

PROYECTO DE GRADO INGENIERÍA CIVIL

MÉTODOS DE DISEÑO EN REDES DE ALCANTARILLADO: ¿QUÉ SE USA HOY
EN DÍA?

PRESENTADO POR:

LUISA FERNANDA TORRES DUEÑAS

ASESOR:

JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA VALDERRAMA



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

JUNIO 2013

BOGOTA D.C



A mis padres, Ruth y Flavio
Por su constante apoyo durante
mi formación profesional y personal.
Mil gracias por permitirme estudiar
En la mejor Universidad del país
y cumplir la primera meta:
Ser Ingeniera civil.
A mis tías, Pepa y Maruja
por ser el apoyo y cariño
incondicional que siempre
tendré en mi vida.

A mis amigos de carrera, con
los cuales el pregrado no hubiera
sido lo mismo, y a todos aquellos
compañeros que han contribuido
en esta etapa de aprendizaje,
mil gracias por los momentos vividos.

A mi asesor, Juan Saldarriaga,
por su valiosa guía durante más de un año
y por mostrarme con sus conocimientos
el área profesional en el cual me quiero
desempeñar.
Finalmente a la Universidad de los Andes
la cual se convirtió en un segundo hogar.

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	Introducción al estado del sistema de saneamiento básico en Colombia.	1
1.2	Justificación y objetivo general	5
1.3	Objetivos específicos.....	6
1.4	Contenido del informe	6
2.	MARCO TEÓRICO.....	7
2.1	Sistemas de drenaje urbano.....	7
2.2	Tipos de redes de alcantarillado	9
2.3	Componentes de un sistema de drenaje urbano.....	12
2.4	Problemas usuales en las redes de drenaje	13
2.5	Diseño tradicional de alcantarillados.....	15
2.6	Diseño optimizado de alcantarillados (Antecedentes)	28
3.	ENTREVISTAS	34
3.1	Objetivo	34
3.2	Entrevistas.....	34
3.3	Bogotá	36
3.4	Cali.....	51
3.5	Medellín	57
3.6	Síntesis del proceso de diseño Colombiano.....	66
4.	INVESTIGACIÓN CIACUA.....	68
4.1	Resultados preliminares de la investigación CIACUA.....	69
5.	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	75

Tabla de Figuras

Figura 1. Interacción entre el medio ambiente y la población.	7
Figura 2. Aguas receptoras contaminadas.	8
Figura 3. Inundación en Bogotá D.C en la carrera 7ma. 2011.....	8
Figura 4. Efecto de la impermeabilización en el caudal de escorrentía (Butler & Davies, 2010).	10
Figura 5. Esquema de un sistema separado. Tomado y adaptado de (Saldarriaga, 2013)	10
Figura 6. Esquema de un sistema combinado. Tomado y adaptado de (Saldarriaga, 2013)	11
Figura 7. Inundación en Puerto Nare, Antioquia.....	14
Figura 8. a) Tubería sin sobrecarga b) Tubería fluyendo con sobrecarga.	15
Figura 9. Algoritmo de diseño para un sistema de drenaje urbano parte a.	16
Figura 10. Algoritmo de diseño para un sistema de drenaje urbano parte b.	17
Figura 11. Modelo Radial de trazado.	18
Figura 12. Modelo Perpendicular de trazado.....	19
Figura 13. Modelo abanico de trazado.	19
Figura 14. Modelo interceptores de trazado.	20
Figura 15. Modelo trazado en bayoneta.....	20
Figura 16. Modelo trazado en peine.	21
Figura 17. Modelo trazado combinado.....	21
Figura 18. Flujo uniforme en una tubería.	23
Figura 19. Sección transversal de una tubería de alcantarillado.	24
Figura 20. Concepto hidráulico de potencia unitaria.....	30
Figura 21. Problema de optimización en sistemas de alcantarillado según la pendiente.	31
Figura 22. Esquema de un problema de diseño de alcantarillado.....	71
Figura 23. Curva de la relación de Manning con la relación de llenado.	72

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1. Índice de pobreza para países centro y sur americanos.	2
Ilustración 2. Municipios con plantas de tratamiento en todo el territorio colombiano.	3
Ilustración 3. Municipios sin alcantarillado en Colombia.	4
Ilustración 4. Inversiones, costos y gastos para el sector de saneamiento básico Según la Superintendencia de Servicios Públicos.....	5

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción al estado del sistema de saneamiento básico en Colombia.

Los sistemas de alcantarillados surgen de la necesidad del ser humano por controlar su entorno y ambiente (Butler & Davis, 2009); este concepto se remonta desde la época antigua, encontrando en evidencias arqueológicas que civilizaciones como la romana, griega y mesopotámica, contaban con sistemas construidos especialmente para drenar y evacuar el agua de las ciudades. Antiguamente el concepto de alcantarillado solo involucraba la evacuación de aguas lluvias o terrenos pantanosos y de lo que se denominaba agua superficial. En ese entonces no se tenía en cuenta lo que era el drenaje de aguas residuales y por lo tanto no había un concepto de tratamiento de contaminantes lo cual llevaba a condiciones de salubridad deplorables en la mayoría de los casos. Hoy en día este concepto ha evolucionado, llevando no solo a sistemas de alcantarillado que drenan las ciudades, si no a sistemas de saneamiento básico que incorporan el drenaje total de una cuenca específica (incluyendo el agua desechada por la población en esta) y adicionalmente incorporan un tratamiento de las aguas para su adecuada disposición y vertimiento en los cauces naturales o cuerpos receptores cercanos al casco urbano.

A pesar de que el concepto de sistemas de drenaje urbano ha sufrido varios cambios en pro del adecuado vertimiento de las aguas, esto con el fin de evitar la contaminación de cauces naturales para su posible uso, todavía en algunos sitios, en especial Latino América, hacen falta grandes cambios para lograr que los sistemas de alcantarillado se diseñen y funcionen óptimamente. En el caso colombiano todavía no se tiene la percepción de que el alcantarillado es un servicio básico esencial a diferencia de la priorización que se tiene para el abastecimiento de agua potable. Estos sistemas solo empiezan a tener importancia cuando surgen emergencias sanitarias, inundaciones o cuando hay un impacto serio en el ambiente, en especial en los recursos hídricos naturales.

Debido a las recientes olas invernales que se han tenido en el país, se han empezado a notar las grandes deficiencias en los sistemas de alcantarillado colombianos. Según datos del periodo invernal de 2008 (Superintendencia de Servicios Públicos, 2010) aproximadamente 1.2 millones de habitantes se vieron afectados en cuanto a problemas en el drenaje de las aguas residuales y pluviales debido a las inundaciones registradas en los cascos urbanos. Las pérdidas reportadas para los prestadores del servicio fueron de \$14.8 mil millones de pesos lo cual para un país en vía de desarrollo, es una cantidad de dinero que no se debería destinar a reparaciones si los sistemas estuvieran bien diseñados. Estos recursos se deberían emplear para ampliar la cobertura de este servicio a todo el país, y de ahí la importancia de centrarse en un diseño adecuado que minimice costos totales pero que a su vez sea una red robusta y funcional en la cual se pueda garantizar que habrá un mínimo riesgo de sobrecargas para evitar las inundaciones en los cascos urbanos.

No obstante, las empresas prestadoras del servicio no son las únicas que llevan la carga económica de las reparaciones y operación de estos sistemas. Se reporto también que los habitantes afectados tenían que asumir un costo de \$12,367 pesos por persona para restablecer la operación normal de la red; esto sin contar que adicionalmente estos deben costear las reparaciones en sus hogares por los daños causados en las inundaciones. De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta que Colombia al presente año (2013) tiene un índice de pobreza del 40.2%(ver **Ilustración 1**) lo cual indica que cerca de la mitad de la población se clasifica como pobre, se infiere sin necesidad de muchos cálculos que la mayoría de personas no tendrían el dinero suficiente para sobrellevar un imprevisto como este sin afectar gravemente la economía de su hogar.

Asimismo, la problemática que lleva el no tener un sistema de saneamiento básico o tener uno poco funcional, en el país representa en salud un valor anual de aproximadamente \$1,210 y \$1,515 miles de millones de pesos lo cual equivale al 1.04% del PIB que produce el país. Todas las anteriores serian razones suficientes para proponer mejoras en las prácticas de diseño de alcantarillados en el país ya que por las cifras que se tienen se ve que hay fallas recurrentes en las redes de alcantarillado colombianos y que hay algo que claramente no está funcionando teniendo en cuenta la concepción actual que se tiene para sistemas de drenaje urbano.

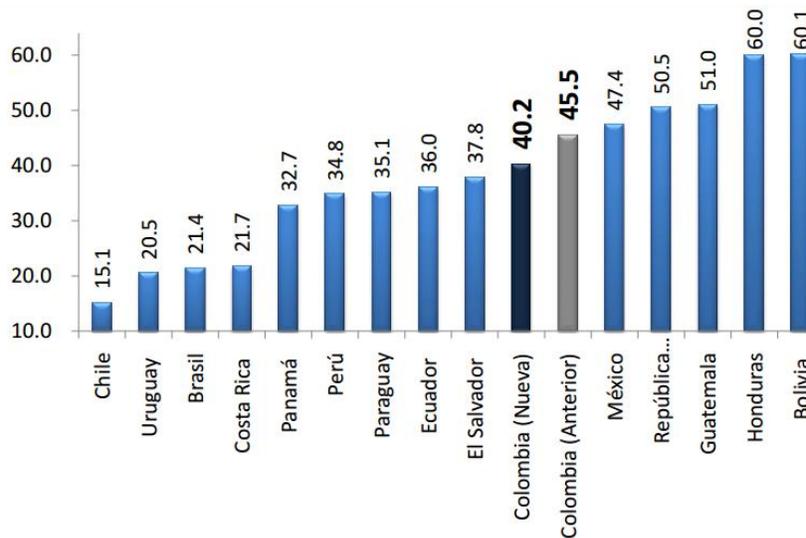


Ilustración 1. Índice de pobreza para países centro y sur americanos (el dato de Colombia esta actualizado a 2013). (The World Bank Group, 2013)

Ahora bien, si se habla de la cobertura que tiene Colombia, al 2009 la población que hacía falta atender en cuestiones de saneamiento básico era de un poco mas de 5.8 millones de personas. Esta cifra al presente año ha disminuido sin embargo según la (Superintendencia de Servicios Públicos, 2010) el aumento de la cobertura no es sinónimo de un aumento en la satisfacción por calidad del sistema de alcantarillado, lo cual nuevamente deja en evidencia que hay falencias en los diseños, operación y construcción de estas redes. Adicionalmente, cabe aclarar que de todos los vertimientos urbanos en el país tan solo el 27,5% se trata (ver **Ilustración 2**), y aunque se sabe

que implementar y operar plantas de tratamiento es muy costoso, el 72,5% restante de las aguas que están siendo descargadas a la cuerpos receptores naturales pueden estar causando un grave problema de contaminación a las cuencas y reservas acuíferas del país. Con esto también se agrava el problema de tratamiento de agua potable para el consumo humano, ya que los procesos de descontaminación serían más especializados y por ende más costosos. Cabe resaltar que si se mira con detenimiento la **Ilustración 2**, se ve que la ubicación de plantas de tratamiento está ligada solo a sectores donde hay explotación de un recurso natural importante. Se observa el Casanare tiene un número importante de PTAR's¹ y esto probablemente esté ligado a la explotación de hidrocarburos en el sector, así como en la Guajira está la explotación de carbón hecha por el Cerrejón². Esto quiere decir que esta ubicación no está siendo equitativa y no está diseñada para atender a la población en cuanto a la disposición de las aguas residuales, si no que están construidas solo para el tratamiento de desechos tóxicos provenientes de la industria.

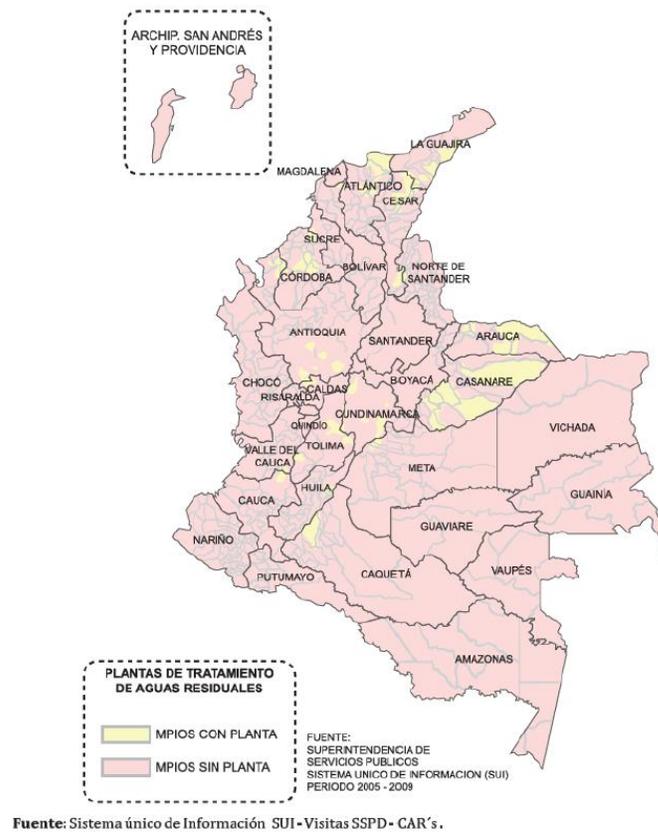


Ilustración 2. Municipios con plantas de tratamiento en todo el territorio colombiano.

Conforme a lo que se ha dicho anteriormente y a pesar de que la cobertura ha aumentado, todavía hay zonas críticas del país como lo son los departamentos del Bolívar, Magdalena y

¹ Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

² El Cerrejón es una empresa la cual tiene un complejo de minería y transporte para explotar el recurso del carbón y los cuales operan en el Departamento de la Guajira.

Atlántico que aun no llegan ni al 50% de cobertura y esto contando que son departamentos relativamente importantes para el país. No se tienen datos exactos de algunos departamentos situados hacia el sur del país como Amazonas, Caquetá y Vaupés, pero se puede inferir que serán muy similares a los que se muestran en la **Ilustración 3**. Donde se ve claramente que lugares cercanos a los departamentos nombrados, como lo son el Vichada y el Guaviare tienen una cobertura entre el 25% y el 50% como máximo.

