

Modelo de gestión para la rehabilitación de redes troncales de alcantarillado

Management model to restore sewerage main networks

ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ¹ Y HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ²

1. Profesor titular del Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Profesor asistente del Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Recibido: 20/05/2010 Aceptado: 25/06/2010

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En este artículo se expone un modelo de gestión para reparar redes troncales de alcantarillado, desarrollado por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería. A partir de este modelo, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá construyó y desarrolló una herramienta informática soportada por el Sistema de Información Geográfica, que permite evaluar variables de gestión y reparación de redes troncales de alcantarillado, estudiando sobre todo topología, población, uso del suelo, hidrología e hidráulica de flujo inestable, así como características geotécnicas, estructurales, ambientales y económicas para elaborar propuestas de reparación del sistema.

Palabras clave: alcantarillado, reparación, modelo de gestión, sistema de información geográfica

Abstract

This article presents the general outline of a management model for restoring sewerage main networks developed by the Centro de Estudios Hidráulicos, Escuela Colombiana de Ingeniería. Taking this model as a starting point, the Aqueduct and Sewerage Company of Bogotá has built and developed a computational tool, supported by GIS. With this tool you can evaluate variables involved in the management and restoration of sewerage main networks emphasizing in topological aspects, population, land use, hydrology, and hydraulics of unsteady flow, as well as geotechnical, structural, environmental, and economic features to propose alternatives for restoring the system.

Keywords: sewerage, restoration, management model, geographic information system.

INTRODUCCIÓN

El Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito realiza para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá el proyecto de investigación “Desarrollo de un modelo de gestión para la rehabilitación de la red troncal de alcantarillado”. En el presente proyecto intervienen quince especialistas, adscritos principalmente al Centro de Estudios Hidráulicos y a otros Centros de Estudios de la Escuela.

Esta investigación, que se viene llevando a cabo desde el mes de diciembre de 2009, tiene como objetivo principal el planteamiento y desarrollo de un modelo de gestión para la rehabilitación de una red troncal de alcantarillado, y se incluyen su diseño y aplicativo, que debe estar soportado en una plataforma de Arc SIG. Para el planteamiento del modelo se han considerado varios aspectos, pero principalmente se han involucrado los correspondientes a la topología de la red troncal, la hidrología y los caudales de retorno, los análisis de la capacidad hidráulica del sistema en condiciones de flujo no permanente, las condiciones geotécnicas y estructurales de las redes, las características de la calidad del agua, las técnicas disponibles para reparación, renovación, remplazo y desarrollo de obras complementarias, y la evaluación financiera y de costos.

ANTECEDENTES

Las sociedades organizadas necesitan transportar y disponer adecuadamente de sus residuos líquidos para garantizar condiciones de salubridad y comodidad en las zonas urbanas. También deben construir sistemas para captar, conducir y evacuar la escorrentía de aguas lluvias, de manera que se pueda garantizar la seguridad de la vida y los bienes de la gente, al igual que la comodidad y facilidad en la movilidad. Para satisfacer estas necesidades en las ciudades se construyen sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial, o combinado, que en general están compuestos por redes menores, secundarias y troncales.

Adicionalmente, de acuerdo con el crecimiento y la evolución de la sociedad, estos centros urbanos se transforman y por tanto los sistemas de alcantarillado crecen, se envejecen y deterioran, condiciones que obligan a adecuar, mantener y mejorar estos sistemas de transporte.

La evolución de los núcleos urbanos y de estos sistemas de alcantarillado hace necesario realizar una gestión que conduzca necesariamente al planteamiento y ejecución de planes y obras para su rehabilitación, de tal manera que se adecue a las nuevas condiciones impuestas. Esta gestión tiene especial importancia y complejidad, debido principalmente al número de variables involucradas en las conducciones mayores, las cuales conforman la espina dorsal del sistema, denominado el sistema troncal de alcantarillado.

No invertir en obras de rehabilitación para un sistema troncal de alcantarillado puede ocasionar altos costos de indemnización y reconstrucción de la infraestructura deteriorada o destruida, ya que esto representa un riesgo para la sociedad y para las finanzas de las empresas encargadas de su operación y mantenimiento.

El reto presente y futuro para el operador de un sistema troncal de alcantarillado consiste en mantener eficiente un sistema que se envejece y deteriora, con la mínima cantidad de recursos, y a la vez garantizar que se puede adaptar a continuas y permanentes variaciones.

En la actualidad se cuenta con diferentes técnicas para el mantenimiento, reparación y rehabilitación del alcantarillado que ofrecen a los gestores alternativas de solución con diversos costos, situación que obliga a realizar análisis de mayor envergadura para brindar soluciones óptimas desde los puntos de vista técnico y económico. Entre estas posibilidades de operación y manejo también se debe incluir la incorporación de estructuras especiales, como tanques y lagunas de amortiguamiento, alivios y divisores de caudal, compuertas, etc., que permiten el trabajo adecuado del sistema, sobre todo si se cuenta con estaciones de medición y control y modelos computacionales de predicción y operación del sistema, integrados en un centro de control y monitoreo de las operaciones.

La distribución espacial de los sistemas de alcantarillado y su dinámica, la gran cantidad de información necesaria para la gestión de la rehabilitación y la disponibilidad del almacenamiento de información exigen el desarrollo de modelos predictivos, soportados sobre plataformas computacionales SIG que faciliten el manejo y la visualización de los resultados, de modo tal que se constituyan en herramientas de soporte efectivas. Estos argumentos obligan a desarrollar herramientas computacionales que posibiliten el manejo de mucha

información, que evalúen los aspectos técnicos y económicos involucrados y que faciliten la toma de decisiones para que el gestor del sistema de alcantarillado pueda seleccionar los proyectos de rehabilitación más adecuados, que garanticen la mejor inversión de los recursos disponibles.

MARCO CONCEPTUAL

La rehabilitación de un sistema de alcantarillado forma parte de las labores generales de operación y mantenimiento y, por tanto, está incluida dentro de la gestión. Como el objetivo principal es definir y establecer las características de una herramienta de gestión que permita plantear y desarrollar adecuadamente las labores de rehabilitación, es necesario precisar su marco de referencia y definir una serie de términos técnicos involucrados en el tema.

Los alcantarillados son sistemas productivos que prestan un servicio de recolección y transporte de agua desde los puntos de consumo o entrada hasta uno o varios puntos de descarga (o tratamiento y descarga). Son sistemas ramificados complejos, compuestos por elementos de diferentes características para cubrir una región geográfica urbanizada. Los alcantarillados son básicamente de dos tipos: separados o combinados (unitarios). Los alcantarillados separados se emplean para transportar aguas residuales domésticas, industriales y comerciales, en cuyo caso se pueden denominar también alcantarillados sanitarios, o para transportar aguas provenientes de la precipitación atmosférica, en cuyo caso se denominan alcantarillados pluviales. En los alcantarillados combinados se reúnen y transportan tanto aguas residuales como aguas lluvias.

