

# Determinación del Estado de Alcantarillados Midiendo su Comportamiento Hidráulico

## Carlos Rafael Lara Mendoza

Ingeniero Sanitario, MSc en Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes  
Profesor Asociado. Director de Postgrados, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Boyacá  
E-mail: carlara@uniboyaca.edu.co

## Juan Guillermo Saldarriaga Valderrama

Ingeniero Civil, Msc en Ingeniería Hidráulica, University of Newcastle Upon Tyne  
Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Los Andes. Director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA)  
E-mail: jsaldarr@uniandes.edu.co

## XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

### Sociedad Colombiana de Ingenieros

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

**Resumen.** El presente artículo presenta los resultados de la investigación del estado de las redes de alcantarillado de tres sectores de la ciudad de Tunja, cada uno con particularidades que permiten establecer conclusiones relacionadas con la rehabilitación y reposición de redes de drenaje de aguas residuales. El objetivo es evaluar una metodología basada en mediciones de caudal y calidad de agua, como herramienta para saber cuándo es necesario abordar el problema de la presencia de defectos estructurales en las tuberías. Se probó que la metodología puede ser utilizada para la evaluación preliminar de la condición de las redes de alcantarillado de la ciudad de Tunja. De cualquier manera, la metodología debe ser validada en otros municipios o bajo diferentes condiciones asociadas a las tuberías, tales como material, tiempo de servicio.

**Palabras clave.** Sistemas de alcantarillado, renovación de tuberías, hidráulica de alcantarillados.

## **1. Introducción**

El estado físico del alcantarillado y sus componentes es un factor fundamental en la presencia de situaciones complejas, relacionadas con la existencia de valores elevados de caudales de infiltración hacia las redes, los que afectan procesos técnicos y administrativos del responsable de la prestación del servicio, tales como tratamiento de las aguas residuales, el pago de tasas retributivas, entre otros.

La infiltración es síntoma de alguna falla, generalmente estructural, en los componentes del sistema de alcantarillado. La práctica de la Ingeniería han llevado a relacionar los aumentos rápidos y excesivos de los valores de infiltración con el momento de ejecutar actividades de mantenimiento correctivo (rehabilitación) o de cambio total (renovación) de las redes de alcantarillado. Sin embargo, este tipo de decisiones se han visto soportadas principalmente en la ejecución de algún tipo de inspección que permita confirmar lo sospechado.

En la ciudad de Tunja, la empresa de servicios de acueducto y alcantarillado, SerA.Q.A. Tunja, ha asumido la práctica de las inspecciones apoyada en cámaras de video, práctica que ha generado costos importantes dentro del presupuesto de mantenimiento de la red de alcantarillado establecido por ésta.

El propósito de este trabajo es establecer la posibilidad de que la toma de decisiones relacionadas con mantenimiento correctivo anticipado o reposición total de tramos de la red de alcantarillado se haga apoyada en metodologías mucho más económicas y, probablemente, certeras que las actualmente empleadas. El trabajo busca probar una metodología que a partir del conocimiento de condiciones hidráulicas de flujo y el establecimiento de parámetros de calidad de agua arroje resultados que se puedan relacionar con defectos existentes en las redes de alcantarillado evaluadas.

## **2. Marco conceptual**

Todos los sistemas de alcantarillado se deterioran internamente con el paso del tiempo, debido a los efectos de la corrosión y erosión de sus paredes, y externamente, debido a la intrusión de raíces y desplazamientos de tierras. Dicho deterioro conduce a una pérdida de la integridad estructural, introducción de agua desde el exterior y decrecimiento de la capacidad hidráulica de la red. La infiltración de aguas no residuales al alcantarillado, genera otro tipo de problemas como el incremento de los costos de tratamiento debido al incremento de volumen de agua a tratar. Por lo anterior, las acciones dirigidas a la identificación temprana de problemas relacionados con la calidad estructural de los alcantarillados es un factor vital para los operadores de las empresas responsables del manejo de los sistemas (Godshall, s.f.).

