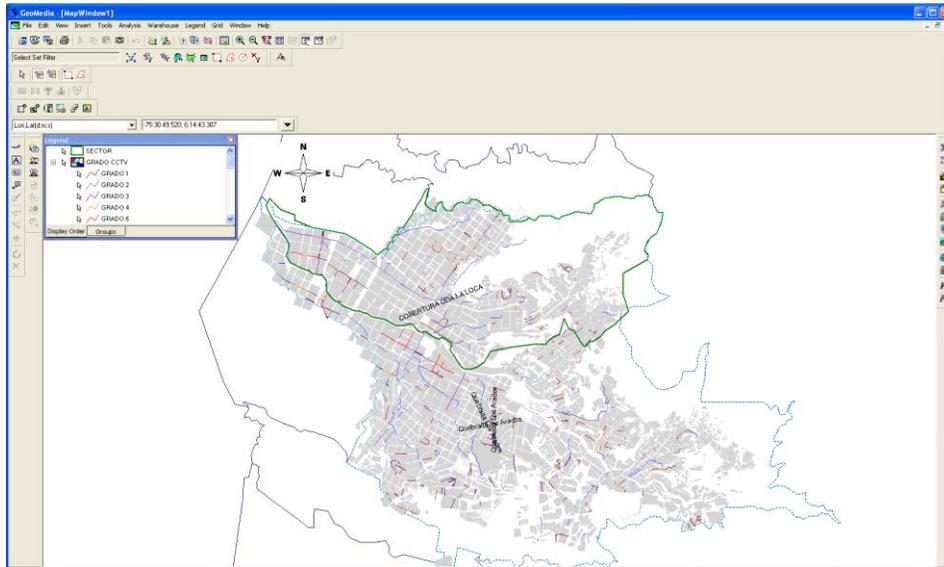
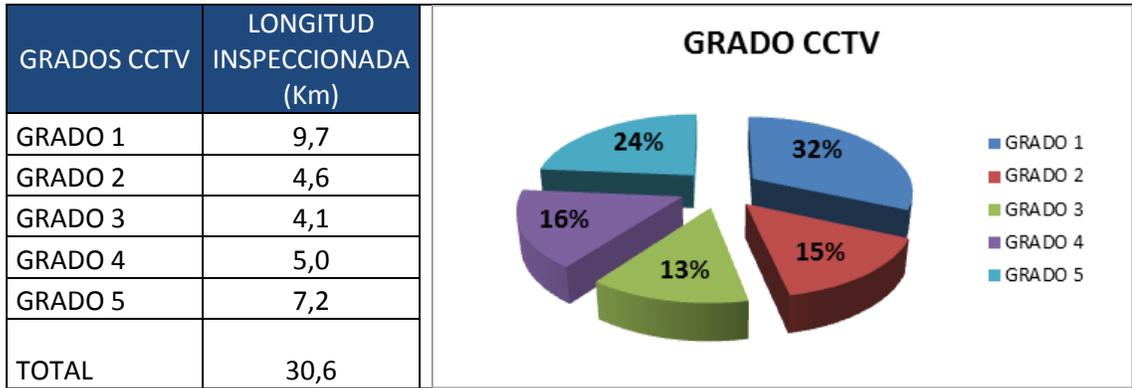