La operación de estos sistemas de alcantarillado exige algunas veces, debido a la extensión y complejidad de las redes municipales, realizar subdivisiones generalmente relacionadas con la extensión del área servida y el tamaño de los conductos. Es posible hacer una división entre redes locales, de tal manera que se conformen tramos iniciales de alcantarillas, ramales secundarios y colectores secundarios, redes troncales conformadas por colectores principales, interceptores y emisarios. Esta subdivisión resulta muy útil para las labores de modelación, operación, mantenimiento, etc.

Gestión de alcantarillados

La gestión de un sistema de alcantarillado hace referencia a las acciones y diligencias que permitan obtener unos objetivos claros y precisos que aseguren el funcionamiento eficiente del sistema, con los menores costos; por tanto, la administración de los recursos disponibles será clave para que el sistema capte, conduzca y entregue los caudales de aguas residuales sin afectar la salubridad, la seguridad y el medio ambiente dentro del área urbanizada y fuera de ella.

Durante muchos años se ha creído que los sistemas de alcantarillado pueden operar solos y que únicamente se debe hacer un monitoreo y un control periódico sobre las estaciones elevadoras. Por esto el mantenimiento de los sistemas sólo se ha efectuado en forma reactiva ante la ocurrencia de situaciones que afectan su operación y se actúa únicamente cuando la comunidad reporta el fallo. Durante la vida útil de la obra, también es frecuente olvidar el envejecimiento y el deterioro de los alcantarillados debido a que realmente su vida se ha prolongado gracias a los diseños conservadores derivados de los factores de seguridad aplicados en la determinación de los caudales, en los diseños estructurales y en las consideraciones geotécnicas. Los fallos en el sistema, al igual que con el mantenimiento, se han atendido una vez que ocurre el problema, para superar la emergencia, y asumiendo los costos producidos por daños a terceros.

En la actualidad, estas condiciones han cambiado y las empresas prestadoras del servicio de alcantarillado entienden y reconocen la necesidad de conservar, controlar, mantener y operar los sistemas, mediante manejos predictivos y no reactivos. Adicionalmente, a causa del establecimiento de normas ambientales más rígidas que buscan minimizar los impactos adversos que producen los sistemas mal manejados y que operan deficientemente, se ha venido consiguiendo este propósito.

En el futuro próximo es necesario realizar una gestión integral del alcantarillado de las zonas urbanas, de tal manera que se minimicen los riesgos sobre la salubridad, la seguridad y la movilidad pública, teniendo en cuenta que estos sistemas hidráulicos dinámicos, extendidos geográficamente y construidos a lo largo del tiempo con técnicas y materiales diferentes, sometidos a variaciones en las condiciones de operación, geotécnicas y medioambientales, son muy susceptibles de presentar en el tiempo dificultades que hay que prever y corregir.

Adicionalmente, se requiere considerar el sistema de alcantarillado en conjunto con las plantas de tratamiento y los cuerpos naturales de agua, receptores finales de las aguas residuales. De acuerdo con lo anterior, para la gestión de un sistema de alcantarillado se debe disponer de la máxima cantidad de información, producida y validada por especialistas de cada una de las áreas técnicas involucradas, de tal modo que sea posible efectuar un análisis de las inversiones necesarias, contrastadas con los recursos disponibles, para realizar inversiones que garanticen el cumplimiento de los objetivos para diferentes horizontes de análisis.

Operación de alcantarillados

La operación se enfoca en el funcionamiento del sistema de alcantarillado, que incluye el mantenimiento y la rehabilitación, teniendo presente que como todo sistema productivo el funcionamiento ocasiona desgaste y deterioro de sus componentes. Los alcantarillados están sometidos a procesos de corrosión, erosión, obstrucción, sedimentación, sobrecarga, etc., que pueden llevar al colapso en puntos específicos, lo cual repercute en el funcionamiento de los sectores aguas arriba de éste.

Los conceptos modernos de operación exigen un conocimiento exacto del sistema y de todos los activos que lo componen, e incluyen un monitoreo continuo del funcionamiento del sistema, así como de modelos predictivos de su funcionamiento para diferentes eventos, con variadas probabilidades de ocurrencia y modificaciones en el entorno urbano. A diferencia del pasado, hoy por hoy, en la operación de los sistemas de alcantarillado es indispensable cumplir permanentemente con tareas de mantenimiento, monitoreo, control, modelación, actuación y rehabilitación.

Mantenimiento de alcantarillados

El mantenimiento se define como todas las acciones que se deben ejecutar sobre los activos del sistema de alcantarillado con el fin de mantener su funcionamiento adecuado, de forma tal que se garantice la salubridad pública y se disminuyan los riesgos a la comunidad, así como también que se asegure su movilidad, objetivos que coinciden plenamente con los objetivos del sistema de alcantarillado. Su mantenimiento adecuado garantiza

y prolonga su vida útil, con lo cual ahorra en inversiones de sustitución.

Existen dos modos de hacer el mantenimiento: el reactivo y el predictivo o planeado. El mantenimiento reactivo se realiza cuando aparece un reporte sobre el funcionamiento deficiente del sistema en un punto o zona. En ese caso, los recursos deben estar disponibles para solucionar la emergencia y restablecer lo antes posible la normalidad del servicio. En el mantenimiento predictivo o planificado se tratan los problemas potenciales antes de que ocurra la falla, el trabajo es proactivo y su objetivo es reducir los riesgos de falla.

Para efectuar el mantenimiento preventivo planeado es indispensable ejecutar tareas rutinarias de localización e inspección, razón por la cual hoy en día es prioritario que un operador de alcantarillado moderno cuente con una base de datos geográfica confiable, donde se tengan todas las características relevantes de la red, en lo posible que conserve registros de su estado físico y operativo y, lo más importante, que su actualización sea ágil y permanente. Ahora se puede contar también con elementos de monitoreo remoto permanente de la operación del sistema, que ayudan a maximizar la eficiencia de las labores de planificación y ejecución del mantenimiento. Fenómenos como la corrosión interna por la acción de los sulfuros, o la externa de suelos agresivos, las sobrecargas sobre los elementos estructurales, como las producidas por los sismos, son muy difíciles de prever y cuantificar, aunque existan diversos modelos para tratar de estimarlos. Otros factores, como los bloqueos por mal uso del sistema, son más difíciles de predecir. Estas razones pueden conducir a que la mejor alternativa sea efectuar inspecciones periódicas, con intervalos que se ajustan según se adquiera un conocimiento del comportamiento en el tiempo del deterioro de los activos.

Localización de los activos del sistema de alcantarillado

El primer paso en las labores de mantenimiento y operación de alcantarillados es verificar la exactitud y veracidad de los registros existentes sobre la ubicación y características de los elementos que conforman el sistema, para iniciar el estudio juicioso de los elementos sobre los que se tenga duda. Esta información se puede recopilar por medios tradicionales topográficos o por vías más rápidas pero menos precisas, como el uso de

sistemas de posicionamiento global (GPS, por su sigla en inglés). Es frecuente que las tapas estén cubiertas por capas de suelo o pavimento, casos en los que se utilizan detectores de metales o sondas electrónicas o de radar para su ubicación. Así mismo, en las labores de inspección, recopilación o validación de la información hay que determinar las cotas de fondo de los pozos, las cotas de batea de los tramos de conducción que llegan y salen de cada estructura inspeccionada, así como sus diámetros y materiales. Cuando se realiza el estudio de localización del sistema de alcantarillado, es necesario elaborar un registro de cada una de las estructuras especiales, tales como alivios, sifones invertidos, estructuras de división del flujo, almacenamientos, entre otras.