En el sentido de lo anteriormente expuesto, la EPA (United States Environmental Protection Agency) ha establecido como requisitos para la entrega de subvenciones que apoyan programas de saneamiento en el área de manejo de vertimientos domésticos, el cumplimiento de un programa de evaluación y rehabilitación de alcantarillados, el cual está discriminado en tres fases: análisis de infiltración y caudales incontrolados, evaluación del estado de la red de alcantarillado, y rehabilitación de la red de alcantarillado. Es evidente que los procesos de rehabilitación o reposición de tuberías de la red de un alcantarillado deben ser el resultado de un ejercicio juicioso, en el que la determinación del estado físico de sus componentes es fundamental.

En dicha determinación el trabajo se orienta a la identificación de las posibles fuentes de la presencia de valores elevados de  $I/I$ , tales como ausencia de tapas de pozos de inspección, zonas de escorrentía alta en cercanías del acceso a pozos de inspección, fallas estructurales en las tuberías. La inspección interna es una de las metodologías empleadas para el establecimiento del estado de las redes. Esta se ha hecho regularmente con la ayuda de equipos de televisión de circuito cerrado. La imagen capturada es transmitida a una estación de recepción donde es grabada para posteriormente ser analizada (Metcalf and Eddy, 1995).

Otros métodos para la determinación de la condición de los alcantarillados incluyen modelaciones predictivas y establecimiento simple de las edades y/o materiales con la idea de reemplazar las más viejas primero (Rodríguez, 2004). El flujo de agua dentro y fuera del alcantarillado, asociado a infiltraciones o exfiltraciones, aumenta el riesgo de falla y colapso del mismo, sobre todo si éste ya se encuentra afectado estructuralmente. Una pequeña grieta a través de la cual haya un flujo significativo de agua que lava el subsuelo, puede ser la causa principal para que hundimientos o colapsos de la red de alcantarillado se presenten (Rodríguez, 2006).

### 3. Metodología propuesta para establecer preliminarmente el estado físico de redes de alcantarillado

A continuación se presenta (ver Figura 1) la metodología que se siguió en desarrollo del trabajo y la cual, de generar resultados favorables, permitiría a la empresa prestadora del servicio de acueducto y alcantarillado tomar decisiones para anticiparse a un evento de colapso de la red de alcantarillado en algún punto específico de la ciudad.

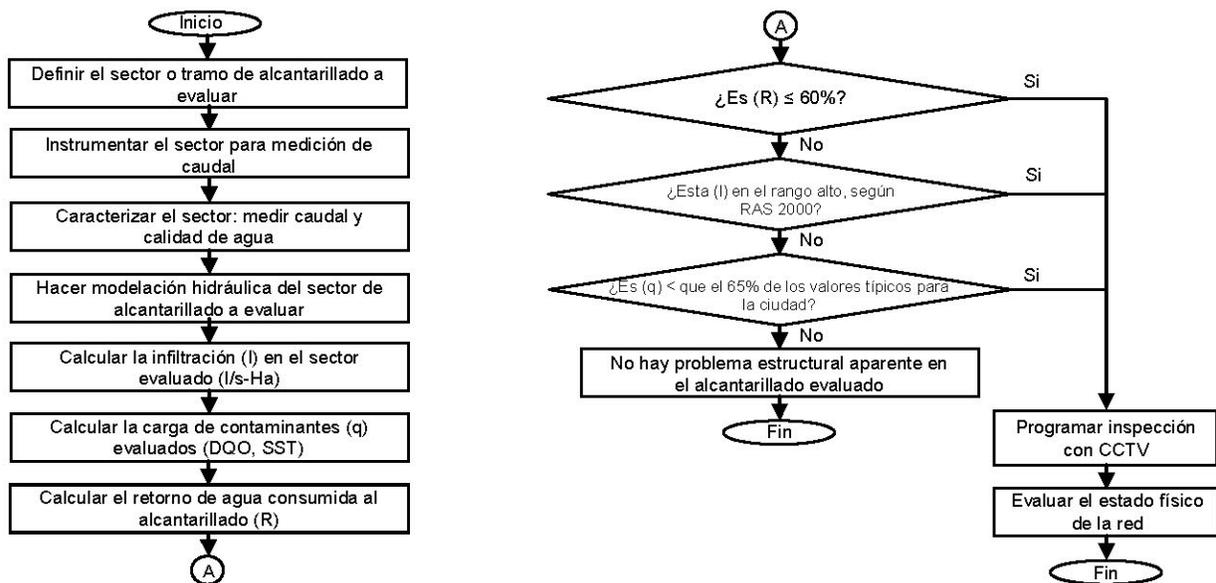


Figura 1. Flujograma propuesto para evaluar preliminarmente el estado del alcantarillado