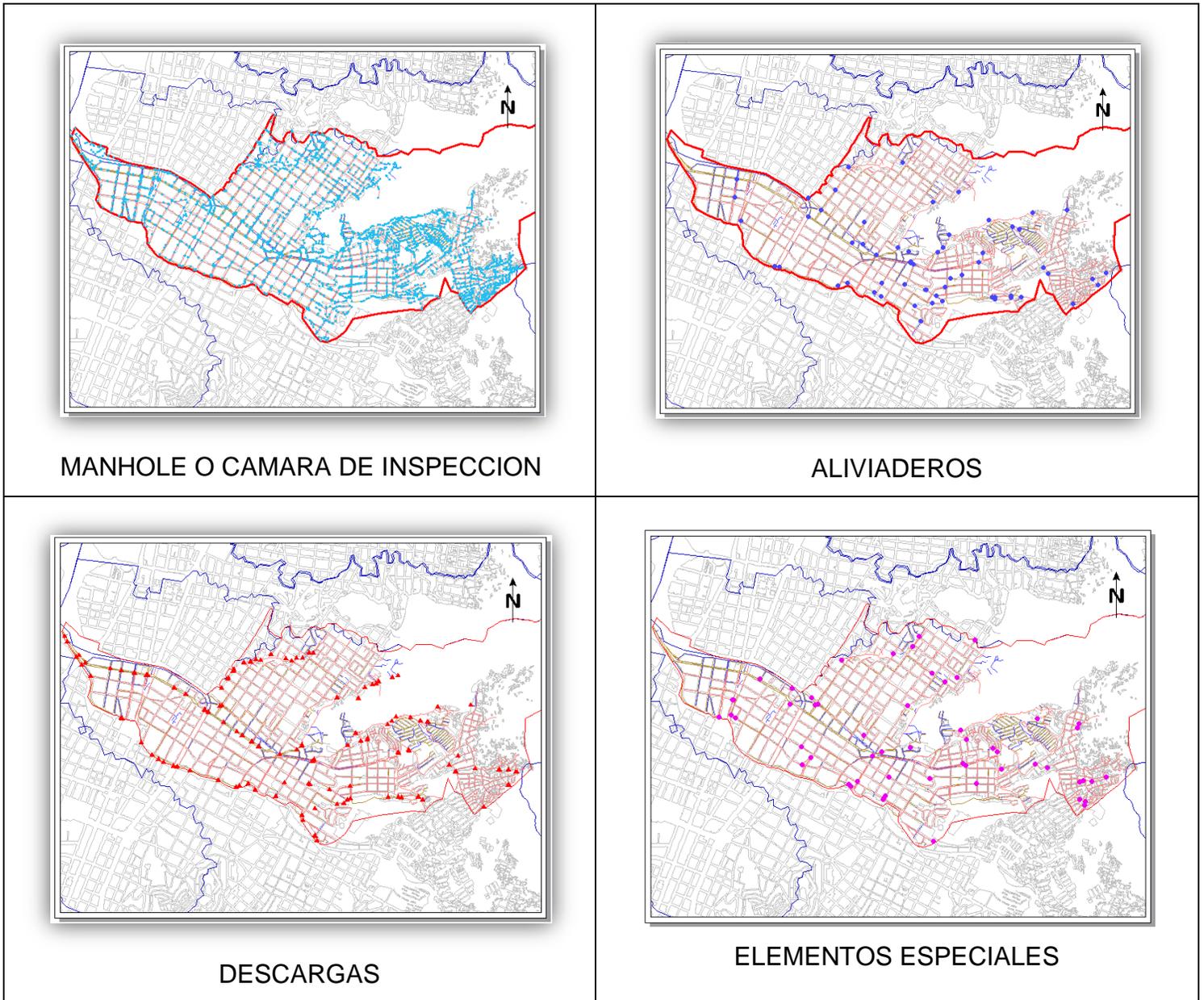
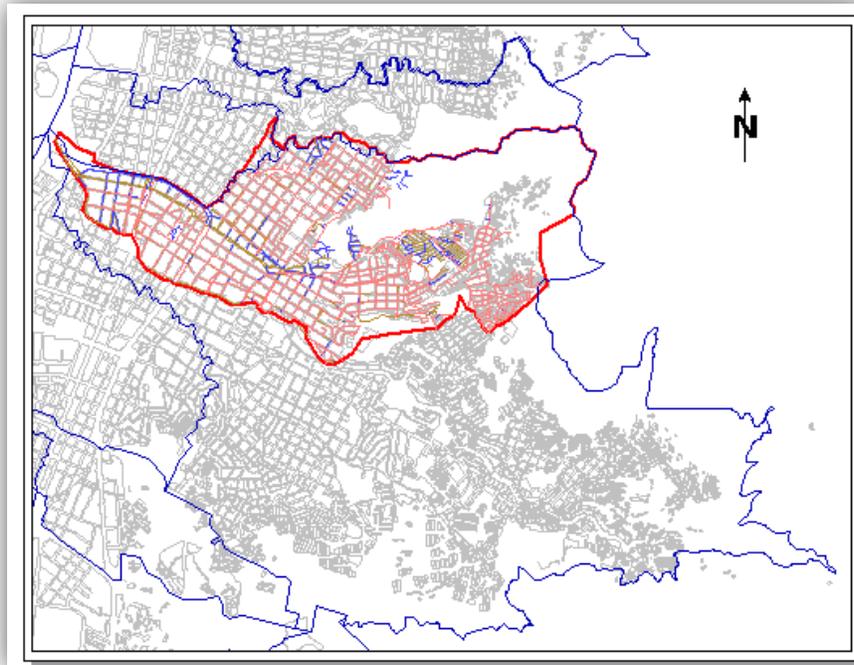