Inspección del alcantarillado

La inspección del alcantarillado se debe realizar después de que la campaña de localización, en la zona de estudio, está completa y se ha finalizado. Estas labores de inspección se efectúan usando técnicas que van desde inspección personal directa, hasta inspecciones remotas con equipos electrónicos. Cuando el acceso es limitado y la inspección no puede ser personal, el sistema más utilizado es la inspección con equipos CCTV, mediante el cual la cámara de video se monta sobre un elemento móvil autopropulsado, controlado remotamente desde un vehículo adecuado con consolas de comando y registro y donde la cámara se acompaña con reflectores de luz. Las unidades móviles pueden ser de flotadores o vehículos de ruedas, dependiendo de la profundidad de la lámina de agua. Cuando el conducto está parcial o completamente lleno de agua, la inspección se hace utilizando dispositivos de sonar para la parte sumergida y cámaras de CCTV para la zona en la que no existe flujo. Algunos equipos con cámara de video o sonar se acompañan de dispositivos perfiladores láser que proyectan un haz de luz sobre las paredes del conducto, condición que permite establecer deformaciones o anomalías en la conducción que a simple vista no son detectables. Otra técnica para la inspección del alcantarillado es la que emplea imágenes térmicas, en la que se usa una cámara infrarroja.

Limpieza del alcantarillado

La inspección rutinaria del alcantarillado permite identificar y mostrar los problemas típicos que pueden requerir un mantenimiento básico, es decir, limpieza. Los problemas más frecuentemente encontrados en los alcantarillados, que ocasionan una reducción de la capacidad del sistema o un deterioro estructural de éste, son los siguientes:

- Sedimentación
- Acumulación de grasa
- Bloqueo
- Penetración de raíces
- Intrusión de tuberías laterales

Estos inconvenientes pueden eliminarse utilizando diferentes técnicas de limpieza de alcantarillado, las cuales pueden incluirse en planes de mantenimiento planeado o reactivo, para facilitar labores de inspección o para iniciar trabajos de rehabilitación.

En el alcantarillado a superficie libre, la limpieza se hace para eliminar materiales acumulados, tales como grasas, aceite, basuras y sedimentos. Además, se utiliza para corregir defectos estructurales, como sellos o uniones que sobresalen y la intrusión de raíces, los cuales pueden causar también bloqueos que pueden removerse en la operación de limpieza.

Es posible limpiar las alcantarillas con métodos hidráulicos o mecánicos, o una combinación de los dos. En las alcantarillas de gran tamaño, donde la entrada de hombres es relativamente fácil y donde las condiciones de seguridad lo permitan, la limpieza puede ser manual, con mangueras a presión y cepillos de lavado, y para eliminar los obstáculos más grandes y de escombros el personal podrá utilizar herramienta y medios de transporte comunes usados en trabajos subterráneos. Técnicas como la limpieza hidráulica (*jetting*), dispositivos de varilla (*rodders*), equipos de cablestrante (*winch*), lavado por olas (*flushing*) o trampas de fondo son comunes en las labores de limpieza de alcantarillado.

Monitoreo de un sistema de alcantarillado

El monitoreo es el conjunto de actividades encaminadas a vigilar la operación del sistema con estrategias o mecanismos que permitan conocer en forma periódica

o permanente el desempeño de los componentes del sistema.

En la actualidad, con ayuda de una gran variedad de equipos electrónicos de medición y los sistemas de comunicación, es posible establecer estaciones de observación o de medición, comunicadas con un centro de monitoreo que eventualmente también puede establecerse como centro de control. De acuerdo con el sistema de comunicación y transmisión de información, el monitoreo puede realizarse a intervalos de tiempo predeterminados o de modo permanente, caso en el cual se denomina en tiempo real.

Para un sistema de alcantarillado las principales variables que se monitorean de manera continua son las hidráulicas y las ambientales. Las estaciones de medición se ubican principalmente en puntos de la red troncal, en estructuras especiales que son susceptibles de definir controles hidráulicos o en puntos de la red donde, por las condiciones de la infraestructura, se facilita la instalación de las unidades. Cuando el objetivo del monitoreo tiene que ver con aspectos ambientales hay que efectuar siempre mediciones simultáneas de caudal, junto con la de los parámetros de calidad del agua.

El monitoreo puede tener diferentes objetivos, el más simple de los cuales es tener la posibilidad de recibir alarmas o avisos sobre funcionamientos deficientes o exigencias extremas en componentes específicos del sistema. Otro objetivo puede ser medir para conocer el desempeño del sistema en las condiciones de operación de un determinado intervalo de tiempo. En otros casos se debe medir y monitorear cuando hay que calibrar modelos físicos o numéricos del sistema, que pueden

predecir su comportamiento. Más adelante se presenta un esquema general, con los elementos que componen un punto de monitoreo (figura 1).

Control de alcantarillados

Dentro del desarrollo de la gestión de un sistema de alcantarillado el paso siguiente, una vez implantado su monitoreo, es el control del sistema. El control de un sistema de alcantarillado es el conjunto de componentes que regula su desempeño, vigilando de manera permanente los caudales transportados y la calidad del agua dentro de las conducciones y estructuras hidráulicas que lo componen, para evitar desbordes o inundaciones y descargas con elementos contaminantes superiores a los que los cuerpos naturales o plantas de tratamiento de agua puedan depurar.

Los sistemas de control más modernos en ingeniería están en capacidad de automatizar procesos con base en la medida de parámetros y reciben el nombre de controladores de automatización programables (PAC o PLC, *Programmable Logic Controller*). Estos sistemas reciben información de sondas y dispositivos de monitoreo, los cuales registran los parámetros seleccionados y envían la información a un tablero de control que traduce la información analógica a digital y la envía a una terminal de computador, donde un *software* especializado procesa la información y, de acuerdo con la programación definida, retorna las respuestas al tablero de control, el cual traduce la información digital a analógica y la remite a los dispositivos accionadores electromecánicos, con el fin de que cambien las condiciones de operación del sistema. Para los sistemas de alcantarillado, los PLC son de uso común en estaciones de bombeo y en compuertas o mecanismos de control de estructuras hidráulicas; están compuestos por sensores que miden alturas de lámina de agua, velocidades de flujo, parámetros de calidad del agua como pH, temperatura, OD, SS, etc., de tal manera que el control sobre el sistema es dinámico y en tiempo real. A renglón seguido se presenta un esquema general de un sistema de controladores de automatización programable, aplicado a un sistema de alcantarillado (figura 2).