El planteamiento de la metodología está soportado en una serie de criterios o parámetros relacionados con técnicas de medición de caudal, modelación hidráulica y evaluación de la calidad del agua residual. Para

la definición de dichos criterios se tomó como referente principal lo relacionado con el tema y definido en el RAS 2000, con apoyo en bibliografía que complementa la información requerida. El flujograma que representa la metodología seguida en desarrollo de la investigación se presenta en la Figura 1.

#### 4. Selección de distritos de drenaje como sectores de modelación y ensayo

SerA.Q.A. Tunja, empresa prestadora de los servicios de acueducto y alcantarillado, ha establecido en marco de su ordenamiento de redes (identificación, caracterización y sectorización de descargas), una serie de distritos de drenaje de aguas residuales domésticas. En concordancia con los objetivos de la investigación, de la sectorización establecida para la ciudad se tomaron tres (3) subsectores como elementos motivo de estudio: Subsector Santa Inés, Sector Santa Inés; Subsector barrio Hunza, Sector Consuelo; Subsector barrio Mirador Escandinavo, Sector Suárez. En la Figura 2 se señalan los sectores seleccionados para el trabajo, identificados dentro del plano de sectorización definido en el Plan Maestro de Alcantarillado de la Ciudad de Tunja.

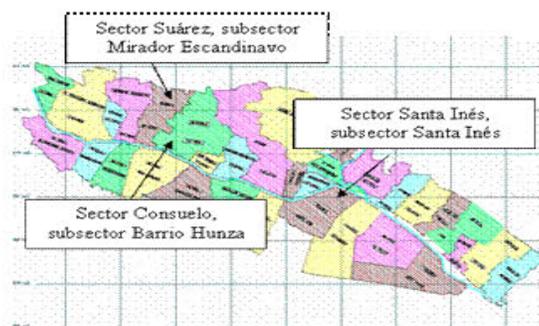


Figura 2. Subsectores de drenaje seleccionados para la investigación (SerA.Q.A. Tunja, 2001)

La selección de los tres subsectores obedeció a los objetivos planteados, reuniendo condiciones particulares como la alta edad de la tubería y tiempo de servicio, el estar ubicado en una zona con posible alta influencia del nivel freático (subsector Santa Inés), la baja edad de servicio y ubicación en zonas de ladera (subsector Mirador Escandinavo) y el material de la tubería, específicamente plástico (subsector Hunza).

##### 4.1 Consumo histórico de suscriptores de acueducto en los subsectores de estudio.

En la etapa de localización de los sectores apropiados para el desarrollo del proyecto se tuvo cuidado de contar con la identificación particular del número de suscriptores que aportan sus aguas residuales a los tramos de alcantarillado, factor importante en la modelación de las redes. Se tomó la decisión de buscar información del registro del último año de los consumos de los suscriptores de cada subsector, con el fin de establecer el caudal promedio diario consumido para posteriormente, definir los caudales medios de aguas residuales para alimentar el modelo en el proceso de modelación y contrastación con la situación real. En las Tablas 1 y 2 se presenta el resumen de consumos mensuales por cada sector, consumos diarios por sector y por suscriptor, información calculada a partir de los datos suministrados por SerA.Q.A. Tunja.