Figura 29. Tuberías inspeccionadas empleando Circuito Cerrado de Televisión

La modelación del sector se realizó en el software SewerGems, para lo cual se exportaron a archivos shape los Maholes, Descargas, Aliviaderos, Tuberías, y los polígonos de las áreas tributarias y posteriormente se importaron a SewerGems empleando la herramienta Modelbuilder.

Figura 30. Capas de elementos modelados del sector cuenca Santa Helena





TUBERÍAS

La asignación de la carga sanitaria se realizó empleando el shape de los usuarios del sector y asignando el caudal sanitario al nodo más cercano (Ver Figura 17). Los caudales residuales tienen una curva patrón que refleja el comportamiento horario a lo largo del día como se observa en la Figura 32. Esta curva se obtuvo del registro histórico de los sensores de nivel ubicados a la salida de la cuenca (Figura 33).



Figura 31. Usuarios del sector cuenca Santa Helena

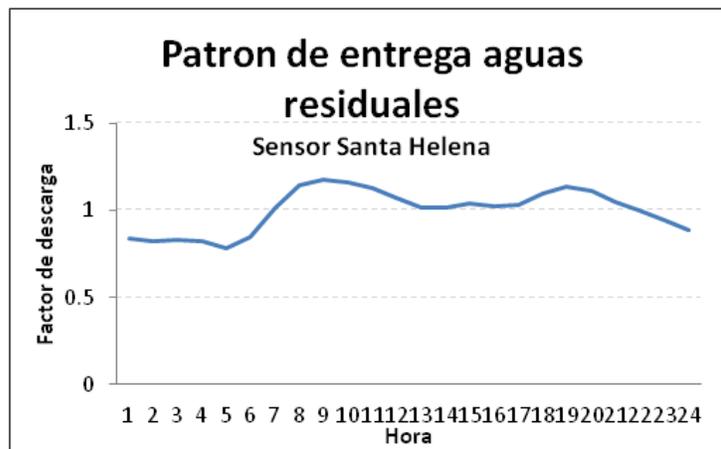


Figura 32. Curva patrón para caudales de agua residual del sector cuenca Santa Helena

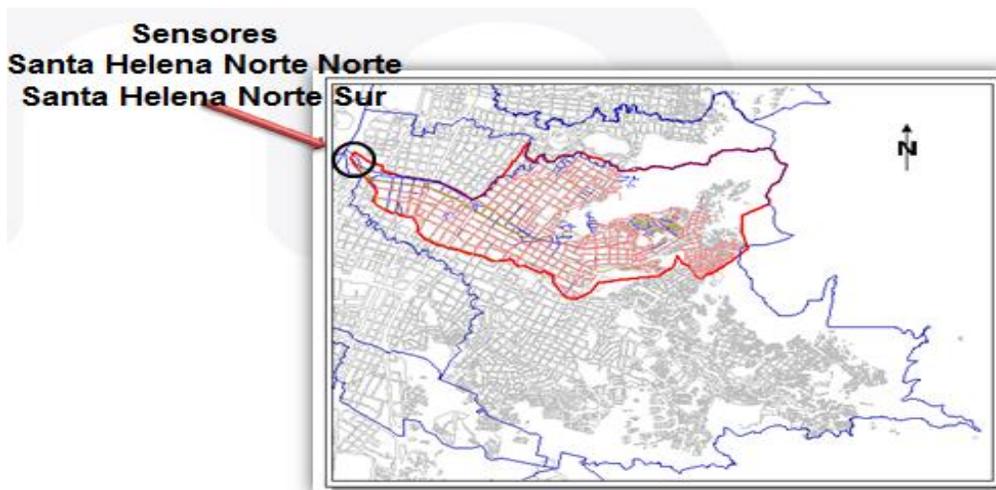


Figura 33. Ubicación de los sensores de nivel de la cuenca

El cálculo del caudal de aguas lluvias se realizó empleando uno de los modelos lluvia escorrentía que incluye el programa SewerGems, el método Racional Simplificado, dicho modelo se basa en la siguiente ecuación:

Fórmula 12.