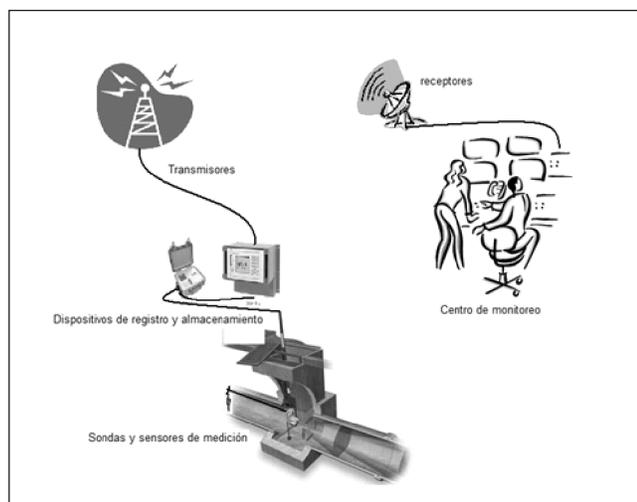


Figura 1. Esquema de una estación de monitoreo.

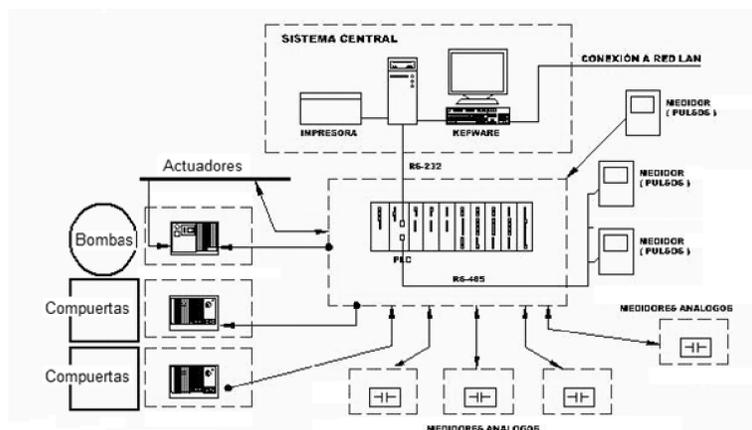


Figura 2. Esquema general de un sistema de controladores de automatización programable.

Modelación hidráulica e hidrológica de un sistema de alcantarillado

En la gestión de un sistema de alcantarillado será siempre conveniente predecir su comportamiento ante diferentes condiciones de operación. Esta necesidad exige el desarrollo de un modelo del sistema de alcantarillado, bien sea físico o numérico. Los sistemas físicos a escala son inviables debido a la extensión y complejidad de los alcantarillados, dejando únicamente como acción posible el modelo numérico. Los modelos computacionales de drenaje urbano existente, comercial o de dominio público, en general poseen componentes hidrológicos e hidráulicos y realizan los análisis en condiciones de flujo permanente o no permanente. El componente hidrológico determina las condiciones de la zona urbana o cuenca hidrológica, y con los parámetros climáticos, según la información de la zona de estudio, hace una modelación de precipitación, infiltración, interceptación y escorrentía, parámetros con los cuales es posible determinar los aportes al sistema. Con el componente hidráulico, se efectúa el tránsito dentro de los elementos del sistema de alcantarillado de las condiciones hidrológicas determinadas. En la actualidad, muchos de los paquetes comerciales incluyen herramientas o interfaces con sistemas de información geográfica, lo que potencia aún más su alcance.

Los modelos de drenaje urbano son en general determinísticos y no tienen en cuenta las características aleatorias que envuelven los procesos hidrológicos, involucran hipótesis simplificadoras que posibilitan el cálculo o lo reducen y, por tanto, tienen como conse-

cuencia un resultado aproximado. Hoy en día se encuentra en el mercado una amplia variedad de modelos, entre los que se pueden destacar el SWMM, InfoWorks, SewerGems, Mouse, Hydro.

Actuación sobre los alcantarillados

El estado más avanzado de la operación del alcantarillado es la actuación directa sobre el sistema y hacer modificaciones en las condiciones físicas del sistema o partes determinantes de él, con el fin de obtener un funcionamiento específico ante una demanda prevista. Para actuar sobre el sistema de acuerdo con estas condiciones es necesario disponer de un sistema de control y un modelo computacional, calibrado con la información de campo.

Adicionalmente, es indispensable la información climática predictiva, tomada de un centro de monitoreo del clima de la región donde se ubica el sistema de drenaje urbano. Con estas herramientas disponibles en el centro de control del sistema de alcantarillado se recibe la información climática predictiva; por ejemplo, una tormenta, con una magnitud y una duración aproximadas. Con estos datos se alimenta el modelo numérico con el que se analiza el evento y el desempeño del sistema de alcantarillado, previendo por ejemplo posibles puntos de inundación. Con esta información se modifican las condiciones de los elementos de control del sistema, compuertas, estaciones de bombeo, derivaciones, etc., con los cuales se pueden establecer unas condiciones adecuadas de apertura y cierre de los elementos de control. Si las condiciones fijadas en el modelo mitigan los problemas o los eliminan, con esta información se modifican mediante el programa maestro del controlador de automatización programable, con el propósito de que el sistema de alcantarillado responda a las exigencias de la tormenta prevista, habiendo actuado con antelación al evento y garantizado un adecuado desempeño del sistema.

Rehabilitación de alcantarillados

La rehabilitación de los sistemas de alcantarillado se entiende como el conjunto de métodos y acciones cuya finalidad es mantener o recuperar las condiciones para recoger y transportar aguas residuales. Una rehabilitación de alcantarillados efectiva se realizará mediante un

conjunto de actividades establecidas en un modelo de gestión del sistema, encaminadas a la recuperación de la funcionalidad perdida o disminuida de los componentes existentes, para cumplir su cometido de recolección y transporte de aguas residuales.

Dentro de la rehabilitación, las labores de renovación, reparación, remplazo y de obras complementarias para el sistema tienen una gran importancia en el proceso de toma de decisiones del modelo de gestión, las que podrían explicarse de la siguiente manera:

- *Renovación.* Conjunto de actividades conducentes a recuperar el estado primario de capacidad y resistencia de los activos del sistema.
- *Reparación.* Arreglo del estado físico de un activo del sistema de alcantarillado que ha sufrido el daño de sus componentes, para que recupere su estado de funcionalidad original.
- *Remplazo.* Eliminación del activo deteriorado y su sustitución por uno nuevo, que tenga iguales o superiores características.
- *Obra complementaria.* Conjunto de actividades necesarias y construcción de activos del sistema de alcantarillado que permiten recuperar o mejorar las condiciones de operatividad.