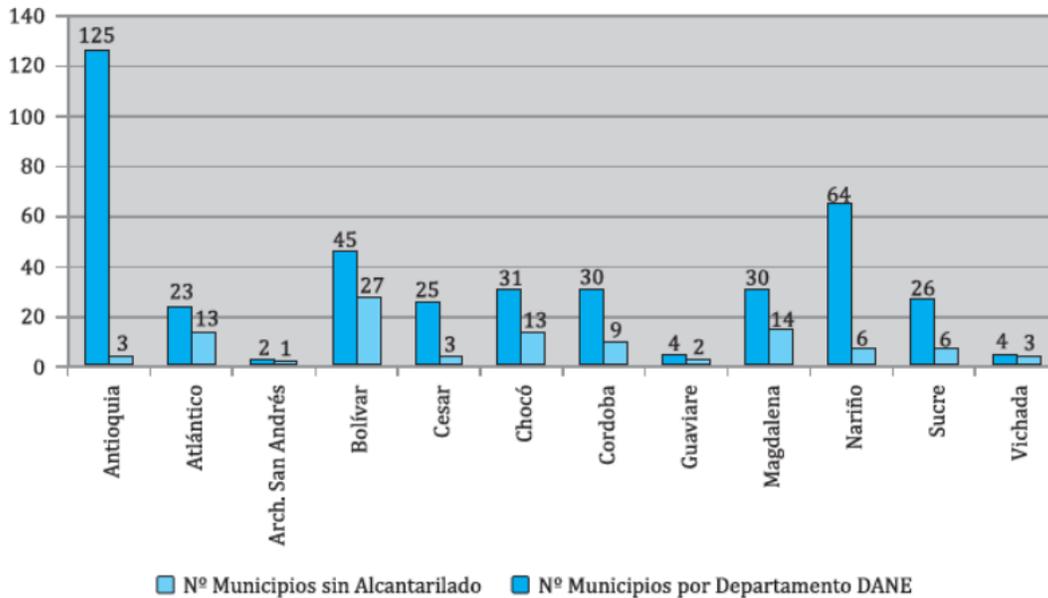


Ilustración 3. Municipios sin alcantarillado en Colombia. Tomado de (Superintendencia de Servicios Públicos, 2010)

El ideal de todo el territorio colombiano sería imitar a municipios como Antioquia donde el 98% de la población cuenta con el servicio de alcantarillado. Este departamento casi en su mayoría tiene políticas un poco más estrictas en cuanto al diseño hidráulico, ya que casi todos los municipios adoptan la normativa de EPM³ la cual es más restrictiva que el RAS⁴ frente a ciertos parámetros y restricciones hidráulicas. De lo anterior si bien no se puede establecer una relación directa con calidad y cobertura, se ve que el evaluar rigurosamente los parámetros de diseño no necesariamente conllevan a costos más elevados lo cual se reflejaría en menores coberturas. Por

³ Empresas Públicas de Medellín, más específicamente “EPM Aguas” la cual es una empresa líder en Colombia en el suministro de agua potable y de servicios de saneamiento básico para el área de Antioquia, más específicamente Medellín y su área metropolitana. Esta empresa tiene normativas específicas de cumplimiento para sistemas de drenaje como lo son las “normas y guía para el diseño hidráulico de sistemas de alcantarillado” las cuales se encuentran en la siguiente dirección Web: <https://www.epm.com.co/site/Home/Centrodedocumentos/Proveedoresycontratistas/Documentos/Manuales.aspx>.

⁴ El RAS es el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, el cual rige en todo el territorio nacional y el cual estipula cierta normativa para el diseño de sistemas de alcantarillado en varios de sus capítulos.

lo tanto sería bueno replantear las políticas establecidas en el resto del país y ver si efectivamente es bueno tener una normativa tan general en todos los casos.

Puntualizando en toda la problemática expuesta anteriormente y teniendo en cuenta el estado en el que se encuentra el sector de saneamiento básico, así como la brecha que existe entre la inversión y los costos registrados para sistemas de alcantarillado (ver **Ilustración 4**), se debería pensar que la práctica de la ingeniería colombiana tendría que enfocarse en la reducción de todo aquello que pueda generar gastos adicionales y tener así los costos mínimos posibles para la concepción de un proyecto de alcantarillado. Por lo tanto, el presente trabajo de grado tiene como objetivo la investigación de las metodologías de diseño que se están siguiendo en el país y con base a los resultados encontrados, plantear críticas y posibles mejoras que se sugerirían implementar en la práctica profesional para tener sistemas de alcantarillado que sean de bajo costo sin dejar de lado el cumplimiento de su función primordial.

Gráfico 2.2. INVERSIONES, COSTOS Y GASTOS PARA EL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO 2009 - 2010

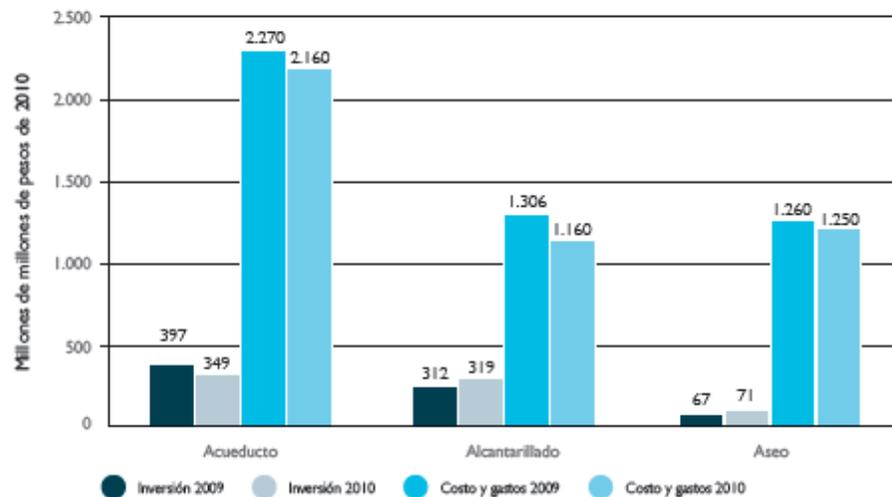


Ilustración 4. Inversiones, costos y gastos para el sector de saneamiento básico Según la (Superintendencia de Servicios Públicos, 2010) para el año 2009-2010.

1.2 Justificación y objetivo general

El desarrollo de este proyecto de grado, resulta de la necesidad de conocer las prácticas más usadas en el diseño actual de redes de alcantarillado en Colombia. Esto con el fin de realizar una comparación con métodos de diseño optimizado desarrollados en la Universidad de los Andes y hacer una crítica que ayude a mejorar la práctica de la ingeniería llegando a reducir costos de una manera considerable en los sistemas de drenaje urbano.

1.3 Objetivos específicos

- Documentarse acerca de los métodos de diseño usados en Colombia para redes de alcantarillado, (Entrevistas a ingenieros con experiencia en el área).
- Evaluar si los métodos actuales de diseño, se están realizando teniendo en cuenta las variables necesarias para reducir al máximo costos.
- Verificar y comprobar si los métodos actuales de diseño están tratando de optimizar recursos, y realizar recomendaciones acerca de que tan acertadas son estas prácticas.
- Realizar una revisión bibliográfica de los métodos más relevantes de diseño hidráulico optimizado para redes de alcantarillado.
- Postular posibles mejoras a los métodos de diseño que se usan actualmente en el país basándose en los avances y resultados obtenidos por el grupo CIE-AGUAS de la Universidad de los Andes.
- Entender cuales serian las variables más representativas para optimizar los diseños hidráulicos.

1.4 Contenido del informe

El presente proyecto de grado está estructurado en 5 capítulos. A continuación se da una breve descripción de cada uno de ellos para familiarizar al lector el contenido del trabajo.

- En el Capítulo 1 se realiza un breve informe acerca del estado en el que se encuentra el sector de saneamiento básico en Colombia para con esto justificar el objetivo principal de la tesis y así contextualizar al lector sobre el tema que se estará abordando.
- En el Capítulo 2 se hace un marco teórico que explica los términos generales técnicos de un sistema de alcantarillado, los problemas usuales en estas redes, el diseño tradicional dividido en trazado y diseño hidráulico y finalmente una contextualización de la optimización en sistemas de drenaje urbano enfocándose más hacia los resultados obtenidos por la Universidad de los Andes
- En el Capítulo 3 se muestra la recopilación de las entrevistas realizadas a los diseñadores de sistemas de alcantarillado en Colombia. Los resultados de presentan para las 3 ciudades principales del país: Bogotá, Medellín y Cali.
- En el Capítulo 4 se habla acerca de los avances en diseño optimizado para redes de alcantarillado.
- En el capítulo 5 se realiza la crítica a la metodología con la que está diseñando en Colombia y se hacen recomendaciones generales para la implementación en el área profesional para la mejora de los resultados obtenidos. También se hacen recomendaciones para la continuación de la investigación en diseño optimizado de sistemas de alcantarillado.

2. MARCO TEÓRICO

Si bien la introducción se centró en mostrar el estado del sector de saneamiento básico y justificar con esto el propósito y objetivo del trabajo de grado, en esta parte se usaron varios términos los cuales no se definieron concretamente pero los cuales son esenciales para el desarrollo de la presente investigación.

En el presente capítulo se hablará acerca de los componentes de un sistema de alcantarillado, de las normativas de diseño que rigen en todo el territorio nacional y en ciudades específicas, así como las metodologías de diseño tradicionales y de optimización que se han desarrollado para sistemas de alcantarillado. Se centrará la parte de optimización en aquellos métodos con los cuales se ha trabajado y desarrollado software en la Universidad de los Andes por parte del equipo de trabajo CIE-AGUAS que hace parte del grupo CIACUA⁵ del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

2.1 Sistemas de drenaje urbano

Los sistemas de drenaje urbano o más comúnmente conocidos como alcantarillados, es todo aquello que hace parte de la recolección y tratamiento de residuos líquidos (McGhee, 1999). Las obras civiles de alcantarillado por lo tanto incluyen todas las estructuras físicas necesarias para recolectar, tratar y disponer las aguas residuales y no solamente la concepción de la red matriz de tuberías como es la idea general del público. Estos sistemas son de gran importancia sobre todo cuando se tienen grandes cascos urbanos debido a que la interacción entre la actividad humana y la naturaleza se hace más fuerte y hay que regularla de una manera que beneficie a ambas partes.

La interacción se puede representar según Butler & Davis (2009) usando el siguiente diagrama, donde se aprecian claramente las relaciones que pueden existir entre estos dos entes y como el sistema de drenaje urbano es un puente de interconexión donde se pueden presentar tanto beneficios como perjuicios a ambas partes.



Figura 1. Interacción entre el medio ambiente y la población⁶.

Las relaciones mostradas en la **Figura 1** se dan del público hacia el sistema de drenaje por medio de la descarga de aguas residuales. Esta descarga proviene tanto de la industria como de viviendas domésticas y se podría relacionar directamente con los caudales de agua potable suministrados a la ciudadanía. Asimismo existe otro tipo de descarga hacia el alcantarillado, pero esta proviene del

⁵ CIACUA es el Centro de Investigación en Acueducto y Alcantarillado de la Universidad de los Andes.

⁶ Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2010).

medio ambiente y por lo tanto es lo que se conoce como precipitación. Un mal manejo de cualquiera de estas 2 descargas en el sistema de drenaje, puede causar impactos serios en cada uno de los entornos. Estos impactos son los que se representa como “contaminación e inundación” en la **Figura 1**. Si no se realiza un tratamiento adecuado del agua, se aliviarán caudales contaminados a las cuencas naturales lo cual afecta la calidad del recurso hídrico (Ver **Figura 2**). De igual manera pasa con la precipitación si esta no es adecuadamente drenada, ya que si se tiene un sistema con insuficiencia hidráulica se producirán inundaciones (Ver **Figura 3**) en los cascos urbanos lo cual afectara la salubridad y condiciones de vida de la población.



Figura 2. Aguas receptoras contaminadas⁷.



Figura 3. Inundación en Bogotá D.C en la carrera 7ma. 2011⁸.

De las anteriores relaciones se puede inferir que la concepción de *descargar* aguas residuales hacia el sistema, ha creado una falsa percepción en la ciudadanía hacia los sistemas de alcantarillado. Hoy en día la mayoría de ciudades latinoamericanas, piensan que estas estructuras son destinadas para desechar cualquier desperdicio que se tenga (ver **Figura 2**), y es por tal razón

⁷ Tomado de <http://www.foroconsultivo.org.mx/home/index.php/comunicacion-social/cti-al-instante/1438-crean-en-la-unam-materiales-para-degradar-contaminantes-del-agua>

⁸ Tomado de: <http://manudi-investigacion.blogspot.com/2011/05/inundaciones-en-colombia.html>.



que muchos de los sistemas de drenaje no funcionan adecuadamente ya que han sido sobrecargados con una cantidad de elementos para los cuales no fueron diseñados. Por tal razón si se habla de diseñar redes de alcantarillado, se debería tener en mente que se debe educar al público para que reconozca a este servicio como algo vital que ayuda al buen desarrollo de las ciudades. Por consiguiente un sistema de drenaje urbano no solo se debe limitar a las partes mostradas en la **Figura 1**, si no que deben haber más involucrados para lograr que se genere un óptimo funcionamiento de la red. Acá juega un papel muy importante la parte gubernamental y política la cual se debe encargar de generar conciencia ciudadana, de igual manera la parte ingenieril toma un rol importante en la parte técnica y una responsabilidad inmensa en la parte de costos y presupuesto, por tal razón hay que ver el todo el alcantarillado como un sistema global en el cual todos los involucrados deben aportar al buen funcionamiento de la red.

2.2 Tipos de redes de alcantarillado

Como se mencionó anteriormente, se puede ver que los sistemas de alcantarillado funcionan con base a dos proveedores principales los cuales serían el medio ambiente y la población. Esta distinción permite hacer una clasificación entre el tipo de agua que se maneja en el sistema:

- **Agua residual:** aquella que se origina desde los dispositivos sanitarios de instalaciones residenciales, comerciales, industriales e institucionales. En esta definición también entrarían a contar los residuos líquidos industriales (McGhee, 1999).
- **Agua Lluvia:** es el flujo proveniente de la precipitación el cual se introduce en un sistema de alcantarillado para ser transportado adecuadamente (McGhee, 1999).

Y por lo tanto del tipo de alcantarillado que se debería emplear. A continuación se muestra la clasificación tradicional que se le da a los sistemas de alcantarillado.

2.2.1 Clasificación según tipo de sistema de drenaje

Según el tipo de aguas manejadas en el sistema se puede construir el alcantarillado por medio de una red de *tuberías* ó se puede manejar el drenaje de forma natural por *escorrentía*. En el caso de aguas residuales, la única opción por estética y salubridad es manejar todo por tuberías; sin embargo en aguas lluvias se podría escoger por cual sistema transportar el agua.