Donde,

Q = Caudal pico de aguas lluvias (L/s).

C = Coeficiente de escorrentía (adimensional).

i = Intensidad de precipitación (L/s/ha).

A = Área tributaria (ha).

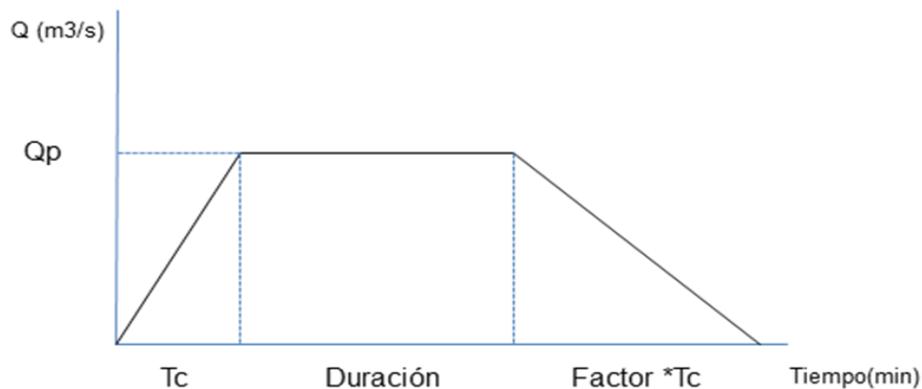


Figura 34. Caudal pico de lluvia del Método Racional

Los datos de entrada para la Fórmula 12 se obtuvieron de trazar las áreas tributarias en el SIG y posteriormente se calcularon los parámetros requeridos como el tiempo de concentración, la pendiente, coeficiente de escorrentía y el área.

El tiempo de concentración se calculó empleando metodologías existentes como FAA, SCS, Kerby, Kirpich, etc (Manual SewerGems, 2007), teniendo en cuenta que el tiempo de concentración debe ser mayor a 3 min e inferior a 15 min, para el caso de aplicación se empleó el de la FAA (Federal Aviation Agency):

$$T_c = 0.03(1.1 - C)L^{0.5}S^{-0.333}$$

| | | | |
|-------|-------|---|-----------------------------------|
| Where | T_c | = | Time of concentration (hr.) |
| | C | = | Rational C coefficient |
| | L | = | Length of overland pipe flow (ft) |
| | S | = | Slope (%) |

El coeficiente de concentración se calculó a partir de la fórmula propuesta en las Normas de Diseño y Construcción de Alcantarillado EPM (2009).

$$C = 0.14 + 0.65 * I + 0.05 * S$$

Donde,

C = Coeficiente de escorrentía (adimensional).

I = Coeficiente de impermeabilidad (adimensional).

S = Pendiente promedio del área tributaria (m/m).

La intensidad de la lluvia se obtiene a partir de las curvas IDF, en este caso se modeló corresponde a un período de retorno TR 10 años, de la estación pluviométrica Villa Hermosa, la cual es la más cercana a la cuenca.

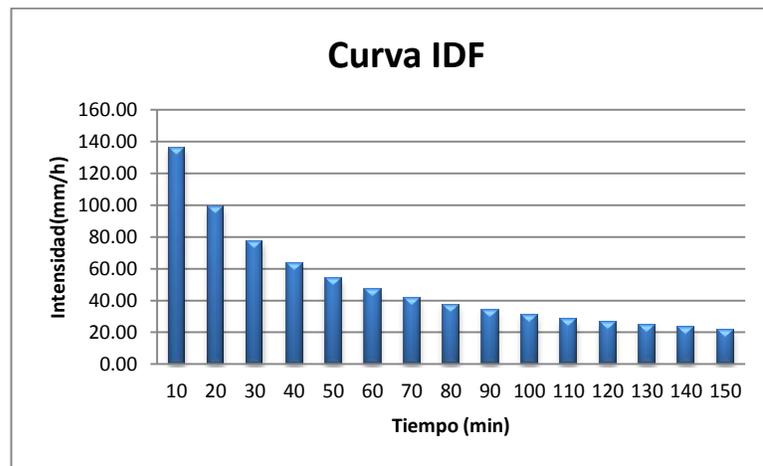


Figura 35. IDF estación Villa Hermosa para TR 10 años

La simulación se realizó para un total de 24 horas, con intervalos de cálculo de 3 minutos, con el fin de disminuir los errores de convergencia. Los resultados de la modelación se muestran en la Figura 36 y la Tabla 14. Las redes en color rojo,

presentaron insuficiencia hidráulica durante la modelación de la curva IDF con TR 10 años.