Consideraciones y aspectos de la gestión para la rehabilitación

De acuerdo con los criterios que se han planteado, la gestión para la rehabilitación de un sistema de alcantarillado busca restablecer o mejorar las condiciones de operatividad, con el fin de cumplir con el cometido para el que se diseñó y construyó dicho sistema. La necesidad de la rehabilitación surge de una serie de agentes externos que deterioran las condiciones de los elementos que constituyen el alcantarillado y que los someten a unas exigencias mayores que aquellas contempladas cuando se proyectaron y diseñaron. Estos agentes se pueden clasificar en varios grupos, de acuerdo con la naturaleza de su procedencia. Dichos agentes o elementos se pueden clasificar en varios grupos, que a continuación se mostrarán como aspectos que hay que tener en cuenta para la gestión del alcantarillado que debe rehabilitarse.

- *Aspectos técnicos.* Categoría en la que se agrupan los aspectos relacionados con las disciplinas de la ingeniería involucradas en el proceso. El alcantarillado,

desde el punto de vista de la ingeniería, es un conjunto de estructuras hidráulicas subterráneas que conforman un sistema ramificado abierto, el cual ocupa una región urbanizada, que necesariamente involucra diferentes especialidades con los siguientes aspectos:

- Estructurales
- Geotécnicos
- Hidráulicos
- SIG
- *Aspectos ambientales.* Aunque estos elementos se pueden considerar dentro de las especialidades de la ingeniería, se presentan de manera independiente dada su relevancia y tomando en cuenta que es un objetivo primario del sistema de alcantarillado. Igualmente, es importante considerar que su relación con los aspectos normativos y legales es muy fuerte, aparte de que el sistema de alcantarillado y el área urbana sirven como un subsistema del sistema biótico que los contiene.
- *Aspectos económicos.* El alcantarillado como sistema productivo implica una inversión de recursos económicos, en tanto que la gestión para la rehabilitación requiere un análisis económico que permita direccionar la inversión de los recursos disponibles en la opción que genere un mejor retorno a la comunidad y una mejor rentabilidad.

Definidos y estudiados los aspectos fundamentales para el planteamiento de la rehabilitación del sistema de alcantarillado, se encontrarán las causas o agentes que afectan el desempeño del sistema de alcantarillado, las cuales se podrán agrupar de acuerdo con los aspectos técnico-ambientales a que correspondan y teniendo en cuenta los aspectos económicos. A continuación se presenta el árbol del problema para la rehabilitación de una red troncal de alcantarillado, en el que se listan las causas y se clasifican dentro de uno de los aspectos ya mencionados (figura 3).

En la parte inferior del árbol del problema se presentan las opciones para la rehabilitación del alcantarillado, las cuales se agrupan en los mismos tres aspectos que hay que tomar en cuenta en la gestión del alcantarillado. Se destaca que los aspectos técnicos y ambientales son de doble vía o podrían estar dentro de una sola categoría.

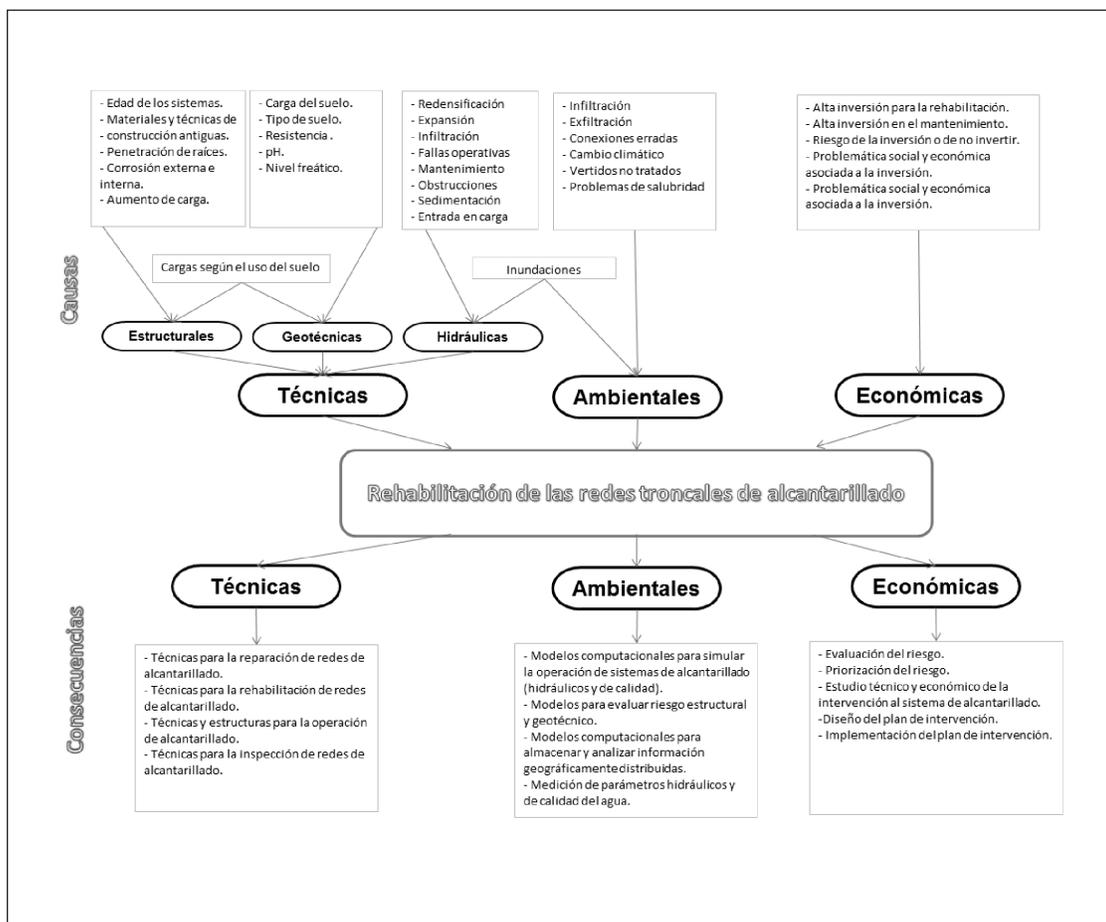


Figura 3. Árbol del problema de la rehabilitación de un alcantarillado troncal.

Obras para la rehabilitación

Del estudio y análisis de todos los aspectos relacionados con el funcionamiento y desempeño de un sistema de alcantarillado, es posible detectar e identificar los problemas que desencadenan la baja en su rendimiento y la falla en el cumplimiento de los objetivos establecidos. Identificadas las causas, la siguiente tarea es buscar el restablecimiento o mejora de las condiciones del sistema, mediante el planteamiento, análisis, diseño y construcción de obras para la rehabilitación, como las presentadas en la tabla siguiente, en la que se hace un resumen de algunas de las obras y técnicas para la rehabilitación del alcantarillado (tabla 1). Cabe mencionar que debido al alto costo de los métodos tradicionales de construcción de alcantarillados, a los costos derivados de la afectación a la comunidad por alteraciones al tráfico, al desarrollo normal de los negocios y en general a la afectación de los sistemas bióticos, abióti-

cos y antrópicos del medio intervenido, se han venido desarrollando desde hace algunas décadas técnicas sin zanja, que permiten disminuir estos impactos sobre el medio ambiente urbano y a unos costos competitivos. Entre las técnicas indicadas en esta tabla se presenta una clasificación en la que se toman en cuenta las técnicas con zanja o sin ésta, y la posibilidad de que los trabajadores puedan ingresar o no al sistema. La clasificación que se ha establecido define cuatro grandes grupos, considerando los conceptos fijados sobre reparación, renovación, remplazo y obras complementarias en el sistema.