Esta decisión depende en gran medida del área impermeable que se tenga ya que entre mayor área impermeable (es decir zonas pavimentadas), se aumentan los picos de caudal generados en la ciudad (Ver **Figura 4**) y por lo tanto se tendrá que dejar de manejar la precipitación por el terreno natural y empezar a transportar el agua por tuberías.

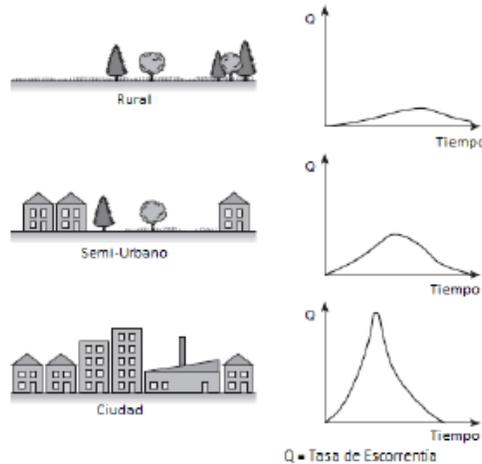


Figura 4. Efecto de la impermeabilización en el caudal de escorrentía (Butler & Davies, 2010).

Quando se decide manejar el sistema de alcantarillado por escorrentía natural se deben incluir sumideros, zanjas de infiltración, cunetas, tanques de almacenamiento, techos verdes y estanques entre otras estructuras. Estos tipos de sistemas se implementan casi siempre al inicio en los sistemas de alcantarillado pluvial; sin embargo en municipios pequeños o con baja densidad poblacional estos son los sistemas más usados por su economía y viabilidad.

2.2.2 Clasificación según agua transportada.

En esta clasificación existen 3 tipos de sistemas de alcantarillado los cuales serían: Separado, Combinado e Híbrido. Los requerimientos de diseño cambian según sea el caso que se tenga; por lo tanto es importante especificar cuáles son sus características.

El primero de estos, como indica su nombre, transporta el agua residual y las aguas lluvias por ductos distintos. Comúnmente estas tuberías suelen ir en paralelo y es el sistema que se recomienda siempre usar en Colombia a menos que se haga un estudio de viabilidad en el cual se demuestre que un alcantarillado Combinado es la mejor opción (Numeral D.1.3 RAS, 2011). En la **Figura 5** se aprecia lo anteriormente dicho, donde claramente se ve que las aguas tratadas en plantas son las aguas residuales, y las aguas lluvias van directamente al cuerpo receptor.

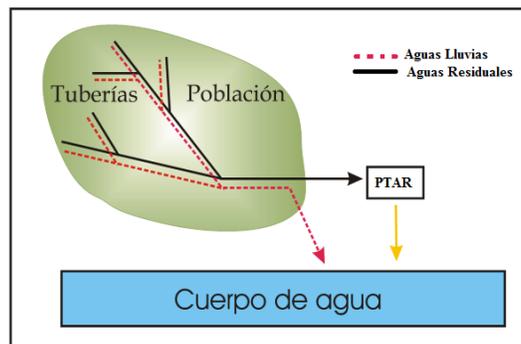


Figura 5. Esquema de un sistema separado. Tomado y adaptado de (Saldarriaga, 2013)

Ambas tuberías se diseñan para que transporten el máximo caudal directamente hacia la PTAR o hacia el cuerpo de agua receptor según sea el caso. Este sistema presenta mayores diámetros para las redes que transportan el agua lluvia, y unos menores diámetros para aquellas que lo hacen con aguas residuales. Debido a lo anterior se infiere que una configuración de alcantarillado de este tipo llevará a costos más elevados, pero por los diámetros manejados en cada una de las líneas no necesariamente al doble del costo. Tener sistemas separados tiene la ventaja de que al no usar aliviós se reduce potencialmente la contaminación de corrientes naturales, de igual manera el tamaño de la PTAR es menor y se protege a la ciudadanía en el caso de tener sobrecargas en el sistema de no tener inundaciones que contengan aguas residuales. Aunque por lo descrito con anterioridad se pensaría que este es un sistema ideal, se debe tener en cuenta que lograr una separación total de las aguas es casi imposible. Esto debido a que a las tuberías de aguas residuales, el agua lluvia tratara de entrar por infiltración y flujo indirecto⁹ (lo cual se puede reducir teniendo buenas prácticas constructivas y control en tiempo real), y de la misma manera el concepto de contaminación seguirá estando presente en la descarga de aguas lluvias, ya que estas no siempre estarán libres de contaminantes.

El sistema combinado es aquel que maneja tanto aguas lluvias como residuales por la misma tubería (ver **Figura 6**). Esta configuración es la más usual en alcantarillados antiguos ya que la parte de tratamiento de contaminaste no era de mayor importancia. En temporada seca por esta tubería pasaría solo aguas residuales, y en temporada de lluvias fluiría un caudal combinado, por lo tanto el criterio de elección del diámetro es complicado y lleva siempre a sistemas sobredimensionados en su totalidad. Debido a esto se emplean aliviós combinados, los cuales se usan para sacar agua del sistema cuando se tengan crecientes muy grandes, con lo cual nuevamente se descargan contaminantes importantes al cuerpo de agua pero se logra tener una planta de tratamiento de menor tamaño.

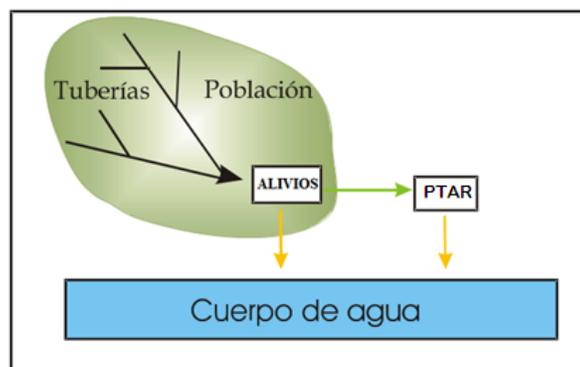


Figura 6. Esquema de un sistema combinado. Tomado y adaptado de (Saldarriaga, 2013)

⁹ El flujo indirecto resulta de las conexiones erradas en la red de alcantarillado, lo cual se relaciona con conexiones domiciliarias de lluvia a las tuberías de aguas residuales.

Por último se tendría el sistema Híbrido, el cual es una mezcla de los dos anteriores. Esto se da con frecuencia en ciudades en las cuales ya se tenía un sistema montado (comúnmente combinado) y se decide que toda ampliación de la obra civil se manejara como un sistema separado. También pueden existir casos en los que el urbanismo que se tenga no permita que se instalen dos tuberías debido a que no hay espacio público por donde hacerlo. En este caso se implementan secciones de alcantarillado combinado siendo la única opción viable constructivamente.

2.3 Componentes de un sistema de drenaje urbano

Todos los sistemas complejos de alcantarillado urbano tienen 7 componentes principales (Saldarriaga, 2013) lo cuales se listan a continuación:

1. Componentes de captación
2. Componentes de conducción
3. Componentes de inspección y conexión de colectores
4. Componentes de regulación y alivio
5. Componentes de bombeo.
6. Plantas de tratamiento
7. Cuerpo receptor

Los componentes de captación son aquellos que recolectan el agua en una primera instancia. Entre ellos están los componentes de agua lluvia, los cuales serían principalmente **canaletas** y **bajantes**, las cuales conducen al agua lluvia recolectada en techos y la transportan hacia el alcantarillado directamente o hacia un **tanque de almacenamiento temporal**. De igual manera están los **sumideros** los cuales son estructuras diseñadas para recolectar la escorrentía que drena a través de las calles; estos tienen cajas o cámaras las cuales están conectadas a la red de alcantarillado (Numeral D.7.6. RAS 2011).

En los componentes de conducción se tienen **tuberías** las cuales abarcan el mayor porcentaje de área en una red y son la estructura encargada de transportar todo el caudal hacia la planta de tratamiento o al cuerpo receptor. Las tuberías pueden estar hechas de distintos materiales, sin embargo en el caso colombiano las más comunes serían concreto y PVC.

Las **cámaras de inspección**, de **quiebre** y de **caída** hacen parte de los componentes de inspección y conexión de colectores. Estos se usan con el fin de modificar la geometría y dirección de la red así como para la inspección, mantenimiento y aireación del alcantarillado. En el caso de las cámaras de quiebre y caída estas se usan para disminuir la velocidad de flujo en un tramo de tuberías y disipar la energía que lleva el flujo por una pendiente alta.

Análogamente, se encuentran los componentes de regulación y alivio entre los cuales están **aliviaderos**, **sifones invertidos**, sistemas de **almacenamiento temporal**, **canales de drenaje** y por último **disipadores de energía**. Los anteriores se encargan de: permitir una salida de parte del

agua que viaja por el alcantarillado cuando ocurre un evento extremo de precipitación, evitan la interferencia con otros servicios públicos, retienen los contaminantes en el sistema de alcantarillado en lugar de enviarlos al cuerpo receptor, conducen la escorrentía pluvial y disminuyen la energía del flujo para su adecuada entrega respectivamente.

Finalmente si dada la topografía de la zona existen sitios en los que no se pueda concebir el sistema por gravedad, se deben incorporar sistemas de bombeo los cuales eleven el nivel de la línea piezométrica para vencer la diferencia de altura topográfica y llegar a un lugar determinado. Comúnmente los sistemas de bombeo se dan para llegar a la PTAR o en lugares de contrapendiente. En esta parte también se pueden encontrar pozos de succión los cuales son compartimientos destinados a recibir y acumular las aguas residuales durante un determinado período.

En cuanto a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), se tiene que estas son estructuras que dependiendo de la complejidad de la ciudad, la cantidad de la población y los usos que se le da al cuerpo receptor aguas abajo de la descarga, se deciden implementar o no. Estas plantas se diseñan con el fin de desinfectar el recurso hídrico y entregar el agua al cuerpo receptor con una calidad mínima, para que este no se vea afectado y su capacidad de autodepuración sea suficiente para lavar los contaminantes entregados. Los tratamientos pueden variar según la necesidad que se tenga (López, 2011). Puede haber pre-tratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario. Esto depende nuevamente de los usos aguas abajo que se le da al cuerpo receptor y de la calidad con la que se quiera entregar el agua.

Por último, pero no menos importante se tendría el cuerpo receptor el cual es el cuerpo hídrico donde se realiza la descarga de todas las aguas provenientes del alcantarillado. Este componente es de suma importancia para el diseño de toda la red, debido a que es con base a las características y fortalezas de este que se debería plantear todo el diseño incluyendo el tipo de tratamiento a usar y por lo tanto el dimensionamiento de la planta. Las características principales que se miran de este cuerpo son su capacidad de autodepuración en una longitud dada y los usos aguas abajo estipulados por las necesidades de la población aledaña. Cabe resaltar que la concepción actual y pasada de los sistemas de drenaje urbano no tienen en cuenta al cuerpo receptor como una parte integral del sistema. Sin embargo, si se quiere hablar de un óptimo funcionamiento de la red en cuanto a costos y diseño se debería incluir a este último como parte definitiva en la concepción del proyecto.

2.4 Problemas usuales en las redes de drenaje

Los problemas en la red se pueden dar por causas externas al sistema o por fallas en los elementos propios del sistema. Las fallas más comunes provienen de defectos constructivos como malos acoples y uniones defectuosas lo cual puede llevar a fugas, grietas, fracturas e inclusive colapso total de la tubería. De la misma manera, tener juntas inadecuadas o no impermeabilizadas puede llevar a infiltraciones en el sistema o en el peor de los casos exfiltración de las aguas provenientes

de las alcantarillas lo cual contamina las aguas subterráneas y además causa problemas de salubridad.

Las causas internas de las fallas pueden producirse debido al material y al tamaño de la tubería. Existen algunos materiales que son más susceptibles a cambios químicos y por lo tanto son más propensos a la corrosión y a la abrasión, los cuales son fenómenos asociados con la oxidación y el desgaste del material respectivamente. La edad de la tubería también se considera una razón de falla en el sistema. Otros ejemplos de causas internas de fallas en las tuberías serían el taponamiento por grasas y arenas, el taponamiento por sedimentación y las obstrucciones por materiales sólidos de gran tamaño desechados en el sistema. Todas las anteriores se pueden evitar siempre y cuando se haga un mantenimiento riguroso de la red.

Las fallas por causas externas, suelen estar asociadas con crecimiento de raíces en el terreno las cuales eventualmente pueden penetrar la tubería reduciendo su sección hidráulica y disminuyendo el caudal que pueden mover. También se le asocia el daño a actividad sísmica o movimientos de tierra que causen la inestabilidad en el terreno y por ende terminen afectando la estructura.

Las anteriores fallas, ya sean externas o internas, lo que producen es que se disminuya la capacidad hidráulica del ducto y esto, sumado el aumento en la tasa de infiltración en los sistemas, lleva a que se produzcan sobrecargas en las tuberías ya que supera el caudal para el cual fue diseñado el ducto. La sobrecarga es un fenómeno que se da cuando la tubería se presuriza y en llegados casos puede llegar a producir inundaciones en el casco urbano debido al rebose de las aguas por las cámaras de inspección. Esto es el problema más frecuente en sistemas de alcantarillado, y eso lo que se debe velar por evitar cuando se realice el diseño ya que se tendrían situaciones como las mostradas en la **Figura 7**. En la **Figura 8** se puede ver un esquema del fenómeno físico que ocurre en las tuberías.



Figura 7. Inundación en Puerto Nare, Antioquia¹⁰.

¹⁰ En 2011 el 85% del casco urbano quedó inundado debido a la ola invernal Tomado de: <http://noticias.terra.com.co/invierno/puerto-nare-tiene-85-por-ciento-de-casco-urbano-inundado,274724621fc8f210VgnVCM20000099f154d0RCRD.html>

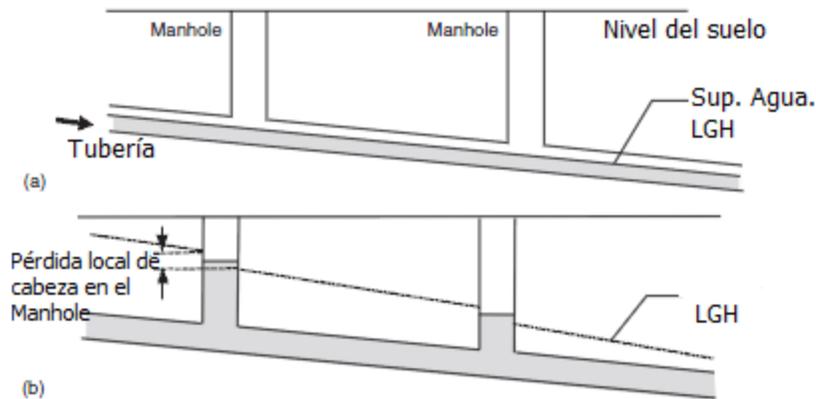


Figura 8. a) Tubería sin sobrecarga b) Tubería fluyendo con sobrecarga¹¹.