Tabla 1. Consumos acumulados totales por subsector y por mes

Mes	Consumo mensual (m <sup>3</sup> /s)		
	Santa Inés	Mirador Escandinavo	Hunza
Enero	3612	2487	2135
Febrero	3865	2508	1573
Marzo	4584	3026	1711
Abril	4005	2433	1663
Mayo	4591	2809	1825
Junio	4333	2588	1629
Julio	4344	2974	1818
Agosto	4048	2748	1645
Septiembre	4970	3152	1662
Octubre	5262	2903	1752
Noviembre	4756	3064	1681
Diciembre	4159	2764	1609

Tabla 2. Consumos medios mensuales y diarios por subsector

Subsector	Consumo total por zona (m <sup>3</sup> /s)	Consumo medio mensual (m <sup>3</sup> /s)	Consumo medio diario (m <sup>3</sup> /s)
Santa Inés	52529	4377.4	145.9
Mirador	33461	2788.4	92.9
Hunza	20703	1725.3	57.5

#### 4.2 Valores de nivel freático en la zona de estudio

La incidencia de la infiltración hacia la tubería es uno de los aspectos importantes a tener en cuenta en desarrollo del estudio. El nivel freático y su cercanía con la tubería hacen que la ubicación de éste sea importante en aquellos casos pertinentes. En la selección de los distritos de drenaje de aguas residuales domésticas motivo de estudio, se tuvo en cuenta la existencia de por lo menos uno en el cual la presencia de niveles freáticos altos permitiera la evaluación de su incidencia sobre los valores de infiltración en las tuberías. Específicamente, el sector seleccionado que reunía esta condición es el denominado Santa Inés.

Este sector urbano de la ciudad de Tunja tiene como característica topográfica su baja pendiente; es atravesado en su costado occidental por el Río Jordán, principal cuerpo receptor y de drenaje de las aguas residuales domésticas de la ciudad. Su subsuelo está conformado principalmente por materiales arcillosos, sobre los cuales se encuentra una capa vegetal de pasto y raíces diversas.

La posibilidad de medir niveles freáticos durante el desarrollo de la investigación fue efectiva gracias a la existencia, en el sector, de un piezómetro en cercanías a la descarga de aguas residuales. Dicho piezómetro fue instalado allí en marco del estudio de tesis denominado "Caracterización Geomecánica Suelos de Tunja, Sector 1 – UPTC" (López, 2000). Durante la campaña de caracterización llevada a cabo en el sector del barrio Santa Inés, que se extendió durante seis (7) días, las lecturas de nivel freático fueron constantes. En promedio y con variaciones mínimas, el nivel se registró a una profundidad de 0.95 m desde la superficie durante toda la jornada de trabajo, incluso en los eventos de lluvia que se presentaron (es necesario aclarar que la descarga se encontraba por lo menos 1.5 m por debajo de la cota máxima del nivel freático medido en campo).

### 5. Resultados de la caracterización de aguas residuales en los sectores seleccionados

Para efectos de identificar el comportamiento hidráulico actual de las redes de drenaje de aguas residuales de los sectores seleccionados, se estableció la necesidad de llevar a cabo mediciones continuas del caudal descargado a través de cada uno de los vertimientos. Para poder identificar un comportamiento típico de la variación en la descargas de aguas residuales analizadas se optó por hacer mediciones de caudal durante un período de siete (7) días continuos, lo que permitió establecer una curva típica de descarga de cada vertimiento.

Para llevar a cabo las mediciones se adoptó un mecanismo de medición de nivel de lámina de agua con el cual, cada 10 minutos, se tomaron registros durante los días de trabajo en cada punto de medición. Las

siguientes figuras presentan el comportamiento del caudal descargado en cada uno de los cuatro puntos evaluados durante los respectivos días de medición (a pesar de ser tres subsectores, el denominado Mirador Escandinavo tiene dos puntos de descarga, los que se identificaron como Mirador Arriba y Mirador Abajo).