Se destaca además que no se incluyen las labores de mantenimiento porque éstas, aunque pueden restaurar las condiciones de operatividad en ciertos casos, no implican una obra que entre a formar parte de los activos del sistema, pues son sólo actividades que remueven materiales ajenos al sistema que perturban su normal desempeño.

HERRAMIENTA DE GESTIÓN PARA LA REHABILITACIÓN

Todos los conceptos y elementos que se han presentado permiten entender y dimensionar la complejidad del problema al que se enfrenta el gestor de un sistema de alcantarillado cuando realiza la planificación para la rehabilitación. Con esta cantidad importante de variables espaciales y temporales, surgen muchas dudas y preguntas: ¿qué elementos rehabilitar?, ¿cómo se deben rehabilitar?, ¿en qué momento se deben rehabilitar?, ¿cuándo y qué recursos asignar? La respuesta a estas y otras preguntas involucra una serie de procesos de análisis, en los que el gestor estará apoyado por una serie de asesores técnicos y económicos que le ayuden a determinar, de entre numerosas posibilidades, cuál de ellas es la más adecuada. Para el análisis de cada una de las posibilidades, la cantidad de información involucrada

y la complejidad de sus relaciones son elevadas. Con el planteamiento anterior, se concluye que es conveniente y necesario diseñar y desarrollar una herramienta computacional para la gestión de la rehabilitación de los sistemas de alcantarillado que permita manejar este complejo problema multidimensional de optimización multiobjetivo.

Requerimientos de la herramienta de gestión para la rehabilitación de un sistema de alcantarillado

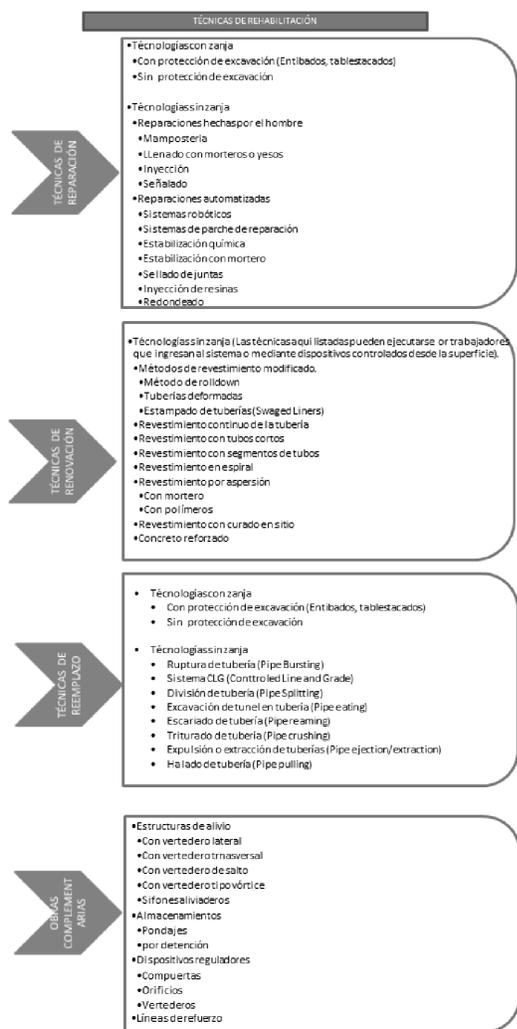
La herramienta de gestión para la rehabilitación de un sistema de alcantarillado (HGR) debe cumplir con una serie de requerimientos, los cuales se agrupan según la espacialidad de la ingeniería que los estudia, para alcanzar los objetivos deseados como instrumento de apoyo para la gestión. A continuación se hace una precisión de dichas exigencias.

En primer lugar, como el sistema de alcantarillado está distribuido espacialmente dentro del área urbana que sirve y sus activos se encuentran dispersos a lo largo de ella, la HGR los debe tener referenciados y ubicados espacialmente.

Es muy recomendable acceder a la base de datos desde la HGR, pero ésta se debe manejar y actualizar desde un sistema de información geográfica (SIG). La construcción de la base de datos de los activos se obtiene a partir de campañas de catastro de redes y estructuras, realizadas a partir de los levantamientos topográficos o con los sistemas de posicionamiento global (GPS).

Un segundo aspecto que hay que considerar es el correspondiente a la caracterización geotécnica. Así por ejemplo, es necesario caracterizar el suelo y determinar parámetros tales como pH, contenidos de sulfatos, nitratos y amonio, nivel freático, al igual que la capacidad portante y el peso unitario de los estratos de suelo. La estructura de la información debe permitir la consulta y manipulación desde el SIG, para poder generar así coberturas de cada uno de los parámetros, las cuales se puedan intersecar con la ubicación de las estructuras para obtener información de la posible afectación del suelo sobre los activos del sistema. Con la información geotécnica, adicionalmente a la evaluación de las características geomecánicas se busca establecer corrosión externa en las estructuras por acción del suelo y las cargas de suelo y agua sobre éstas.

Tabla 1. Obras de rehabilitación



La información estructural debe estar ligada por completo al activo referenciado. Estructuralmente, entre los datos básicos requeridos están la edad (a partir de la fecha de construcción), el material y tipo o modo de construcción y fabricante. Es muy importante contar con información sobre el estado estructural de la tubería, la cual se extrae del análisis de los videos y documentos de inspección hechos a las estructuras del alcantarillado. La base de datos debe tener en su componente estructural un vínculo con el video de inspección y, en lo posible, con el reporte de ésta. Otro aspecto estructural fundamental son las cargas vivas actuantes sobre las estructuras subterráneas del alcantarillado, las que se pueden relacionar con el tipo de vía o uso del suelo en el que se encuentran los activos.

En cuanto a los aspectos ambientales, la HGR debe contar con una base de datos en la que se puedan registrar aspectos como la infiltración y exfiltración, detectadas hacia y desde el interior de las estructuras por medio de las inspecciones o de los monitoreos realizados sobre puntos del sistema, parámetros ambientales, periódicos o continuos, en los puntos de muestreo, con los cuales se pueden estimar fenómenos como el de corrosión interna de las estructuras debidas a la acción agresiva de las aguas residuales, cargas contaminantes transportadas que puedan aportar información sobre la existencia de infiltración o conexiones erradas, o sobre vertidos frecuentes o superiores a los que puedan manejar los cuerpos naturales de agua o las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