2.5 Diseño tradicional de alcantarillados.

El diseño de un sistema de alcantarillado consta de dos partes: el trazado horizontal (configuración de las tuberías en planta) y el diseño hidráulico del mismo. El primer proceso se da por la experiencia y criterio del ingeniero a cargo del proyecto y no tiene unos parámetros establecido de obligatorio cumplimiento, excluyendo el hecho de que la red debe llegar a un punto de descarga establecido. El segundo depende de la decisión de trazado que se tome y por lo tanto solo se puede desarrollar una vez establecida la configuración de la red y teniendo en cuenta las cotas de los puntos de arranque y de descarga que se plantearon para el sistema. Este segundo proceso si debe cumplir con ciertos parámetros hidráulicos dictados por la ley y por lo tanto es una metodología organizada que sigue un criterio matemático riguroso.

De lo anterior se pensaría que la mayor variabilidad en el proceso de diseño surge de la parte del trazado ya que podría haber múltiples criterios de elección de cierta ruta para drenar las aguas de la ciudad. Sin embargo existen ciertas premisas que siguen casi todos los diseñadores y algunas otras que cambian dependiendo las condiciones topográficas que se tengan en el sitio. A continuación se muestra un esquema general de lo que es todo el proceso de diseño (Butler & Davies, 2010).

¹¹ Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2010).

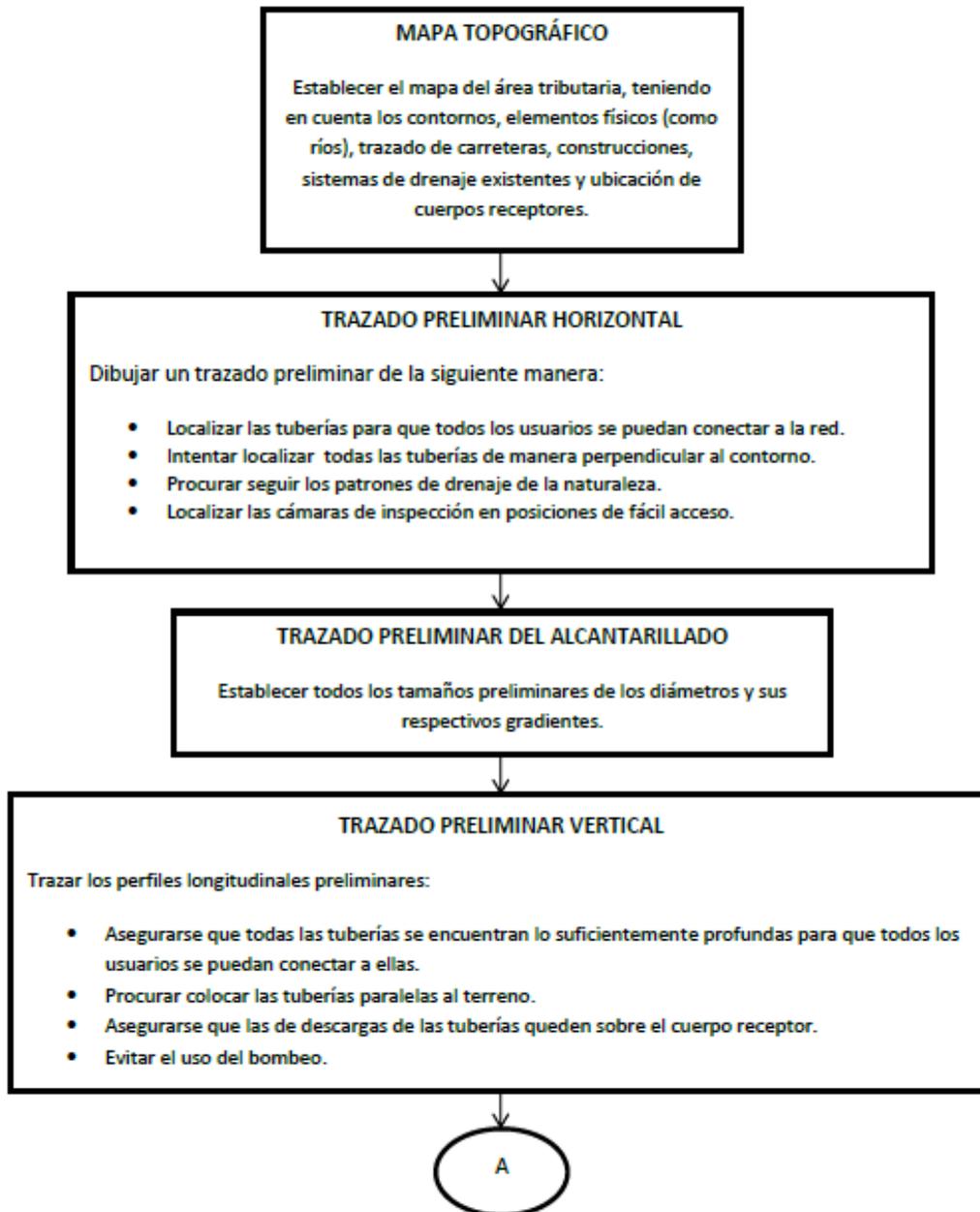


Figura 9. Algoritmo de diseño para un sistema de drenaje urbano parte a. ¹²

¹² Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2010)

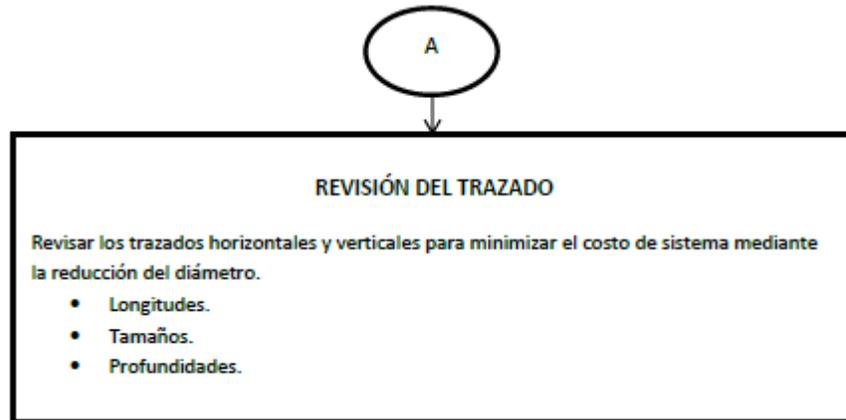


Figura 10. Algoritmo de diseño para un sistema de drenaje urbano parte b. ¹³

En la **Figura 9** y **Figura 10** se puede observar que como primer paso se debe conocer la topografía detallada de la zona donde se realizará el proyecto, con el urbanismo claramente establecido (distribución de calles, cuerdas, edificaciones, zonas verdes). Se debe tener identificado el sitio de descarga de la red. En caso de ser una red totalmente nueva, se debe ubicar el punto donde se realizará la planta de tratamiento o el lugar donde se harán los vertimientos, y en el caso de una ampliación de la misma, se debe conocer el sitio de empalme al que se debe llegar.

Luego de esto, a criterio del diseñador y viendo la distribución del plano topográfico anteriormente descrito, se debe realizar la distribución de las tuberías y la conexión entre ellas de forma que todos los suscriptores se puedan unir a esta. Este trazado se hace tratando de imitar el drenaje natural que tenga la cuenca y siguiendo la topografía del terreno. Una vez terminado este trazado se procede a realizar el diseño hidráulico de la red siguiendo los parámetros y restricciones establecidos. Se realiza el perfil vertical de todas las tuberías en la red procurando que la profundidad de esta sea lo suficientemente grande para permitir las conexiones de los usuarios y que no supere la cota del punto de descarga ya que se debe llegar siempre por encima de este. Por último se realiza una revisión del trazado y de los perfiles de los conductos y se tratan de hacer pequeños cambios tratando de minimizar en la longitud total de la red, los tamaños de las tuberías, y las profundidades de excavación determinadas.

El diseño adecuado de una red de alcantarillado es de suma importancia debido a la cantidad de presupuesto que se debe invertir para lograr la construcción de este. Por lo tanto la responsabilidad de lograr la alternativa más económica es fundamental para la aprobación de un proyecto. Es deber del ingeniero velar por cumplir con la parte hidráulica del sistema, la cual es drenar adecuadamente las aguas producidas en la ciudad tratando de reducir al mínimo las sobrecargas en la red y así mismo lograr lo anterior restringiendo al máximo los costos totales.

¹³ Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2010)

A continuación se profundizará en la explicación de tanto el diseño hidráulico de la red como en la bibliografía que se tiene para el trazado del sistema.

2.5.1 Trazado de la red

En la sección anterior, en el **Figura 10**, se establecieron algunos criterios bajo los cuales se puede realizar el trazado de una red de alcantarillado ya sea pluvial o sanitario. No obstante, no se especificó ninguna manera en la cual distribuir tantos colectores principales¹⁴ como secundarios¹⁵, los cuales son la forma de clasificación de los ductos en un sistema de alcantarillado. El primer trazado que se debe realizar es el trazado de los **colectores principales** ya que establecerán la ruta principal de drenaje del agua y por lo tanto la ruta de mayor caudal. A pesar de que cada proyecto de alcantarillado es distinto debido a que la topografía es variable de lugar a lugar, se encontraron en la literatura 4 formas generales de trazado de colectores principales las cuales son: Radial, perpendicular, en abanico y por interceptores.

El **trazado radial** es aquel que se implementa cuando la topografía del terreno facilita las condiciones para que el agua drene del centro de la población hacia la periferia. Esto hace que se deba implementar más de un colector perimetral, los cuales recojan el agua pluvial que llegue a esos sectores extremos y finalmente los conduzcan hacia el interceptor principal. Esto se puede apreciar de una mejor manera en la **Figura 11**.

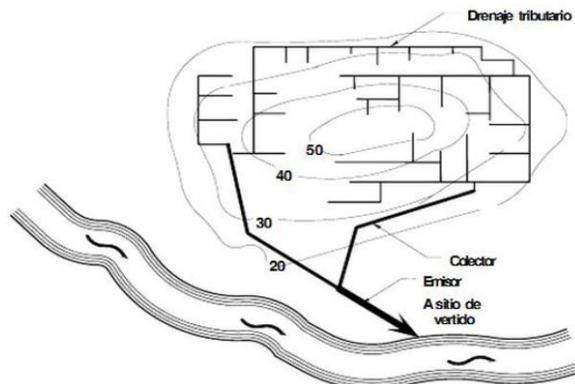


Figura 11. Modelo Radial de trazado¹⁶.

Por otro lado, el **trazado perpendicular** se llama de este modo debido a que los colectores van perpendiculares a las corrientes y estos descargan a un interceptor principal o a la corriente misma. Normalmente se usan en sitios donde la población se ubica a lo largo de un cuerpo

¹⁴ Los colectores principales son aquellos tramos de conductos que transportan el caudal total recolectado de todos los usuarios hacia un interceptor principal el cual lleva las aguas al lugar de disposición final.

¹⁵ Los colectores secundarios son aquellos que recolectan directamente los caudales producidos en toda la urbanización y son las tuberías que se conectan a los colectores principales. Estos colectores son ramificaciones del colector principal.

¹⁶ Tomado de (Universidad Autónoma Metropolitana, 2006)

receptor o corriente y se tiene la favorabilidad que el nivel topográfico va disminuyendo hasta llegar a este sitio de descarga.

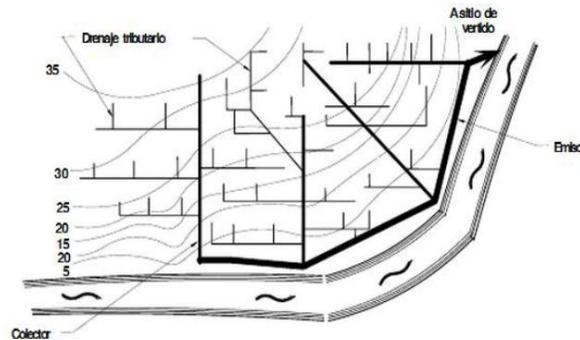


Figura 12. Modelo Perpendicular de trazado.¹⁷

En la **Figura 12** se aprecia un modelo de cómo sería un trazado perpendicular. Estas configuraciones también son útiles cuando se puede descargar directamente sobre los cuerpos receptores es decir un alcantarillado pluvial o un alcantarillado con bajos índices de contaminación o por el contrario cuando se tiene un cuerpo receptor con una capacidad de autodepuración muy grande.

El **trazado en abanico** se aplica cuando se tienen poblaciones ubicadas en un valle. Lo que se hace en estos casos, es concentrar toda el agua hacia la mitad del valle por medio de colectores secundarios y luego conectarlos todos bajo un ducto principal el cual transporta las aguas hacia el interceptor. Esto se puede observar en la **Figura 13**.

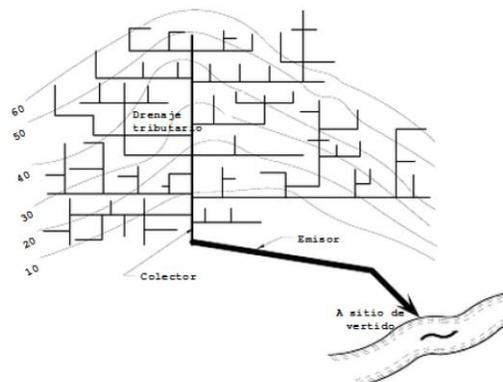


Figura 13. Modelo abanico de trazado.¹⁸

Finalmente se tiene el **trazado por interceptores** el cual se hace bajo condiciones topográficas muy específicas, las cuales tiene como características principales que las curvas de nivel son casi

¹⁷ Tomado de (Universidad Autónoma Metropolitana, 2006)

¹⁸ Tomado de (Universidad Autónoma Metropolitana, 2006)

paralelas entre sí. En estos casos lo ideal es poner los colectores transversalmente a la curvas de nivel. El esquema se observa en la **Figura 14**.