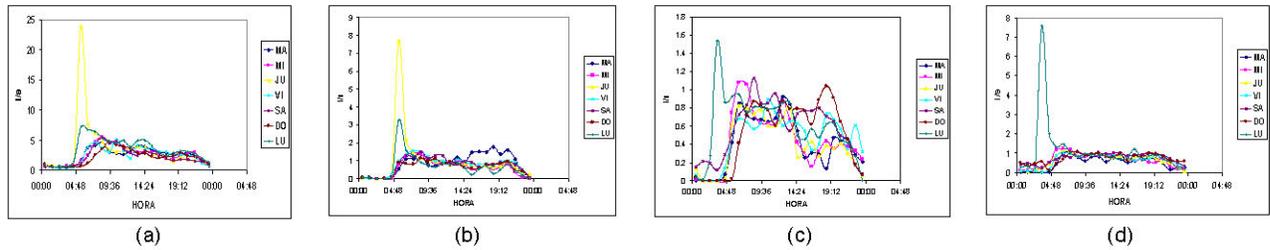


Figura 3. Caudales descargados de los sectores, en un período de siete días: (a) Santa Inés, (b) Hunza, (c) Mirador Arriba, (d) Mirador Abajo

Los picos que son evidentes en las figuras corresponden a los períodos de lluvia que se presentaron durante la jornada de muestreo. Para efectos de hacer comparaciones posteriores con los resultados de la modelación hidráulica de cada sector, los eventos de lluvia son descartados.

Por otra parte, en desarrollo del trabajo de medición de caudales, se optó por utilizar la calidad de agua residual descargada en cada punto de evaluación como posible indicador del estado de las redes de drenaje. En cada punto evaluado se realizó una caracterización en la cual se midieron hora a hora Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) e igualmente se compuso una muestra durante el período de 24 horas. En las siguientes figuras se presenta el comportamiento de los SST y la DQO en el período evaluado, para cada punto.

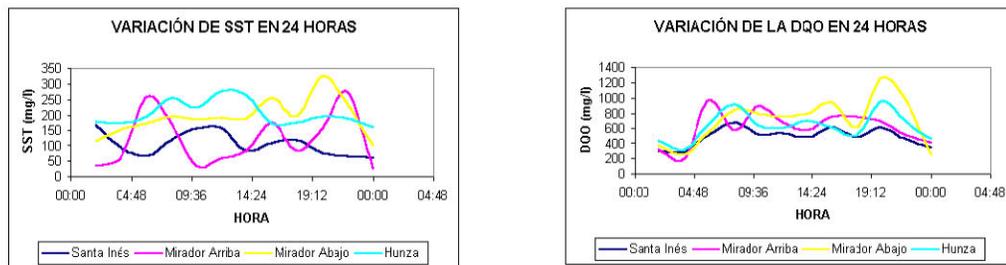


Figura 4. Comportamiento de los SST y la DQO descargados en cada sector de estudio en un día típico.

## 6. Modelación hidráulica de los sectores seleccionados

Con el fin de establecer la validez a la información recolectada en el trabajo de caracterización, se procedió a hacer una modelación hidráulica de los sectores evaluados, utilizando para ello el software desarrollado por la EPA y denominado SWMM 5.0 (Storm Water Management Model), el cual es “un aplicativo apropiado para simular el comportamiento hidráulico e hidrológico de los sistemas urbanos de drenaje de aguas residuales” (tomado de ReadMe, EPA SWMM 5.0). En la siguiente figura se presenta la topología de las redes de cada subsector, montadas en SWMM.

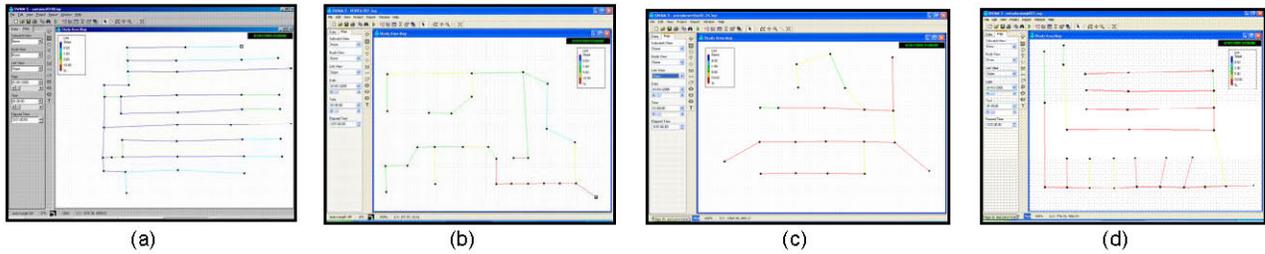


Figura 5. Topología de las redes, montada en SWMM: (a) Santa Inés, (b) Hunza, (c) Mirador Arriba, (d) Mirador Abajo