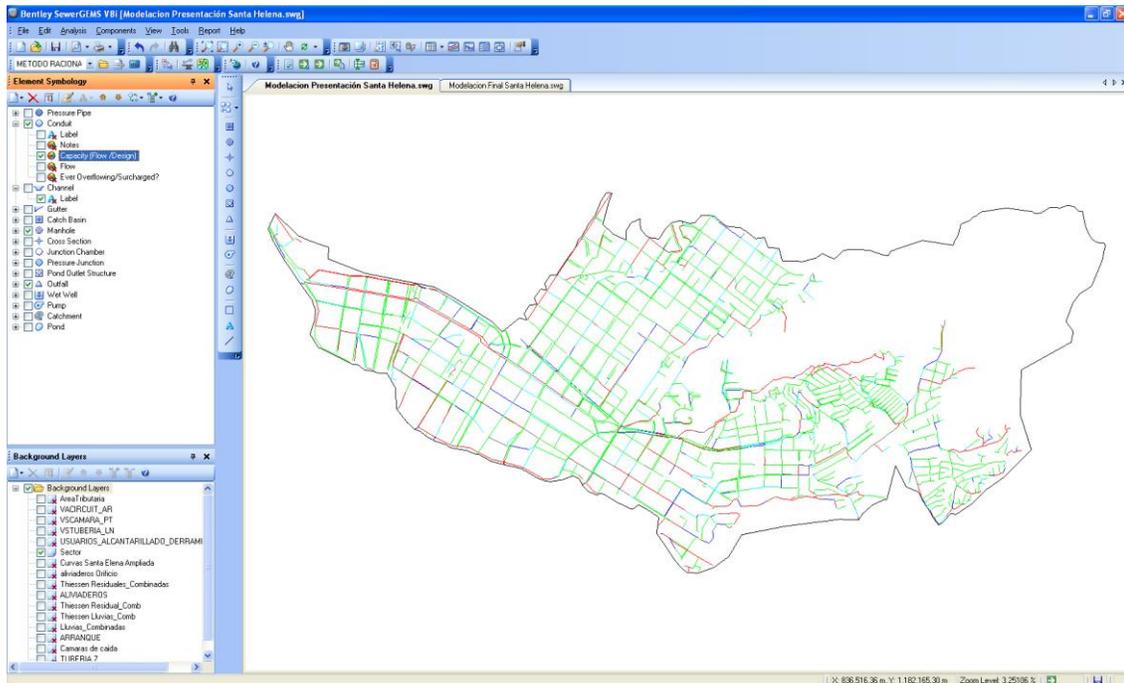


Figura 36. Resultados de la modelación en SewerGems

Tabla 14. Resultados parámetros hidráulicos de las redes del sector Santa Helena

| PARAMETRO HIDRÁULICO | PORCENTAJE | |
|----------------------|------------|-----------|
| | CUMPLE | NO CUMPLE |
| Capacidad Hidráulica | 87% | 13% |
| Velocidad mínima | 80% | 20% |
| Velocidad máxima | 89% | 11% |

Una vez obtenidos los resultados de la modelación hidráulica, el grado de calificación según CCTV, y anexados a la información del Modelo de Red en Geomedia, se procedió a calcular cada uno de los criterios descritos en el numeral 5.4, y posteriormente al cálculo del Índice de Reposición (Capítulo 6) con el cual se construyó el Modelo Decisional para reposición de redes de alcantarillado, los resultados de la aplicación del modelo en el sistema de información geográfica Geomedia se muestra en la Figura 37 y Tabla 15.