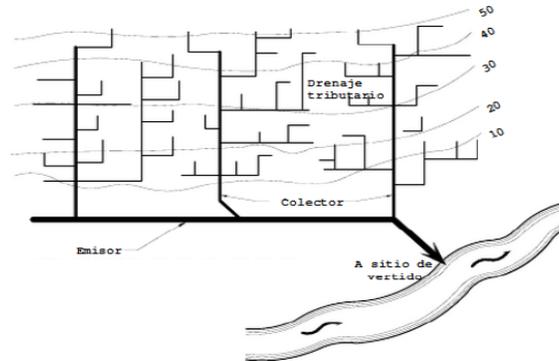


Figura 14. Modelo interceptores de trazado.¹⁹

Para el caso de los **colectores secundarios**, el trazado cambia completamente y se debe tener en cuenta la ubicación de suficientes tuberías para garantizar la conexión de todos los suscriptores en el área urbana. Por tal razón estos trazados son casi la copia exacta del urbanismo y la distribución de cuadras, viviendas, etc. que se tenga en el casco urbano. Sin embargo, al igual que en el trazado de colectores principales, existe una nomenclatura acerca de la forma en la que se distribuyen los colectores secundarios. Para este caso en específico se encontraron 3 configuraciones las cuales se describen a continuación.

La primera de ellas es el **trazado en bayoneta** (ver **Figura 15**) el cual es un trazado en zigzag que inicia desde una cámara de arranque. Debido a la configuración, por cada punto de intersección donde salgan dos ductos, se exige que haya dos cámaras de inspección respectivamente para garantizar que exista tan solo una salida por cámara. Este sistema disminuye los puntos de arranque no obstante solo se puede utilizar en sitios con pendientes suaves o uniformes.

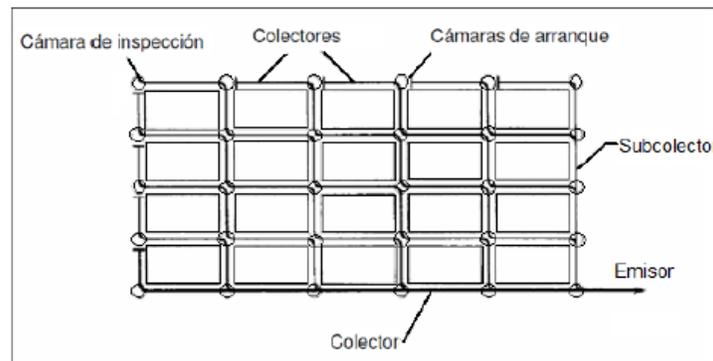


Figura 15. Modelo trazado en bayoneta.²⁰

¹⁹ Tomado de (Universidad Autónoma Metropolitana, 2006)

²⁰ Tomado de (Universidad Autónoma Metropolitana, 2006)

El **trazado en peine** es otra configuración usual de los colectores secundarios. En este tipo de trazado se tienen casi todas las tuberías paralelas entre sí. La captación inicia en un arranque el cual descarga a un subcolector de mayor tamaño el cual a su vez transporta el caudal al colector principal. Estos sistemas suelen trabajar por debajo de su capacidad y la mayoría de las veces exigen un número alto de cámaras de caída para llegar al colector principal debido a la baja profundidad que se maneja en las tuberías secundarias. La ilustración se puede apreciar en la **Figura 16**. Se resalta que de este sistema existen variaciones como lo es el trazado en doble-peine, con lo cual al colector principal se le aporta caudal por ambos lados, convirtiendo al colector principal en una especie de columna vertebral.

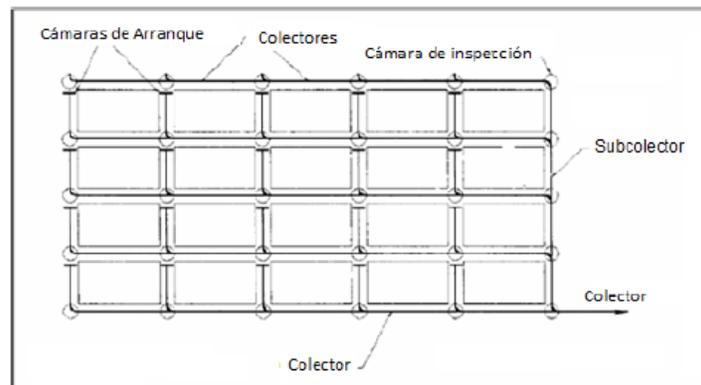


Figura 16. Modelo trazado en peine.²¹

El tercer trazado sería una combinación de los dos anteriores razón por la cual se le denomina trazado combinado. Esta configuración se implementa por razones topográficas y siempre buscando reducir los costos. Son los más encontrados ya que la topografía no siempre permite tener un trazado de un solo tipo.

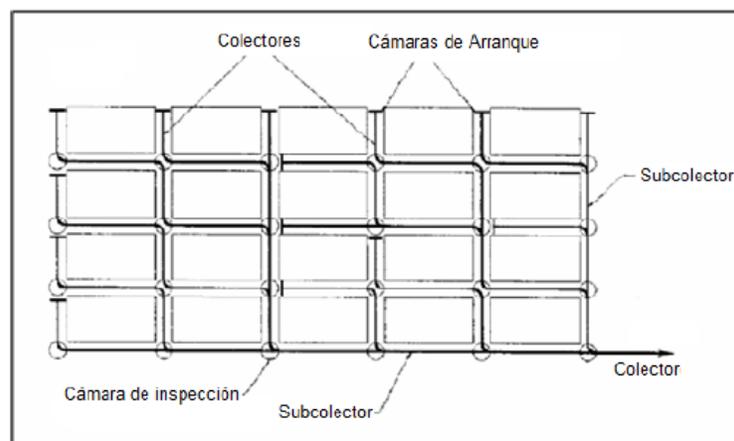


Figura 17. Modelo trazado combinado.²²

²¹ Tomado de (Universidad Autónoma Metropolitana, 2006)

Todos los trazados anteriores son simplemente una forma de clasificación, mas no son las configuraciones por las que se deban guiar lo diseñadores. Nuevamente se recalca, que esto depende enteramente de las características del sitio de construcción y cambiará constantemente. En este proceso de trazado, lo que si se debe seguir es la localización y ubicación de las tuberías con respecto a las viviendas de la ciudad. En el caso colombiano, según el **Numeral D.2.3.5.4** del RAS, para todos los trazados se debe ubicar los colectores siguiendo e lineamiento de las calles. Solo en algunos casos se permite la ubicación por andenes o dentro de las manzanas. Si se tiene un sistema de alcantarillado separado, el colector de aguas lluvias debe localizarse cerca del eje de la vía y el colector de aguas residuales debe ubicarse hacia uno de los costados o a una distancia aproximada de un cuarto del ancho de la calzada y no menor de 0.5 m del sardinel. Hay que tener en cuenta que nunca se debe poner este último en el mismo costado donde este la tubería de acueducto. Todas las anteriores normas son el caso general colombiano; sin embargo dentro de ciudades pueden cambiar la norma teniendo siempre casos con reglamentación más estricta pero nunca más permisiva.

2.5.2 Diseño hidráulico de la red

El diseño hidráulico de la red se basa en encontrar el diámetro adecuado de cada tubería existente en la red para que el caudal de diseño sea transportado en su totalidad hacia el punto de descarga final en el sistema. El diseño obtenido debe ser capaz de cumplir con ciertas restricciones hidráulicas y además de esto debe presentar la elección de material a usar en los conductos y en las estructuras adicionales en todo el sistema. Así como las profundidades y pendientes a las cuales se localizaran los ductos en el momento de la construcción. El diseño debe ser lo más económico posible, es decir se debe minimizar lo mas que se pueda en la excavación del proyecto (disminuir profundidades) y los tamaños de las tuberías deben ser los mínimos con los cuales se cumpla la condición hidráulica de transportar el caudal de diseño.

Para comenzar, el diseño hidráulico se basa en una suposición la cual es que el flujo es uniforme. Aunque la realidad es otra y realmente el flujo de aguas residuales y lluvias es no permanente, para el dimensionamiento hidráulico es válido hacer este supuesto debido a que siempre va a existir una tendencia a que se establezca este tipo de flujo, adicionalmente esto simplifica los cálculos de una manera considerable y no esta tan alejado de la realidad. En un flujo uniforme las características no cambian a lo largo del tiempo ni del espacio por lo tanto se tiene un perfil del flujo similar al mostrado en la **Figura 18** (Strum, 2001).

²² Tomado de (Universidad Autónoma Metropolitana, 2006)

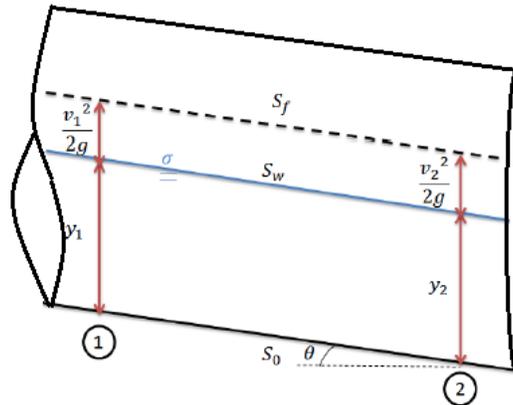


Figura 18. Flujo uniforme en una tubería.

En este tipo de flujo tanto las fuerzas viscosas como las gravitacionales están en equilibrio lo cual hace que la superficie del agua (S_w), la línea de energía total (S_f) y la pendiente de fondo (S_o) sean paralelas entre sí. Esto anterior implica que las pérdidas por fricción serán iguales a lo largo de todo el conducto o tramo.

$$S_w = S_f = S_o$$

Es importante mencionar que esta forma de diseño solo se permite para redes secundarias, pero nunca para la red matriz. Esta se debe diseñar según el **Numeral D.2.3.2** del RAS, debido a su tamaño y a los caudales manejados con un análisis de flujo gradualmente variado, lo mismo que los canales colectores de aguas lluvias y en general colectores de diámetros superiores o iguales a 900 mm. Asimismo aquellos colectores entre 600 mm y 900 mm se deberían verificar usando flujo gradualmente variado. Para tuberías más pequeñas esto no es necesario debido a que el flujo uniforme es suficiente para explicar la naturaleza del flujo.

2.5.2.1 Ecuaciones de diseño

Todas las ecuaciones de diseño, se derivan del hecho que las tuberías de alcantarillado jamás pueden trabajar presurizadas. Es decir nunca pueden fluir a su máximo llenado ya que esto causaría sobrecargas en el sistema y por ende posibles riesgos de inundación en los cascos urbanos. A continuación en la **Figura 19** se muestra un esquema de esta situación.

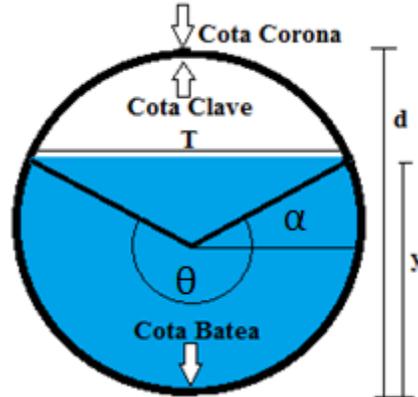


Figura 19. Sección transversal de una tubería de alcantarillado.

donde:

- Y es la profundidad normal de flujo que se tenga dentro de la tubería.
- d es el diámetro del conducto.
- T es el ancho de la lámina de flujo en la tubería.

Para realizar todo el diseño es necesario el cálculo de todas las propiedades hidráulicas del flujo en función del conducto que se tenga. Por tal razón se usan las siguientes fórmulas para caracterizar completamente la geometría de la tubería y así calcular el diámetro necesario para cumplir con un caudal de diseño.

- Ángulo:

$$\theta = \pi + 2 \sin^{-1} \left(\frac{y - \frac{d}{2}}{\frac{d}{2}} \right)$$

- Área Mojada:

$$A = \frac{1}{8} (\theta - \sin \theta) d^2$$

- Perímetro mojado:

$$P = \frac{1}{2} \theta d$$

- Radio hidráulico:

$$R = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right) d$$

- Ancho en la superficie:

$$T = d \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{y - \frac{d}{2}}{\frac{d}{2}} \right) \right)$$

- Profundidad hidráulica:

$$D = \frac{(\theta - \sin \theta)d}{8 \cos(\sin^{-1}(\frac{y-d}{\frac{d}{2}}))}$$

- Esfuerzo cortante en la pared:

$$\tau = \gamma RS$$

- Número de Reynolds:

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

- Número de Froude:

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

Con las anteriores relaciones establecidas se debe proceder a calcular la velocidad del flujo. Esto se puede realizar de dos maneras. Uno haciendo uso de la ecuación de **Manning** y el otro haciendo uso de la ecuación de **Darcy-Weisbach** en conjunto con la ecuación de **Chézy**.

En el medio colombiano, la ecuación más usada de diseño para calcular la velocidad es la ecuación de Manning, propuesta por Robert Manning en 1889:

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad [1]$$

Esta ecuación da una solución rápida a la velocidad del ducto si se tiene el valor de **n** el cual es un coeficiente que depende del tipo de material que se tenga para la tubería. Sin embargo hay que ser cautelosos al usar esta ecuación ya que esta fue determinada para canales rectangulares de alta rugosidad, con lo cual se obtenía flujo turbulento hidráulicamente rugoso (FTHR). Hoy en día con los materiales modernos como el PVC el régimen de flujo que se desarrolla en sistemas de alcantarillado es flujo turbulento hidráulicamente liso (FTHL) haciendo que la ecuación se invalide. No obstante, esta ecuación sigue siendo usada indiscriminadamente sin tener en cuenta las condiciones anteriormente descritas. Adicionalmente se sabe que el coeficiente **n** no es constante y cambia con la profundidad de flujo que se tenga en el momento, por lo tanto se tendría otra razón para no usar esta ecuación en el diseño de alcantarillados.