Una vez montada la red en SWMM y asignados los hidrogramas de entrada se hicieron las respectivas corridas del modelo, suponiendo descarga libre dado que en los puntos de descarga evaluados esa fue la condición encontrada. Una vez la modelación se calibró contra lo medido en la caracterización, se determinó el coeficiente de retorno, el cual fue contrastado contra el coeficiente determinado a partir de la relación del promedio consumido vs el promedio descargado. En todos los casos la situación fue muy ajustada, salvo en el subsector Santa Inés, en el cual el retorno fue muy superior al consumo. La Figura 6 corresponde al hidrograma de salida generado por una de las corridas de uno de los sectores evaluados, hidrograma que posteriormente fue comparado con la curva de variación de caudales medida en campo.

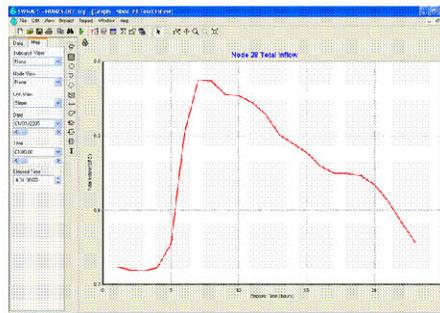


Figura 6. Hidrograma de salida de la modelación hidráulica del sector Hunza

Como se mencionó, las corridas de los sectores de Mirador Escandinavo y Hunza fueron altamente coincidentes con lo medido. Para el subsector Santa Inés el retorno que generó similitud entre lo modelado y lo medido correspondió a un 140%, valor que se puede interpretar como cerca de un 50% más del agua que bajo condiciones “normales” debería circular por dicha red. En la Figura 7 se presenta la sobreposición de los hidrogramas medidos y modelados para cada sector evaluado.

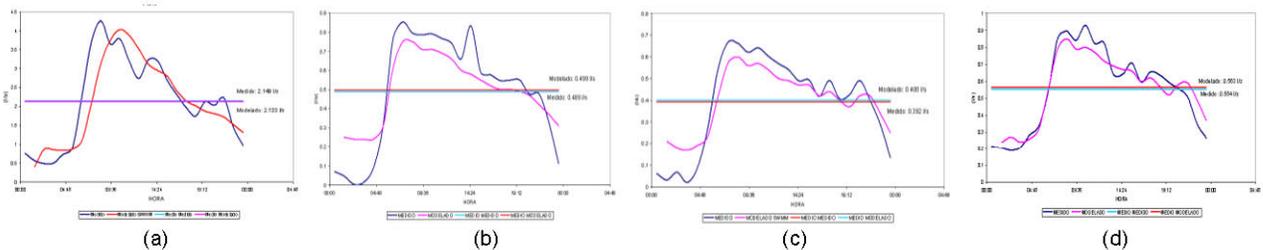


Figura 7. Hidrogramas, medido y modelado, para los subsectores evaluados: (a) Santa Inés, (b) Hunza, (c) Mirador Arriba, (d) Mirador Abajo

## 7. Análisis de los resultados

De los resultados del trabajo de campo realizado es evidente que el subsector del barrio Santa Inés, presenta problemas estructurales debido al tiempo de servicio de la tubería, los cuales asociados a la prevalencia de niveles freáticos bastante altos, superiores incluso a la cota de instalación de la tubería, se convierten en un factor preponderante para que el retorno actual sea aproximadamente del orden del 140% frente al consumo medio de agua potable.

Si se toman los valores de infiltración en tuberías definidos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento, RAS 2000, los valores para tuberías con alta infiltración están entre 0.15 y 0.4 l/s-Ha, con media, entre 0.1 y 0.3 l/s-Ha y con baja, entre 0.05 y 0.2 l/s-Ha. Si se consideran el Hurza y Mirador Escandinavo sectores con baja infiltración y se supone un caudal por hectárea de 0.05 l/s, los valores de infiltración estimados serían de 0.21 l/s para el sector del Mirador y 0.09 l/s para el Hurza, valores que incluso, de acuerdo con los coeficientes de retorno establecidos, no se presentan en la realidad (son menores). En el caso Santa Inés, la infiltración encontrada es del orden de 0.11 l/s-Ha (calculada relacionando los caudales medios medidos y modelados con un retorno del 85%), valor cercano al límite inferior de infiltración para tuberías antiguas.