En la HGR se debe contar con un modelo hidrológico e hidráulico del sistema de alcantarillado. Esta herramienta, fundamental para establecer las condiciones aproximadas de operación del sistema, será la que ayude a proporcionar respuestas a las preguntas del gestor sobre la necesidad de ampliar o no la capacidad del sistema para diferentes horizontes y con diversas condiciones climatológicas. Los aspectos hidráulicos e hidrológicos de la HGR tienen una estrecha relación con los demás componentes anteriores y con las labores previas de levantamiento de información. La topología del sistema de alcantarillado para la modelación hidrológica e hidráulica se obtiene a partir de la base de datos geográfica de los activos, por lo que es indispensable que la información tenga las cotas debidamente referenciadas. Los datos necesarios para calibrar el modelo

resultan de las campañas de monitoreo y medición, que se deben ajustar para obtener datos de alturas de lámina de agua y los caudales correspondientes. Otro insumo fundamental para la modelación del sistema es la generación de caudales de aguas sanitarias y lluvias. La HGR debe estar en capacidad de manejar la información de población (cantidad, distribución espacial y temporal) y consumos (actuales y futuros) para determinar escenarios de aguas residuales de origen residencial, industrial, comercial e institucional. Además, el modelo debe estar en capacidad de manejar la información de tormentas (su distribución temporal y espacial), con diferentes probabilidades de ocurrencia, para estimar lluvias, que aplicadas a las cuencas urbanas, proporcionen la escurrimiento efectiva que se debe transitar en el sistema de alcantarillado. El modelo hidráulico debe interactuar con la HGR, recibir información de él, procesarla y retornar resultados de las modelaciones para determinar las capacidades actuales y futuras del sistema. Un módulo hidráulico para el sistema debe interactuar con las bases de datos geográficas y ser pilar fundamental del sistema.

El objeto de la HGR es obtener alternativas de rehabilitación con diferentes características y escenarios que se puedan comparar para que estén a disposición del gestor y sea posible decidir qué, cómo, cuándo y con qué recursos se ejecutan. Hoy en día se dispone de diversas tecnologías de rehabilitación, con aplicabilidad técnica y costos diversos. Es necesario disponer de una base de datos con la información técnica y económica de cada una de las técnicas disponibles, donde se definan claramente las condiciones de aplicabilidad y los costos por unidad de longitud, de acuerdo con la geometría, las situaciones y las condiciones de construcción.

La información de costos obtenida de los análisis de los costos unitarios de cada técnica en los tramos o sectores aplicables no es suficiente para hacer una buena evaluación económica, ya que se deben tener en cuenta los beneficios que cada técnica proporciona. Entre los beneficios y su estudio detallado se logran escenarios cada vez más completos, partiendo por ejemplo únicamente de la prolongación de la vida útil de los activos, pasando por la disminución de costos por desvíos de tráfico, afectación a las actividades productivas del sector, riesgo de invertir o no invertir, problemática social y económica asociada con la inversión o no inversión, beneficio ambiental, etc. La cuantificación de los be-

neficios indirectos siempre será una tarea difícil, en la que se podrá ir escalando en forma progresiva desde un análisis básico como costo mínimo, hasta relaciones beneficio-costos más completas, en la medida en que se puedan incorporar evaluaciones de beneficios indirectos y de intangibles. La HGR debe contar con una metodología para realizar análisis económico a partir de la información incorporada a la base de datos de las técnicas de rehabilitación sobre la prolongación de la vida útil de cada técnica, rendimientos de avance del trabajo, impactos sociales y ambientales, etc.

La empresa operadora del servicio público de recolección, transporte, tratamiento y disposición de aguas servidas también debe contar con un modelo de indicadores de gestión que permita evaluar las actuaciones y la administración desde puntos de vista económico, operativo, ambiental, del recurso humano, entre otros. Es deseable que la HGR tenga un procedimiento o una metodología para evaluar los indicadores de gestión para las diversas alternativas planteadas, condición que puede colaborar en la toma final de decisiones sobre la rehabilitación.

Esquema general para una herramienta de gestión de rehabilitación de una red troncal de alcantarillado

Con este número importante de requisitos definidos se ha diseñado un esquema del modelo de la herramienta de gestión para la rehabilitación de sistemas de alcan-

tarillado, en el que se establecen los componentes y las relaciones necesarios para su correcta explotación. El esquema propuesto ha sido la base para elaborar la herramienta detallada y el aplicativo por parte del Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería (figura 4).

Como se observa en el esquema, cada uno de los componentes está precedido de un proceso de obtención de información y alimentación de la base de datos geográfica de la herramienta, que se puede manejar como una o como varias bases relacionadas por medio de un código de identificación del activo. La base de datos alimenta un componente de análisis técnico, que luego del proceso suministra información específica al módulo de análisis y gestión de la herramienta, para presentar alternativas valoradas que el gestor utilizará para definir las acciones que hay que realizar de acuerdo con los criterios establecidos y según las condiciones presupuestales y las políticas generales de la empresa.

De cada uno de los análisis técnicos hechos en cada componente se produce adicionalmente una calificación del estado del activo. Así por ejemplo, de los resultados del análisis geotécnico se generarán datos para determinar el grado de corrosión externa de una tubería. De los análisis efectuados con las herramientas hidráulica y ambiental se obtendrá información sobre corrosión interna de la tubería. Esta información, más la estructural y los datos geográficos del activo, determinará unas condiciones estructurales del tubo, información que procesará el modelo para obtener una calificación

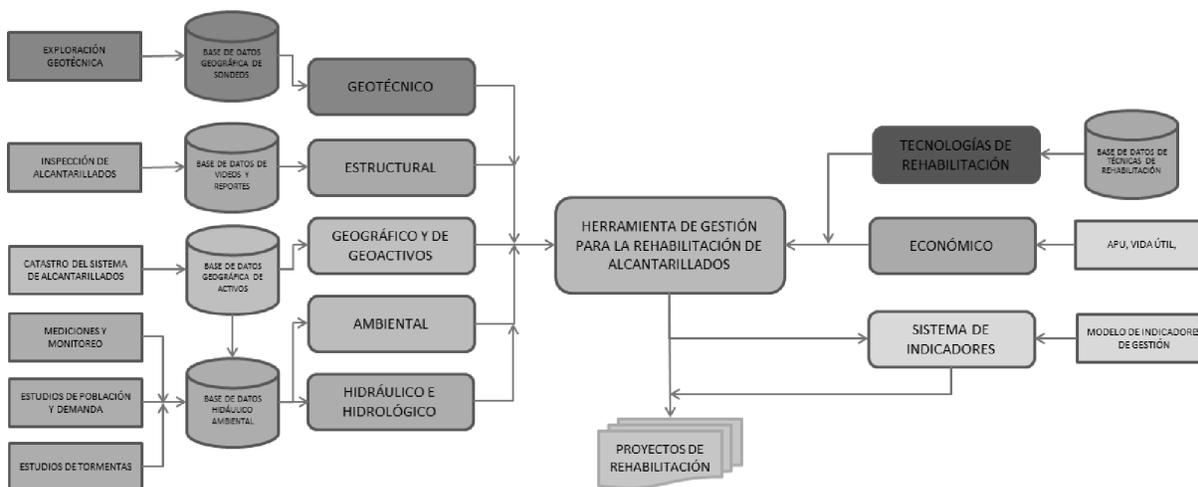


Figura 4. Esquema general del modelo de la herramienta de gestión para la rehabilitación de sistemas de alcantarillado.