La otra posibilidad, es calcular la velocidad usando la ecuación de Chézy la cual se muestra a continuación:

$$V = C\sqrt{RS} \quad [2]$$

En esta ecuación **C** es un coeficiente el cual hace referencia a un factor de resistencia al flujo. Si a esta ecuación anterior se le establece la relación que tiene con la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach se obtiene la siguiente correspondencia:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad [3]$$

Una vez teniendo esto, se expresa la ecuación de Darcy-Weisbach en función del factor de Chézy anteriormente descrito y se obtiene lo siguiente.

$$C = -2\sqrt{8g} \log_{10} \left(\frac{ks}{14.8R} + \frac{2.51C}{Re\sqrt{8g}} \right) \quad [4]$$

donde **Ks** si sería la rugosidad absoluta del material con el que se esté trabajando y **g** sería la constante gravitatoria en la tierra. Una vez con esta expresión, se usa la ecuación original de Chézy para dejarla en términos de la velocidad en la tubería, con lo cual se tendría una ecuación explícita para la velocidad, donde **v** la viscosidad cinemática del fluido y **S** sería la pendiente del flujo.

$$V = -2\sqrt{8gRS} \log_{10} \left(\frac{ks}{14.8R} + \frac{2.51\nu}{4R\sqrt{8gRS}} \right) \quad [5]$$

La ecuación [5] sería la adecuada para implementar en sistemas de alcantarillado ya que sirve para cualquier régimen de flujo que se tenga y además es físicamente basada describiendo de una mejor manera el comportamiento real del flujo (Saldarriaga, 2013).

Finalmente una vez se tenga calculada la velocidad, se procede hallar el caudal como:

$$Q = V * A \quad [6]$$

Y con el valor de caudal obtenido se compara con el caudal de diseño establecido y se evalúa si con el diámetro elegido se transporta efectivamente lo requerido. Si esto se cumple el diámetro será el que se eligió en los cálculos, sino este se deberá variar hasta cumplir la condición. Las pendientes de la tubería se eligen normalmente usando la pendiente del terreno; sin embargo este es un valor que depende también de las cotas de arranque de la red y las cotas de descarga así como de los criterios de velocidad máxima y mínima que se deban cumplir en la red y los cuales se explicarán en la siguiente sección. La idea del diseño es entonces realizar este proceso en cada tubería del sistema y lograr tener un equilibrio económico entre los diámetros encontrados y las profundidades o pendientes a las que se instalaría cada tubería.

Claramente este proceso depende de cuál sea el caudal de diseño y esto a su vez depende de qué tipo de aguas se esté manejando en el sistema. En el presente trabajo no se profundizara mucho acerca de la determinación de este caudal, pero si se quiere detallar en ese proceso se recomienda leer el **Capítulo D** del RAS.

2.5.2.2 Restricciones hidráulicas.

Con el fin de garantizar el buen funcionamiento de la red de alcantarillado, la normativa colombiana establece por medio del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS-2000) unas restricciones en la parte de diseño las cuales aseguran que la red sea de fácil mantenimiento, no presente daños a causa de la energía del flujo y no hayan procesos de sedimentación los cuales puedan afectar la capacidad hidráulica de las tuberías. A continuación se listan los criterios de cumplimiento obligatorio para cualquier sistema de alcantarillado que se construya en el país (Numerales D.3.3.7-12 RAS-2011).

- **Diámetro mínimo:** Se estipula un valor mínimo en pro de la buena operación de la red y de su fácil mantenimiento; el diámetro debe ser suficiente para que no se presenten obstrucciones en el mismo debido a la entrada de grandes objetos. Este valor se establece en 250 mm para aguas lluvias, pero puede reducirse a 200 mm para Niveles de

Complejidad del Sistema Bajo y Medio y con una debida justificación. Cabe aclarar que es norma tener un diámetro mayor o igual para cualquier tramo aguas abajo, y bajo ningún concepto se permite tener contracciones en las secciones de tubería

- **Velocidad máxima:** Se limita para que no se produzcan altas pérdidas de energía en curvas y uniones, así como controlar la formación de resaltos hidráulicos generados por choques intermitentes en la tubería. Velocidades muy altas pueden incurrir en daños estructurales, entrapamiento de aire y adicionalmente habría la necesidad de construir estructuras de disipación de energía ya que podría presentarse daños por socavación. La velocidad depende del material: La máxima es 5 m/s para materiales comunes (concreto) y para termo plásticos (PVC) de 10 m/s.
- **Velocidad mínima:** Se define para lograr velocidades lo suficientemente grandes para que ayuden a transportar los sedimentos acumulados en el fondo de la tubería y así lograr evitar eventualmente el taponamiento de la misma.
 - Para aguas lluvias: 0.75 m/s.
 - Para aguas residuales: 0.45 m/s.
- **Esfuerzo cortante mínimo:** Se debe establecer un mínimo esfuerzo cortante contra la pared de la tubería que ayude a arrastrar las partículas sedimentadas al interior del sistema (criterio de auto limpieza).
 - Para aguas lluvias: 2 Pa.
 - Para aguas residuales: 3 Pa.
- **Pendiente mínima y máxima:** Son aquellas pendientes que permiten cumplir los criterios de velocidad mínima, esfuerzo cortante mínimo en la tubería y velocidad máxima respectivamente.
- **Profundidad hidráulica máxima:** Profundidad de flujo máxima que se debe tener en una tubería para dejar espacio para la circulación de aire y así mismo evitar sobrecargas debido a la perturbación del flujo y transportar el máximo caudal posible por la tubería. El RAS da un rango entre el 70% y el 85% en la relación de llenado.
- **Profundidad mínima a cota clave:** Se estipula para garantizar protección de las tuberías y garantizar el flujo por gravedad de las aguas. Los valores recomendados son de 0.75 m cuando la tubería se encuentra en vías peatonales o zonas verdes, y de 1.20 m cuando ésta se encuentre en vías vehiculares.
- **Profundidad máxima a cota clave:** Según el RAS-2000, se estipula que este valor debe ser de 5 m; sin embargo esta valor está más ligado a la pendiente máxima que cumpla con los criterios de velocidad.
- **Número de Froude:** Debe estar por encima de 1.1 o por debajo 0.9 para evitarse el régimen crítico en el diseño.

Las anteriores son las normas que rigen en todo el territorio nacional, sin embargo puede haber sitios en el país que tengan un norma más restringida y que sea de obligatorio cumplimiento para esa zona. Tal es el caso de Medellín y las normas estipuladas por EPM donde aquellas normas que cambien con respecto al RAS son las que se listan a continuación:

- **Diámetro mínimo:**
 - Para aguas lluvias: 250 mm.
 - Para aguas residuales: 200 mm.
- **Velocidad máxima:** Es igual a lo estipulado al RAS, sin embargo recomiendan que cuando la velocidad en una tubería sea superior a 4 m/s se debe hacer un análisis hidráulico y de desgaste por erosión detallado del tramo, en particular de las estructuras de disipación de energía, cámaras de inspección, caída, etc.
- **Pendiente máxima:** Se ajusta igual a los criterios de velocidad máxima; sin embargo en caso de que la pendiente de la tubería sea superior al 15%, para tuberías de superficie exterior lisa, o al 25% para tuberías de superficie exterior rugosa, el diseñador debe incluir el diseño de los anclajes necesarios para garantizar la estabilidad de la tubería.
- **Profundidad hidráulica máxima:** Debe ser del 85% del diámetro real interno de cada una de las tuberías.
- **Profundidad mínima a cota clave:** El valor mínimo permisible, en todos los casos, es de 1.2 m.

En el medio académico se han hecho recomendaciones hacia los parámetros de diseño anteriores y por ser considerados de gran relevancia se hablara de ellos en esta sección. Según Saldarriaga, (2013) existe un rango para el número de Froude en el cual no se debería diseñar ($0.7 < Fr < 1.5$). Esto debido a que acá se encuentra el flujo cuasi-critico, el cual es inestable y difícil de caracterizar debido a los cambios súbitos en la velocidad y la profundidad. Sin embargo esto no representaría ningún problema cuando se tiene relaciones de llenado inferiores al 70%; por lo tanto en esta parte los diseños podrían ser aprobados ya que el riesgo de presurización sería mínimo.

2.6 Diseño optimizado de alcantarillados (Antecedentes)

La optimización es un proceso que se encarga de intentar encontrar la mejor solución posible a un problema, generalmente en un tiempo limitado (Duarte Muñoz, 2007). Este proceso se aplica a varios procesos en la ingeniería y siempre lo que se busca encontrar es obtener la solución más económica posible.

Cualquier problema de optimización se debe desglosar en 3 partes como mínimo, las cuales son: **función objetivo, variables de decisión y restricciones** (Navarro, 2009). Estas partes se deben definir con claridad y se deben involucrar aquellas variables que sean más sensibles a los cambios en el sistema. En el caso de la función objetivo, esta debe ser definida como una relación matemática en la cual se deben reemplazar los valores de las variables dependiente; en el caso específico de sistemas de alcantarillado se podría pensar que esta ecuación matemática debería ser algo que describa los costos totales de la red, involucrando en principio los diámetros y las excavaciones los cuales a su vez serian las variables de decisión. Finalmente las restricciones son aquellos valores con los cuales se puede definir el intervalo de búsqueda; acá entraría la normativa RAS-2000 de la que se habló anteriormente y podría eventualmente entrar cierto valor límite de presupuesto que se tenga para la obra civil.



Según la naturaleza del problema, se debe emplear cierta clase de optimización. En el caso de sistemas de drenaje urbano la optimización ideal sería la **multiobjetivo** ya que esta requiere la optimización simultánea de más de un objetivo, como lo sería la disminución de diámetros, de excavación, de costos constructivos, entre muchos otros que afectan el costo global de una red de drenaje urbano. Sin embargo muchas veces estas funciones de minimización o maximización pueden entrar en conflicto entre sí teniendo que, para alcanzar el global deseado, se deba sacrificar algunos objetivos para lograr mejorar en otros. Según Mays & Tung, (1992) la optimización multiobjetivo no requiere encontrar la solución óptima, sino el conjunto de soluciones no inferiores, las cuales los autores definen como “aquellas para las que no existe otra solución factible que pueda generar mejoras en un objetivo sin producir desmejoras en por lo menos uno de los otros objetivos”. Por lo tanto, de lo anterior se podría decir que efectivamente este método sería el más adecuado para tratar de solucionar este tipo de problemas, ya sea en el trazado de la red o en el diseño hidráulico de la misma.

Dentro de la optimización multiobjetivo pueden existir distintas técnicas para lograr la mejor solución; entre estas se encuentra el **cálculo diferencial**, la **programación lineal**, **no lineal**, **dinámica** y los **algoritmos genéticos** entre otras. De las anteriores la más usada para tratar de abordar el problema de alcantarillado es la **programación dinámica**, la cual relaciona múltiples variables de decisión interdependientes y realiza el proceso de decisión por etapas. Sin embargo la mayoría de estos modelos solo permiten ingresar una variable de decisión ya que incluir más representa gastos computacionales significativos en tiempo, por lo tanto la implementación de estos modelos es complicada en la mayoría de los casos, y no tienen en cuenta conceptos de decisión como la elección de un diámetro mayor o igual en tramos aguas abajo. Métodos como los anteriores han sido implementados por Mays & Tung, (1992) en un programa que buscaba encontrar los menores costos en redes pluviales con base a la cuantificación en términos de valor de diámetro y de la excavación necesaria para la instalación de cada tubería. Asimismo esta la investigación de Walters & Pereira, (1990) los cuales tuvieron en cuenta diseño hidráulico de una sola red como la de diseño de un sistema de alcantarillado separado. En esto tuvieron en cuenta que un tramo puede tener con la altura de los nodos y con las cotas del punto de entrega. En la parte de diseño de sistemas separados, el método tenía en cuenta el hecho de que dos tuberías tuvieran que compartir la misma zona de excavación. El diseño de ellos se realizaba por etapas según el modelo dinámico y cada una de estas etapas estaban conectadas a la cota de la cámara de inspección inmediatamente aguas arriba del tramo. Sin embargo muchos de estos métodos no cumplían la restricción de diámetros.

Por otro lado, la **programación lineal**, aunque ha sido usada para sistemas de distribución de agua potable, no es una buena aproximación para alcantarillados debido a que esta programación exige que las funciones objetivos y restricciones sean lineales lo cual no es una realidad en alcantarillados como se ha venido descubriendo con anteriores investigaciones y trabajos hechos en el ámbito académico. Por lo tanto se ha decidido trabajar con otras metodologías como los son los **algoritmos genéticos** los cuales son una técnica de Inteligencia Artificial (IA) basada en los

procesos de evolución natural, los cuales proponen crear una generación o especie de las cuales sobrevivirá la población más apta y el método buscará reproducir este tipo de especies. Estos algoritmos presentan un rango muy amplio de búsqueda para la solución debido a la naturaleza del concepto de evolución que maneja, por lo tanto se han tratado de buscar metodologías híbridas de algoritmos genéticos en los cuales se disminuya el rango de evaluación y así disminuir los tiempos computacionales.

En la Universidad de los Andes, se ha trabajado en estos temas y se han desarrollado conceptos útiles que han servido como índice en los procesos de optimización aplicados a sistemas de alcantarillado. Estos conceptos son la Pendiente Propia y la Potencia Unitaria de los cuales se hablará a continuación.

2.6.1 Potencia Unitaria y Pendiente Propia.

El concepto de **Potencia Unitaria** fue un término desarrollado por Saldarriaga, Romero, Ochoa, Moreno & Cortés, (2007) que se usó inicialmente como indicador del comportamiento hidráulico en redes de distribución de agua potable. La Potencia Unitaria es la energía que pierde el flujo como consecuencia de su paso a través de un tramo. En el caso de tuberías de alcantarillado se tendría la siguiente definición matemática:

$$PU = Q(h_i - h_{i+1})$$

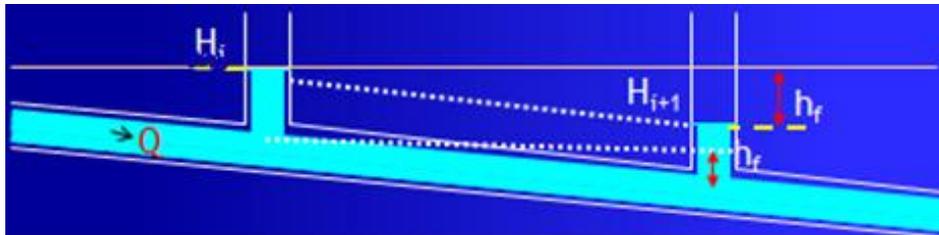


Figura 20. Concepto hidráulico de potencia unitaria.

Donde:

- PU: Potencia Unitaria.
- H_i : Altura piezométrica en la cámara aguas arriba del tramo [m].
- H_{i+1} : Altura piezométrica en la cámara aguas abajo del tramo [m].

Este indicador de confianza ayuda a asegurar que la red, durante su operación, disminuya su probabilidad de presentar algún problema que afecte la infraestructura del sistema o a la comunidad cercana a esta como inundaciones en los cascos urbanos. Este indicador ha sido usado desde 2009 en sistemas de drenaje urbano y hasta el momento a presentado buenos resultados en los trabajos investigativos realizados por la Universidad de los Andes.