De otra parte, analizando los resultados referentes a la calidad de agua determinada para cada vertimiento, como se ve en la Figura 5, tanto las concentraciones de SST como de DQO para el vertimiento del Santa Inés son mucho menores que las de los otros tres vertimientos, lo que indica dilución del agua residual en este sector y sedimentación de sólidos en suspensión. Las cargas típicas del agua residual para los parámetros analizados están en el orden de 60 g/hab-día para SST y 110 g/hab-día para DQO (Butler, 2004). En la siguiente tabla se presenta un resumen de las cargas calculadas por habitante, para los dos parámetros analizados y para cada subsector trabajado.

Tabla 3. Cargas de SST y DQO por habitante en los subsectores evaluados

Sector	Población Aportante (hab)*	Cargas por persona (g/hab-día)	
		SST	DQO
Mirador			
Escandinavo	825	15.72	95.99
Hunza	408	18.68	92.55
Santa Inés	1985	9.36	63.6

\*: Se estima una población por suscriptor equivalente a 5 personas

Como se puede observar, los valores de carga de DQO para los sectores Hurza y Mirador Escandinavo se encuentran cercanos al valor referenciado, mientras que para el sector Santa Inés la diferencia frente a dicho valor es cercana al 50% de déficit. Frente a los sólidos suspendidos, a pesar de que en ninguno de los casos la carga calculada está cerca al valor referencia, si es claro que para el Santa Inés la situación es aun más crítica, situación que se puede deber a la alta sedimentación presentada en el alcantarillado (contrario a lo que se podría pensar, la infiltración desde el suelo se podría convertir en agente aportante de sólidos en suspensión).

Si se comparan los valores medidos frente a los valores de carga definidos en la ciudad de Tunja para el diseño de su sistema de tratamiento de aguas residuales (SerA. Q.A., 2000) los cuales fueron 103 g/hab-día

para DQO y 38 g/hab-día para SST, la situación evidenciada es la misma, aunque aquí la relación de lo medido como carga de SST frente al dato referencia es algo más consistente.

Para verificar el estado actual de la tubería en el subsector Santa Inés, se solicitó a la empresa SerA.Q.A. Tunja la colaboración para llevar a cabo inspecciones con cámara de video en algunos de los tramos (escogidos aleatoriamente) correspondientes a este barrio. La siguiente es una figura correspondiente a dicha inspección.

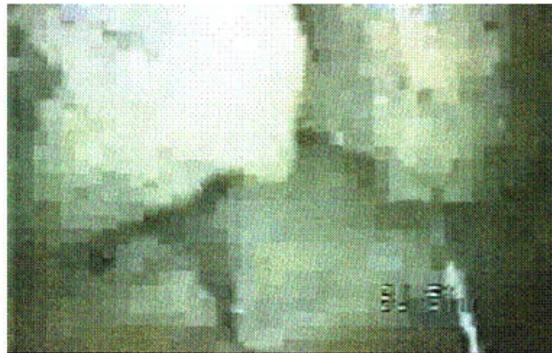


Figura 8. Fotografía del interior del alcantarillado del subsector Santa Inés

El resultado de la inspección es una tubería con demasiados problemas de intrusión radicular, juntas de tubos bastante afectadas y separadas y grietas considerables, tanto en extensión como en amplitud.