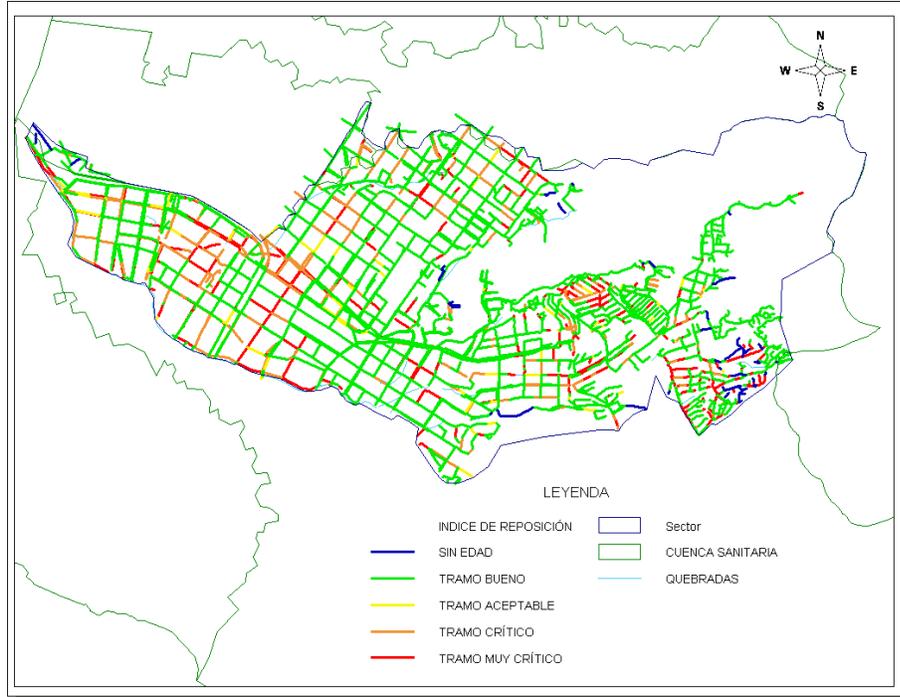


Figura 37. Resultados Índice de reposición sector cuenca Santa Helena

Tabla 15. Criticidad Índice De Reposición

| CRITICIDAD DEL TRAMO | LONGITUD (Km) |
|----------------------|---------------|
| ACEPTABLE | 7 |
| BUENO | 38 |
| CRITICO | 24 |
| MUY CRITICO | 43 |
| TOTAL | 112 |

Tabla 16. Comparación de resultados Índice de Reposición..

| CRITICIDAD DEL TRAMO | INDICE DE REPOSICIÓN SIN MODELACION NI CCTV | INDICE DE REPOSICIÓN CON MODELACION Y CCTV |
|----------------------|---|--|
| ACEPTABLE | 4% | 6% |
| BUENO | 69% | 34% |
| CRITICO | 14% | 22% |
| MUY CRITICO | 13% | 39% |

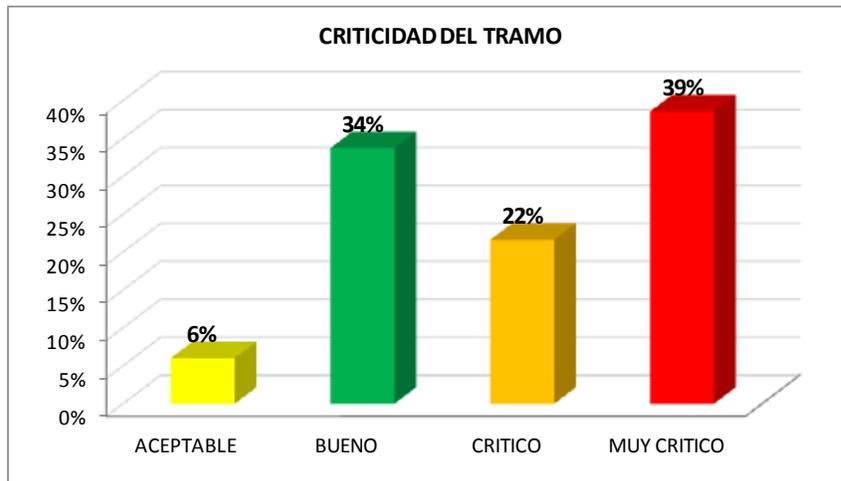


Figura 38. Clasificación de los tramos según criticidad del Índice de Reposición

Se sugiere realizar un proyecto de reposición en la zona que incluya todos aquellos tramos calificados como Críticos y muy críticos, e incluir todos aquellos tramos sin Edad para la inspección con CCTV. En un máximo de 2 años se debe realizar una actualización del Índice de Reposición para evaluar nuevamente el estado de las redes. La evaluación de los costos para la reposición de las redes se muestran en la Tabla 17, tomando como base los valores unitarios de la base de datos SAO de Empresas Públicas de Medellín, y de igual manera asumiendo un 20% del total de construcción en metodologías sin zanja o rehabilitación de redes, para aquellas zonas de alto tráfico vehicular o de alto impacto para la comunidad.