geotécnico estructural fácil de analizar. Del análisis estructural realizado con base en la inspección, se obtiene una calificación de acuerdo con los fallos encontrados (grietas, fisuras, desprendimientos, etc.). De su repetitividad y magnitud, según unas escalas predefinidas, se obtiene una calificación de su estado estructural. El análisis hidráulico califica la capacidad de transporte de agua residual del activo. El componente ambiental producirá una calificación por infiltración y conexiones erradas. Las calificaciones alimentarán el módulo de análisis de la HGR, y mediante la ponderación de variables y las técnicas de rehabilitación disponibles se presentarán alternativas técnicas de mejoramiento del sistema de alcantarillado. El componente económico evaluará los costos y beneficios y mostrará una priorización de las alternativas. El componente de indicadores hará una evaluación de acuerdo con los índices definidos y reportará una priorización con base en los pesos establecidos. Las alternativas de rehabilitación presentadas por el modelo tendrán entonces una calificación técnica, económica y de gestión, que permitirá al gestor tomar una decisión para invertir adecuadamente los recursos disponibles en la rehabilitación del sistema de alcantarillado.

Seguidamente se presenta la ventana principal del aplicativo del modelo de gestión para la rehabilitación de una red troncal, desarrollado para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería (figuras 5 y 6).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El manejo y operación de los sistemas troncales de alcantarillado es un problema complejo que involucra numerosas variables espaciales y temporales que exigen un tratamiento integral.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de información disponible y la necesidad de su utilización, los sistemas de información geográfica (SIG) se convierten en una herramienta potente que permite integrar y analizar todas las variables involucradas en el problema, con una ventaja adicional: la facilidad para manejar e interpretar los resultados. Una herramienta de gestión predictiva para la rehabilitación de un sistema de alcantarillado, como la que se ha presentado, permite al gestor evaluar múltiples opciones de solución y escoger la que más se ajuste a las necesidades presentes y futuras del sistema

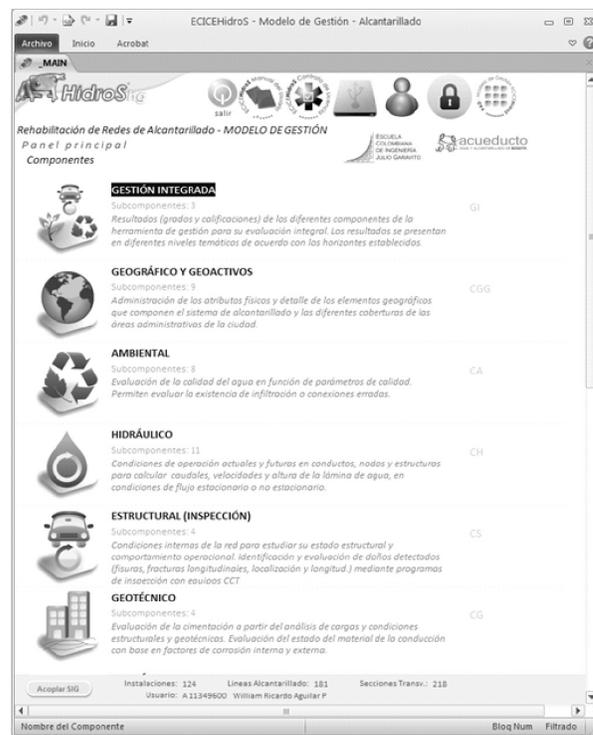


Figura 5. Ventana principal del modelo de gestión para la rehabilitación de redes de alcantarillado. Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

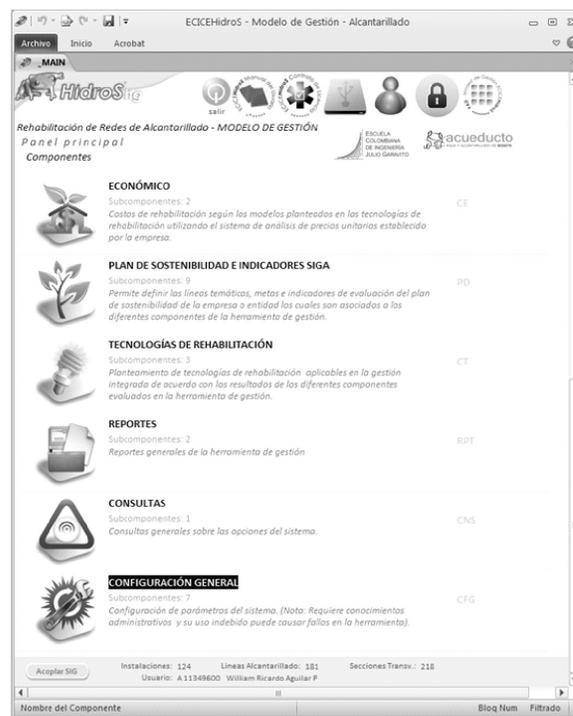


Figura 6. Ventana principal del modelo de gestión para la rehabilitación de redes de alcantarillado. Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

y de la empresa operadora. Análisis de la capacidad del sistema en condiciones de flujo no permanente, proyecciones de crecimiento y uso de la red, condiciones estructurales y geotécnicas del sistema, evaluación de la calidad del agua transportada, variables económicas y muchas otras variables son los elementos principales del modelo presentado.

Otro aspecto que vale la pena destacar es que los modelos de gestión para la rehabilitación de un sistema de alcantarillado pueden efectuar los análisis en tiempo real si las redes se encuentran debidamente instrumentadas y es posible disponer de la información en un centro de control.

REFERENCIAS

1. Butler, David & Davies, John W. (2004). *Urban Drainage*, 2nd ed. Spon Press.
2. Consorcio Grucon - IEH - Soprin (1999). Estudio para la rehabilitación del sistema de alcantarillado de la ciudad. Bogotá: EAAB.
3. Escala Ingeniería y Proyectos (2005). Estudio para definir el programa de rehabilitación de las redes de alcantarillado de la ciudad de Bogotá. Bogotá: EAAB.
4. Forero, José A. (2009). *Hidroconsulta. Manual de rehabilitación y renovación sin zanja del sistema de alcantarillado de Bogotá*. Bogotá: EAAB.
5. Pontificia Universidad Javeriana (2008). Indicadores del sistema de gestión de alcantarillado. Bogotá: EAAB.
6. Sveinung, Saegrov (2006). *Computer Aided Rehabilitation of Sewer and Storm Water Networks*, 1st ed. London: IWA Publishing, Alliance House, 140 pp.
7. Tochobanoglous, George, Metcalf & Eddy (1996). *Ingeniería de aguas residuales, redes de alcantarillado y bombeo*. McGraw Hill.
8. Water Research Centre. *Sewerage Rehabilitation Manual*. <http://Srm.wrcplc.co.uk>.
9. WEF, Asce & EWRI (2009). *Existing Sewer Evaluation and Rehabilitation*, 3rd ed. McGraw Hill.