#### **8. Definición de criterios y/o parámetros para aplicación de la metodología**

Una vez aplicada la metodología y analizados sus resultados, se propone tener en cuenta los siguientes criterios que consolidarán su aplicación, criterios a ser definidos por el usuario de la misma:

- Definición del lugar y momento de evaluación del alcantarillado. Dónde, cuándo y por qué aplicar la metodología.
- Extensión de la medición de caudales en los puntos de inspección. Tiempo de duración de las campañas de medición y muestreo. Apoyarse en lo establecido en el RAS 2000.
- Técnicas de medición de caudal. Instrumentación de las redes para medición o adopción de técnicas apropiadas y precisas para la determinación de flujos en alcantarillado.
- Caracterización de las aguas residuales. Conocimiento de la calidad típica de aguas residuales del lugar, con el fin de hacer evidente un cambio significativo en dichas características.
- Modelación hidráulica de la red a evaluar. Uso de una herramienta de modelación que permita establecer la situación real en el alcantarillado frente a un ideal de descarga.
- Límite de valores de infiltración. Se deben definir límites aceptables de infiltración y/o exfiltración, los cuales al ser superados envíen una señal de alarma sobre el estado de la red.

#### **9. Conclusiones**

- La toma de datos en campo permitió evidenciar muchos aspectos interesantes: un primer detalle importante que deja claro la incidencia del estado de la tubería en la hidráulica de la red tiene que ver con la manera como en cada sector se hizo tránsito a la creciente generada por los eventos de lluvias fuertes que

se presentaron durante las jornadas de caracterización. Observando la Figuras 3 se nota que aquellos sectores seleccionados por la poca edad de su tubería y por su tecnología particular de instalación (sello de caucho), el tránsito de la creciente es mucho más rápido y la residencia del agua lluvia al interior de la tubería prácticamente cesa minutos después de que termina la lluvia, lo que no ocurrió en Santa Inés, en donde el comportamiento normal del flujo en el alcantarillado se recuperó cerca de 2 horas después de terminada la lluvia.

- La inspección de Santa Inés mostró el preocupante estado de la red, la cual presenta intrusiones de raíces, deflexiones de las uniones de tubería bastante notorias. Si a la edad de la tubería en el sector se suma el hecho de que la zona corresponde al valle de la ciudad de Tunja, la fuerza estática de las formaciones acuíferas circundantes y su presión sobre el suelo del sector se convierten en factor importante para la existencia de los niveles de infiltración identificados.

- La modelación hidráulica es una etapa importante en la determinación del estado de la tubería. Es quizá una de las pocas maneras de estimar los niveles de infiltración actuales en una red evaluada, al permitir la comparación con descargas medidas directamente en campo.

- La metodología planteada tiene que ser evaluada en escenarios diferentes a los empleados para la ejecución del trabajo, los cuales por sus características particulares y especiales permitían presumir encontrar situaciones como la registrada. Es necesario afinar la metodología antes de tomar la decisión de emplearla masivamente como elemento anticipador de eventos relacionados con el colapso de las redes de alcantarillado.

## **10. Bibliografía consultada**

Brown, Ellen. 1995. Investigation and Rehabilitation of Sewer Systems [en línea]. Actualizado el 25 de enero de 1996. [Citado el 1 de noviembre de 2006]. Disponible en [www.p2pays.org/ref/11/10370.htm](http://www.p2pays.org/ref/11/10370.htm)

Butler, David y Davies, John. 2004. Urban drainage Spon Press. New York. 543 p.

Colombia. Ministerio de Desarrollo Económico. 2000. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000. Títulos D, E. Bogotá

Godshall, R. Determining the optimal sewer rehabilitation/repair strategy based on limited pipe condition information.

López, Libardo. 2000. Caracterización Geomecánica Suelos de Tunja, Sector 1 – UPTC. Tesis de grado para Ingeniería Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja.

Metcalf and Eddy. 1995. Ingeniería de aguas residuales. Redes de alcantarillado y bombeo. McGraw – Hill.

Rodríguez, N. 2004. Desarrollo de una metodología para determinar cuando renovar o rehabilitar redes de alcantarillado. Propuesta de tesis, Universidad de los Andes.

Rodríguez, N. 2006. Desarrollo de una metodología para determinar cuando renovar o rehabilitar redes de alcantarillado. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes.

SerA.Q.A. Tunja. 2000. Plan maestro de alcantarillado de Tunja. Proyecto de Saneamiento hídrico de los Ríos Jordán y La Vega. Tunja.