Tabla 17. Presupuesto inicial para proyecto de reposición

| PRESUPUESTO | | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------|--------|----------|-----------------|--------------------------|--|
| ITEM | ACTIVIDAD | UNIDAD | CANTIDAD | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL | OBSERVACIONES |
| DIAGNÓSTICO | | | | | | |
| 1 | Inspección de redes con TV | m | 798 | \$ 22,000.00 | \$ 17,556,000 | Aquellos tramos sin edad calculada, sin resultados de inspección CCTV y que en la modelación aparecen sin capacidad hidráulica |
| TOTAL DIAGNÓSTICO | | | | | \$ 17,556,000 | |
| DISEÑO | | | | | | |
| 2 | Diseño de redes | m | 1,504 | \$ 40,000.00 | \$ 60,160,000 | Aquellas redes sin capacidad hidráulica |
| TOTAL DISEÑO | | | | | \$ 60,160,000 | |
| CONSTRUCCIÓN | | | | | | |
| 3 | Construcción redes por zanja | m | 53,804 | \$ 1,250,000.00 | \$ 67,255,000,000 | |
| 4 | Rehabilitación de redes | m | 13,451 | \$ 1,500,800.00 | \$ 20,187,260,800 | |
| TOTAL CONSTRUCCIÓN | | | | | \$ 87,442,260,800 | |
| TOTAL | | | | | \$ 87,519,976,800 | |
| INTERVENTORÍA | | | | | | |
| | Interventoría (12%) | GL | | | \$ 10,493,071,296 | |
| | IVA interventoría | | | | \$ 1,678,891,407 | |
| TOTAL INTERVENTORÍA | | | | | \$ 12,171,962,703 | |
| PRESUPUESTO E INTERVENTORÍA | | | | | \$ 99,691,939,503 | |

Los resultados fueron obtenidos del aplicativo en el SIG Geomedia del Índice de Reposición, el cual se encuentra a disposición para los funcionarios de EPM, con datos actualizados diariamente en la zona del Área Metropolitana, aunque por ahora la modelación debe realizarse en el software SewerGems y luego relacionarla al aplicativo.

8. CONCLUSIONES

El modelo decisional para la reposición de redes de alcantarillado se basa en el conocimiento de las variables que rigen el comportamiento hidráulico, estructural y ambiental de la red y la calificación y ponderación de cada una de ellas en un indicador denominado Índice de Reposición. Esta herramienta resulta ser muy útil para las fases de planeación y presupuesto de los proyectos a ejecutar en el corto y mediano plazo.

El cálculo del Índice de Reposición puede realizarse empleando la plantilla en el Sistema de Información. Por el momento, sólo para las redes ubicadas dentro del Área Metropolitana, podrá emplearse en otros sectores en la medida en que la información sea cargada al modelo de aguas, o de igual manera pueden usarse los criterios y realizar los cálculos usando las hojas de Excel.

Al aplicar el modelo decisional, se obtuvo un estimativo de la criticidad de los tramos, incluyendo parámetros estructurales, ambientales e hidráulicos, la combinación de estos parámetros permite desde diferentes puntos de vista establecer planes de reposición, evaluación e inspección de la red. Actualmente en Empresas Públicas de Medellín se construye el Plan de Reposición con base al Modelo Decisional para los próximos 10 años, período durante el cual se espera actualización de la información, la ejecución de un contrato de modelación de las redes y un buen avance en la inspección con CCTV del sistema para mejorar los resultados del modelo.

El Modelo Decisional es un modelo dinámico, basado en la información disponible en el sistema, los criterios se establecieron de manera que todos fueran adimensionales con el fin de poder ponderarlos todos en una misma ecuación, y basados en el análisis multiobjetivo se asignaron pesos a cada variable para calificar según la incidencia de las variables en el comportamiento de la red. Resulta importante que la información sea

espacial, al igual que los resultados, con lo cual pueden identificarse frentes o zonas de trabajo para impactar lo menos posible a la comunidad.