Por otro lado la **Pendiente propia** fue un término desarrollado por Saldarriaga & López, (2011) en conjunto con los trabajos hechos por el CIACUA y se define como aquella pendiente que para un diámetro dado, conduce un caudal dado con la relación de llenado (y_n/d) máxima. Este término se desarrolló debido al hecho de que la escogencia del valor de la pendiente dependerá del criterio del diseñador, causando que se perdiera un amplio rango de alternativas. Es por esta razón que se busca generar diseños que optimicen el uso de la pendiente y nuevamente con este parámetro se han logrado resultados bastante acertados buscando el óptimo entre problemas como los descritos en la **Figura 21**. En estos se observa claramente que hay que buscar un equilibrio entre las pendientes usadas ya que esto influencia en los diámetros y en la excavación lo cual a su vez influencia de forma directa los costos totales de la red.

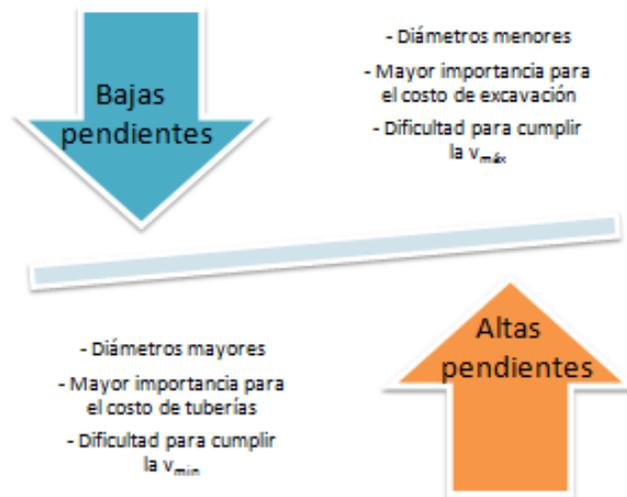


Figura 21. Problema de optimización en sistemas de alcantarillado según la pendiente²³.

La Pendiente Propia puede dar, por su naturaleza, valores que en la parte de instalación y construcción no sean reproducibles; por lo tanto en este proceso se discretiza el valor de la pendiente propia para tener viabilidad en la construcción y así trabajar con el óptimo. Tener estos valores de pendientes óptimas da un buen índice al diseñador para saber con qué valor trabajar a la hora de diseñar y no deja la elección a un criterio de experiencia, el cual a pesar de ser bueno no deja atrás ciertas falencias que se podrían evitar.

²³ Tomado de (Saldarriaga, 2013), Clase de maestría en Recursos Hídricos: Sistemas Integrados de Drenaje Urbano. Universidad de los Andes.

2.6.2 Conclusiones trabajos anteriores CIACUA

A continuación se listarán las conclusiones a las que se han llegado con trabajos anteriores de tesis de grado que involucran la optimización en sistemas de alcantarillado. Los resultados pertenecen a López, (2011), Navarro, (2009), Copete, (2012), Salcedo, (2012) y Pavia, (2010) todos actualmente ingenieros de la Universidad de los Andes.

- La potencia total que disipa la red (calculada como la suma de las Potencias Unitarias de las tuberías) es un parámetro que está relacionado con los riesgos de que se presenten sobrecargas e inundaciones a lo largo del sistema.
- Se ve la tendencia de que al maximizar la Potencia Unitaria se minimizarán los costos de excavación.
- Se concluye que la Potencia Unitaria es un parámetro que sirve para medir la confiabilidad de las redes, pues en todos los casos se obtuvieron resultados significativos con los cuales se establece que al maximizar la Potencia Unitaria se obtendrían menores riesgos de inundación y tiempos de sobrecarga de la red.
- En todos los casos la red de mínimo costo y de máxima Potencia Unitaria, se caracterizó por tener pendientes pequeñas al inicio de los tramos y grandes al final de estos.
- Discretizar la pendiente es un proceso que permite convertir dicho parámetro en un objetivo más del diseño, y no simplemente cuestión de precepción.
- Diseñar únicamente usando Pendientes Propias permite aprovechar al máximo el material del cual se dispone.
- La relación entre pendiente y Potencia Unitaria es un medio que permite optimizar costos de construcción en la medida que el diseño se haga en función de la pendiente.
- Los costos constructivos más bajos se presentan cuando la Potencia Unitaria es elevada en la red de drenaje urbano. Esto siempre y cuando la topografía del terreno sea relativamente plana.
- De manera más detallada y según los resultados obtenidos de este trabajo, se observa que de las alternativas viables, las alternativas óptimas, es decir, las alternativas menos costosas provienen de las alternativas que tienen mayor Potencia Unitaria, de las que mayor profundidad tienen, y de las que menos cambios de diámetro a lo largo de la red presentan. Esto siempre y cuando la topografía del terreno sea relativamente plana.
- El planteamiento de las funciones de costo asociadas con la excavación se consideró pertinente dado que en investigaciones previas no se consideraban muchos de los aspectos involucrados en la construcción de alcantarillados como lo era el relleno de la zanja, o el entibado de esta, dando así la posibilidad que por su inclusión en la función de costo; este componente resultó más relevante que el asociado con el costo de la tubería.
- En el diseño de sistemas de drenaje urbano el componente más importante de la función de costos es el asociado con la excavación, razón por la cual al intentar optimizar el costo del diseño, el diseñador se debe centrar en características del sistema como la pendiente de la tubería y la profundidad a la que esta se encuentra para asegurar que los costos constructivos sean mínimos.

- El concepto de Pendiente Propia resultó no ser útil cuando los costos de excavación son los más importantes de la red. Esto se puede explicar ya que al aumentar la pendiente se está reduciendo el diámetro de la tubería, situación deseada cuando priman los costos de la tubería; cuando priman los costos de excavación la situación deseada es que la tubería sea instalada lo más superficial posible.
- Se observó que para tramos cortos (menores a 60 metros de longitud) se obtuvieron los menores costos totales, así como coeficientes de determinación aceptables en las relaciones tanto del Índice de Resiliencia como de la Potencia Unitaria con los costos constructivos totales. La reducción en los costos era de esperarse porque la longitud total de la red es casi la mitad que en las demás redes; sin embargo es interesante el comportamiento que presentan los criterios de confiabilidad en los casos donde la longitud es corta.

Estas anteriores conclusiones se listaron en el presente trabajo, debido a que con base a ellas el grupo CIE-AGUAS ha tratado de desarrollar una metodología de diseño no solo para la parte hidráulica si no para el trazado en sí. Por tal razón es de suma importancia entender el trasfondo del trabajo hecho por este grupo, ya que con los resultados obtenidos por esta dependencia del CIACUA es que se podrá realizar una crítica o una propuesta a la mejora en la metodología colombiana de los cuales se hablará en los capítulos 4 y 5.

3. ENTREVISTAS

3.1 Objetivo

Uno de los propósitos de esta investigación consiste en indagar acerca de las metodologías que se están aplicando en el país para el trazado y el diseño hidráulico de las redes de alcantarillado. Esto con el fin de saber si se está optimizando adecuadamente todos los costos posibles para tener la alternativa más económica y ver los criterios comunes en todo el proceso de diseño en Colombia.

3.2 Entrevistas

Dentro del marco del proyecto de grado, se diseñó una entrevista con el objetivo de identificar los criterios y metodologías usadas por ingenieros con experiencia en el área de alcantarillados que pudieran dar un esquema general acerca de esta actividad en Colombia. Se contactaron diseñadores en las ciudades principales como los son: Bogotá, Cali y Medellín, las entrevistas se realizaron de manera personal.

A continuación se presenta el esquema de las preguntas hechas a los diseñadores. Algunas de estas preguntas fueron elaboradas en un sistema de selección múltiple para focalizar de una mejor manera la investigación.

1. **¿Qué aspectos son relevantes para elegir el trazado de una red de alcantarillado pluvial?**
 - a) Topografía de la zona
 - b) Ubicación de puntos de descarga
 - c) Ubicación de otros servicios públicos subterráneos
 - d) Tipo y uso de suelo
 - e) Ubicación de las vías, construcciones, zonas públicas, distribución de cuadras, etc.
 - f) Drenaje natural de la cuenca
 - g) Otros (especifique):
2. **¿Qué aspectos son relevantes para elegir el trazado de una red de alcantarillado sanitario?**
 - a) Ubicación de los predios
 - b) Topografía de la zona
 - c) Ubicación plantas de tratamiento y/o puntos de descarga
 - d) Ubicación de otros servicios públicos subterráneos
 - e) Tipo y uso de suelo
 - f) Ubicación de las vías, construcciones, zonas públicas, distribución de cuadras, etc.
 - g) Otros (especifique):
3. **¿Qué aspectos son relevantes para elegir el trazado de una red de alcantarillado combinado?**
 - a) Topografía de la zona
 - b) Ubicación plantas de tratamiento y/o puntos de descarga
 - c) Ubicación de otros servicios públicos subterráneos
 - d) Tipo y uso de suelo
 - e) Ubicación de las vías, construcciones, zonas públicas, distribución de cuadras, etc.

- f) Drenaje natural de la cuenca
 - g) Otros (especifique):
4. **¿Existe alguna diferencia para la selección del trazado entre los tres tipos de red de alcantarillado?**
 5. **¿Cuál es el tipo de trazado más común que ha diseñado y por qué?**
 6. **Algunos autores dicen que se debe seguir el drenaje natural para definir el trazado de la red, ¿Qué opina de ésta afirmación?**
 7. **¿Qué opina de la selección del colector principal como la ruta de mayor pendiente?**
 8. **¿Cómo elige usted los puntos de entrega de la red? ¿Qué criterios usa?**
 9. **¿Cómo elige usted los puntos de arranque de la red? ¿Qué criterios usa?**
 10. **¿Existe alguna diferencia en cuanto al diseño hidráulico entre los tres tipos de red de alcantarillado (aparte de los caudales manejados)?**
 11. **Al diseñar redes de alcantarillado, ¿qué parámetros usa usted para obtener los costos de la red? De las anteriores cuales considera son las más relevantes**
 - a) Costos excavación y entibado
 - b) Costos tuberías
 - c) Costos cámaras y pozos de inspección
 - d) Otros (especifique):
 12. **¿Realiza usted algún proceso de optimización en el diseño hidráulico de una red de alcantarillado? Si, sí ¿Cuál y en qué consiste?**
 13. **¿Qué variables usa en el diseño para minimizar los costos totales de la red y por qué?**
 14. **¿Cuándo considera usted que tiene el diseño hidráulico adecuado de una red de alcantarillados?**
 15. **¿Realiza una evaluación de diferentes alternativas posibles para el trazado y diseño hidráulico de una red de drenaje?**
 - a) SI: ¿Cómo la realiza?
 - b) NO: ¿Por qué selecciona esa única alternativa?
 16. **Al momento de elegir un trazado, ¿tiene en cuenta usted el diseño hidráulico de la red en el momento de la elección? ¿O el proceso de diseño hidráulico lo hace de forma singular una vez se ha estipulado el trazado?**
 17. **¿Usa usted algún software para el diseño hidráulico o para el trazado de la red? ¿Cuál?**
 18. **¿Qué ecuación utiliza para el diseño de alcantarillados?**
 - a) MANNING.
 - b) DARCY-WEISBACH en conjunto con COLEBROOK-WHITE.

A continuación se presenta la síntesis de cada una de las entrevistas realizadas a distintos diseñadores y entidades gubernamentales que están a cargo de los sistemas de alcantarillado en Colombia, el resumen tratará de compilar todas las respuestas dadas por el ingeniero, Sin embargo habrán casos en los que algunas no serán aplicables debido al sitio de trabajo del profesional. La presentación de las entrevistas se realizará por ciudades, teniendo entre ellas a Bogotá, Cali y Medellín.

3.3 BOGOTÁ

ENTREVISTA 1

Nombre: Mauricio Rivera.

Lugar de trabajo actual: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Fecha: Abril de 2013.

Trayectoria o experiencia: Más de 30 años de experiencia en el campo.

El ingeniero Mauricio Rivera es el coordinador de área de Regulación, Planeación y Política Sectorial en el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial de la república de Colombia. Tiene más de 30 años de experiencia incluyendo trabajo en el exterior y es el encargado de revisar la mayoría de proyectos de alcantarillados de municipios que buscan financiación económica en Colombia.

En cuanto a la parte de trazado el ingeniero estableció que este se hace para la parte donde existan más subscriptores lo cual asegura que hay una mayor área de cobertura. Esto indicaría que hay que tener una distribución poblacional o densificación actualizada junto con la distribución urbanística para realizar el trazado; por lo tanto las anteriores serían las variables que tendrían mayor relevancia en este proceso. De igual manera, la topografía de la zona es muy relevante ya que la idea es hacer sistemas de alcantarillado que funcionen por gravedad y en lo posible no implementar sistemas de bombeo; luego para el alcantarillado pluvial se trata de mirar el drenaje natural de la cuenca e imitarlo en cuanto al espacio urbanístico lo permita. El ingeniero resalta que es de vital importancia conocer el sitio de descarga para el trazado ya que este define costos y la forma geométrica del trazado en planta. El trazado entonces será la ruta que conecte de forma más corta los puntos de arranque y el sitio de descarga; el principio que se tratar de seguir es “ir por la ruta que indique el terreno y claramente por la que me produzca menores costos de excavación”.

En cuanto a estipular alguna diferencia entre la elección de trazado para un red sanitaria, el encuestado dice que aplican los mismos conceptos de los que se habló antes, solo que de las opciones entra a contar más la densificación de la población para incluir a todos los suscriptores, y en sistemas pluviales podría entrar a contar más los espacios públicos ya que la mayor cantidad de agua lluvia es la que se acumula en estos espacios. Pero a grandes rasgos dice que no hay ninguna diferencia entre la elección de trazados de los tres tipos de alcantarillados (pluvial, residual y combinado) que sea trascendental.