El caso ideal para el uso de esta metodología sería contar con la inspección con equipos de CCTV para todo el sistema, por ahora no es posible debido a la gran longitud de redes, actualmente se adelanta un proyecto para realizar la inspección del total de las redes en los próximos años. El uso del modelo decisional no exime a la empresa de la inspección de todo el sistema, ya que el modelo muestra una inferencia del estado de la red, y en varias ocasiones se ha podido comprobar que el 80% de los resultados del modelo concuerdan con la realidad.

Asociada a la gran longitud de redes que se manejan en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el modelo decisional resulta ser una herramienta de ayuda a la priorización de los sectores que requieren pronta intervención, y a la formulación de planes de reposición e incluso a la priorización para la inspección con CCTV.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar realizando proyectos que actualicen la información de las bases de datos SIGMA, GESTA y CCTV, y de igual manera relacionar todos los resultados directamente al tramo de red en el cual se realizan los trabajos, y de ésta manera disminuir el error en el cálculo del índice de reposición.

Se sugiere emplear el criterio de cada ingeniero para cuantificar las redes a reponer, según el tipo de proyecto que se construya en la zona, la edad de las tuberías y los resultados de todos los criterios.

A corto plazo se puede aplicar un modelo de deterioro de las redes para planear la reposición de las mismas antes de cumplir la vida útil, al igual que se pueden sugerir métodos de rehabilitación según la evaluación de los criterios empleados en el modelo decisional.

La modelación de la red se convierte en un insumo de vital importancia no solo para el modelo decisional, sino también para la empresa, para identificar la capacidad de la red para recibir el caudal de los usuarios adicionales a los que atiende actualmente el sistema.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁVILA R., Humberto. *Renovación y Rehabilitación de Redes de Distribución de Agua Potable y Alcantarillado*. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 2008.
- BOXALL, J., A. POOLADSAZ, S. SAUL, A. J. UNWIN, D. M., *Estimation of burst rates in water distribution mains*. *Water Management*, 2007.
- BURKHARD, R., GONZÁLEZ L., S. *Sewer rehabilitation planning – priority and cost planning using GIS*. 2006.
- CASTRELLÓN, F. *Consultoría para estudios y asesorías hidráulicas y sanitarias*. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. 2004.
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.S.P. *Normas de Diseño y Construcción de Alcantarillado*, 2009.
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.S.P. *Metodología para el diagnóstico y evaluación de redes de Alcantarillado con CCTV*. 2010.
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.S.P. – UNAL. *Metodología para la evaluación del balance hídrico en una cuenca sanitaria - cuenca de la quebrada La Picacha*. 2010.
- GRUCON & SOPRIN. *Estudio de rehabilitación del sistema de alcantarillado de la ciudad*. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. 1999.
- HERNÁNDEZ C, L. A. *Metodología para modelar el sistema de drenaje urbano (alcantarillado) a partir de una proyecto piloto*. EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.S.P, 2007.
- National Association of Clean Water Agencies (NACWA). *Implementing Asset Management, A practical guide*. 2007.
- PAVCO. *Manual técnico NovaFort*, 2004.

POSADA E, John J. *Modelo para priorizar la inspección de redes de alcantarillado*. Universidad de los Andes. 2008.

[Saegrov, sveinung](#). *Computer aided rehabilitation for sewer and storm water networks*. Editorial [International Water Association](#), 2006.

TRUJILLO A., Raúl. *Seminario "Panel Rehabilitación de Sistemas de Alcantarillado"*. Stein & Partner engineering company. EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.S.P. 2008.

VILLANUEVA B., Ángel. MONTERO R., Carlos. *Proyecto Europeo CARE-S: Gestión Óptima de la Rehabilitación del alcantarillado*. Barcelona, 2006.

www.stein.de/awards_en.php, 2008 (vista el 3 de Febrero de 2009).

11. ANEXOS

1. Archivo de Geomedia con los cálculos de los indicadores e Índice de Reposición
2. Archivos MDB empleados para la modelación hidráulica
3. Tabla de resultados del Índice de Reposición
4. Manual para el uso del Modelo Decisional