Por ser funcionario del Ministerio de Vivienda, el ingeniero comenta que el trazado más común que ha diseñado es de alcantarillado sanitario y el esquema que con mayor frecuencia ha usado, es el trazado radial. Comenta que el ministerio subsidia solo proyectos de alcantarillado sanitario ya que es la primera prioridad por efectos de salubridad; el alcantarillado pluvial por lo general va financiado con recursos propios del municipio y en muchos casos es omitido debido a falta de presupuesto. En cuanto a la afirmación de que se debe seguir en drenaje natural para realizar el

trazado, el Dr. Rivera está de acuerdo y afirma que es lo que se hace porque da un criterio de economía superior a otros trazados; nuevamente recalca en que se siga la pendiente natural del terreno para la mayoría de los casos: “si yo tengo esa pendiente, no tengo que irme por otra, es la ruta lógica del agua. Siempre y cuando esa pendiente me permita un diseño hidráulico adecuado no se debería cambiar”

Para el diseño de los colectores principales, la elección de estos se hace por densidad y se empieza a trazar desde un punto muy densificado hacia uno menos poblado. En municipios y ciudades no muy grandes, estos sitios coinciden con lo que llaman el centro de la ciudad y claramente con vías arteriales o principales. Esta elección se da debido a que se tiene el criterio de drenar el agua lo más rápido que se pueda fuera del casco urbano. Normalmente se trazan los colectores principales y en el proceso de revisión y viabilidad de la propuesta se puede alterar su posición; sin embargo esto no es lo común. El criterio del diseñador dice la posición y no hay muchas posibilidades de ubicación para estos colectores principales, por lo tanto la primera opción es la que en varios casos predomina. Si se habla del trazado secundario, este por lo general no varía mucho si se cambia de localización del colectores principales por lo tanto este trazado es casi constante y depende enteramente de la urbanización que se tenga en el sitio del proyecto.

Los puntos de descarga son de suma importancia según el Dr. Rivera debido a que estos definen muchas veces la longitud del proyecto (elección de la ruta más corta) y por ende los costos de la red. En el caso de alcantarillados sanitarios se debe elegir dos sitios de tratamiento uno para las aguas (PTAR) y el otro para el tratamiento de lodos. La mayoría de veces para proyectos nuevos el diseñador no tiene la libertad de escogencia del sitio de descarga; estos sitios ya están destinados por el municipio debido a que ya existe un lote de propiedad de la alcaldía y no se va a gastar más dinero en la compra de un lote nuevo. A pesar de esto, este sitio si debe tener ciertos criterios como que debe estar cerca a la fuente final de disposición de las aguas, y además debe estar ubicado una distancia mínima de 500 m fuera del casco urbano para evitar problemas por olores. Las corporaciones autónomas regionales de cada sitio estipularan cuáles son las fuentes receptoras a las cuales se permitirá el vertimiento, y es a estos sitios donde hay que obligatoriamente llegar. Por otro lado, los puntos de arranque se elegirán como aquellos sitios donde la topografía indique que son los más altos en la ciudad y que claramente tengan suficientes subscriptores.

Para la parte del diseño hidráulico, todo permanece igual en cualesquiera que sea el tipo de alcantarillado. El diseño se hace usando las mismas pautas y lo único que cambia serían los caudales manejados los cuales se calculan según las estipulaciones del RAS. Según el Ingeniero Rivera los costos de un sistema de alcantarillado están regidos por la cantidad de excavación que sea necesaria en el proyecto; costos como cámaras, pozos u otros se hacen casi insignificantes frente los anteriores. Los costos de la tubería están ligados a la geotecnia del lugar y por lo tanto no es un costo que puedan controlar mucho; sin embargo se le preguntó al ingeniero acerca de cuál es el material que más usan y este respondió que este corresponde al concreto ya que



muchas veces este material se puede moldear directamente en campo mientras que el PVC en algunos casos resulta más caro por costos de transporte e instalación en campo ya que algunas veces necesita de unas condiciones especiales de cimentación, por lo tanto la elección del material todavía no sigue un criterio de rugosidad. El Dr. Rivera hizo énfasis de que en Colombia el periodo de diseño de estas estructuras es de 50 años y en ciudades de gran importancia es del doble, lo cual hace que las estructuras sean más robustas condicionando a que no se pueda economizar mucho en esta parte de proceso. Sin embargo se puede bajar un poco costos disminuyendo la cantidad de estructuras hidráulicas como aliviós, cámaras de inspección, caída, etc. o en los materiales usados para estas. El único criterio de optimización que se usa es el de disminuir la excavación tratando de enterrar lo menos posible el sistema, y esto se hace poniendo tuberías paralelas a la pendiente del terreno conservando la profundidad mínima, por lo tanto la variable que minimizaría sería la pendiente.

El ingeniero hace ciertas observaciones acerca del RAS y de restricciones como la del diámetro mínimo y dice que esto es cuestionable ya que depende de la naturaleza del proyecto. Puede haber casos en los que con un diámetro menor se pueda atender a la población y no hay necesidad de “enterrar el dinero porque sí” haciendo una crítica también a la restricción del uso de diámetros menores aguas abajo ya que nuevamente esto es un medida anti económica que no se basa en criterios hidráulicos. En cuanto a la restricción a la que más ponen cuidado es la velocidad mínima, ya que con ella cubren la mayoría de problemas en un sistema de alcantarillado al igual que la velocidad máxima. Una vez toda la red cumpla con todas estas características, se hacen verificaciones de cálculo para posibles escenarios que se den en la red. Esto lo hacen con programas como EPASWMM, StormCAD y otros.

En cuanto a la evaluación de distintas alternativas en los proyectos, como el ministerio se encarga de revisar proyectos y no específicamente de diseñarlos, a ellos solo les llega una única alternativa. Sin embargo, antes de que el proyecto llegue a ellos pasa por una interventoría y el diseñador original debe justificar por qué esta es la mejor opción; por lo tanto habrá tenido que evaluar otras posibilidades. Si el ministerio cree con su grupo de asesores que existe una mejor opción, lo harán saber al diseñador y este deberá realizar los cambios pertinentes. En cuanto al diseño hidráulico solo se presenta el del trazado elegido; sin embargo a los trazados descartados nunca se les hace el diseño hidráulico ya que esto sería dispendioso. Estos se descartan principalmente bajo criterios de longitud. Por lo tanto, trazado como diseño se realizan en fases distintas del proyecto y nunca simultáneamente. El ingeniero Mauricio Rivera desarrolló en conjunto con el ingeniero Rafael Paredes un programa llamado SEDAL PLUS con el cual hacen trazado y diseño hidráulico; por lo tanto lo recomiendan para su estudio en el ámbito académico. Este programa realiza cálculos de diseño con la ecuación de Darcy-Weisbach, en pero, recalca que el 100% de los diseños que llegan al ministerio están basados en hojas de cálculo que usan la ecuación de Manning. Este dice que aquella ecuación presenta una mayor facilidad en su uso, y que los diseños antiguos se han hecho con Manning y siguen en funcionamiento por lo tanto no ve la necesidad de cambiar de una ecuación a otra siendo que esa ha servido siempre.



ENTREVISTA 2

Nombre: Jorge Holguín.

Lugar de trabajo actual: EAAB. Dirección Red Troncal.

Fecha: Abril de 2013.

El Ing. Holguín con más de 15 años de experiencia en el sector de alcantarillado, manifestó que en general no existe ninguna metodología generalizada para el trazado de redes de alcantarillado, sino que el diseño se basa en la topografía y la ubicación del cuerpo receptor y de la PTAR, ya que con base a estos parámetros se definen las características de la red.

Adicionalmente el Ingeniero expresó que el acueducto de Bogotá no se encarga de diseño de redes locales si no de los grandes interceptores y canales de la ciudad, en general de tuberías de dimensiones de más 1 m de diámetro. Por lo general el diseño que se sigue para grandes interceptores son diseños siempre en paralelo a los cuerpos de aguas ya existentes como canales artificiales, quebradas o ríos. Este tipo de diseños se logra debido a que la topografía en estas zonas donde se localizan grandes interceptores es por lo general plana.

En cuanto a la selección del corredor, este está claramente definido, y concuerda para todos los casos de alcantarillado que se tenga con la vía de espacio público más cercana al interceptor que permita recoger lo más abajo posible las descargas. Según el ingeniero el tema de trazado no es algo muy importante y tiene poco que ver con la ingeniería ya que el trazado de cualquiera de los 3 alcantarillados lo da el proyecto urbanístico que se tenga y la configuración de cuerdas que tenga la ciudad. Por lo tanto si se quisiera hablar de trazados los criterios que el propondría serían principalmente el urbanismo y sobre todo la disponibilidad de espacio público (predios), las zonas de manejo y de preservación de los ríos ya que son por estos sitios donde no se podrá pasar y esto de cierto manera si limitaría el trazado de cualquiera de las redes.

Para sistemas de aguas lluvias se maneja el criterio de menor distancia posible y el trazado que menos se entierre teniendo en cuenta claro las cotas de entrega tanto para alcantarillados de aguas lluvia como de aguas residuales. Aunque el acueducto no diseña las redes secundarias de la ciudad, ellos si establecen el punto de conexión a la red matriz por lo tanto en Bogotá no hay mucha libertad para diseñadores secundarios ya que a estos se les establece claramente el punto de empalme con la red. La única exigencia que se les hace es que comprueben que al ducto al que van a conectarse tiene suficiente capacidad hidráulica para soportar la nueva descarga. De no ser así el acueducto debe buscar un nuevo punto de empalme o ampliar la capacidad de la tubería lo cual en la mayoría de los casos corre por cuenta del dinero del ingeniero proveedor. Para el acueducto tuberías menores a 34 pulgadas no hacen parte de la red matriz y por lo tanto se les consideran como tramos locales. Para el caso específico de Bogotá, la red pluvial y sanitaria tienen rutas específicas y esta configuración debe ser seguida por todos los diseñadores independientes. Esta configuración es que para redes sanitarias los colectores deben ser situados de oriente a

occidente (comúnmente son tramos largos) y para alcantarillado pluvial estos deben ser conductos largos que atraviesan toda la ciudad (Norte a Sur) y conductos cortos para la descarga directa. Todo proyecto que pase ante el acueducto debe presentar al menos 3 opciones de viabilidad del trazado para hacer la debida elección con criterios de economía.

En cuanto a los puntos de arranque en empresas tan grandes como esta, se les debería llamar sitios de empalme como ya se dijo anteriormente. Pero en sitios donde se quiere hacer rehabilitaciones del cuerpo hídrico como lo es el caso del río Bogotá, se deben eliminar todos los vertimientos directos y por lo tanto estos también serían puntos de arranque de la nueva red. Toda la red debe llegar a la parte más baja donde se sitúa la PTAR o la estación de elevación lo más alto posible para reducir los costos de bombeo en caso de ser necesario. Para todo el trazado se trabaja con pendiente mínimas y teniendo en cuenta la calidad de suelo que tiene la capital del país, la geotecnia tiene un papel igual de relevante a la topografía ya que esta definirá el tipo de estructura y cimentación que se va a usar. Así mismo esto es de suma importancia para la elección de los puntos de descarga, los cuales los determina esta entidad en conjunto con la corporación autónoma regional de Cundinamarca (CAR) teniendo en cuenta la naturaleza geológica del sitio y las características hidráulicas e hidrológicas del cuerpo receptor.

El acueducto hoy en día exige un criterio de sostenibilidad ambiental y por lo tanto para el caso de Bogotá específicamente se está teniendo en cuenta esto al diseñar el nuevo Plan Maestro de Alcantarillado. Lo anterior significa que los sistemas de drenaje urbano deben funcionar integralmente y se debe trabajar para reducir al mínimo las sobrecargas, inundaciones, así mismo se debe rehabilitar todo el sistema existente integralmente y no arreglar estructuras separadamente lo cual puede llevar de nueva a sobredimensionamientos innecesarios. De igual manera tanto estaciones elevadoras, como canales y compuertas deben estar sincronizados y debe haber un control en tiempo real que permita manejar adecuadamente la red. Sin embargo se está trabajando de a poco debido a que ciudades como Bogotá no tuvieron planeación alguna y se podría decir que todo el sistema de alcantarillado es una “colcha de retazos”.

El Dr. Holguín manifestó que en cuanto a los costos de un red, en una ciudad como Bogotá lo que más importa son los costos de excavaciones debido a que la pendiente del terreno no da mucho con lo cual se pueda trabajar. Por lo tanto debido a que el acueducto trabajo sólo con la red matriz, se está tratando de imponer la tecnología sin zanja²⁴ ya que esto disminuye en cierta medida los costos, adicionalmente por los caudales manejados se trabaja con concreto ya que los costos constructivos de este material han disminuido mucho. Para esta identidad el impacto urbano es lo que define si un red se construye o no y por lo tanto la parte de destrucción y rehabilitación vial es la que más se debe tener en cuenta ya que todos estos costos los debe

²⁴ La tecnología sin zanja es un conjunto de métodos, materiales y equipos usados para rehabilitar tubería existente o instalar nueva tubería subterránea con el mínimo de problemas y destrucción típicamente asociados con métodos convencionales. Tomado de: <http://www.sedapal.com.pe/tecnologia-sin-zanja>.
Mayo 22 de 2013



asumir la empresa. Así que, como criterio de optimización, esta sería la variable que más se trata de minimizar en cualquier diseño aceptado por el acueducto de Bogotá; ellos piden en el presupuesto de obra un ítem específico que sea la rehabilitación de la estructura de pavimento por cada sitio donde pase la red. Para alcantarillado combinado los costos que empiezan a tener un alto valor son la construcción de estructuras de separación como aliviós; por lo tanto deberían tenerse en cuenta en la determinación de costos totales. El Ing. Holguín dice que la forma de disminuir costos es en longitud y en la construcción de estructuras grandes; por lo tanto a veces es reglamentación del acueducto decirle a sus proveedores que diseñen con el número mínimo de pozos y cámaras de inspección, esto con el fin de no construir más de lo estipulado por la ley. Para sistemas de agua lluvia y residuales, la EAAB tiene la política de disminuir los costos por medio de una estimación de los caudales bien hecha y no siguiendo necesariamente los procedimientos dados por el RAS. La EAAB hace una campaña de medición de caudales con el agua potable suministrada y adicionalmente con medición en invierno y verano de caudales reales para no sobredimensionar el diámetros, lo cual es bastante útil ya que la estimación de caudales por lo métodos tradicionales hace que exista una variación muy grande entre los caudales reales y los calculados. En las mediciones reales que hace el acueducto se trata de hacer una mayoración en los caudales debido al problema de conexiones erradas el cual es casi imposible de cuantificar.

Con la nueva tendencia que tendrá el Plan Maestro de Alcantarillado en Bogotá, se quiere entregar el corredor (Trazado) al diseñador; por lo tanto el diseño del sistema solo va a estar enfocado al diseño hidráulico y estructural de la red. Finalmente en cuanto a las ecuaciones de diseño usadas en la parte hidráulica se usa la ecuación de Manning ya que es la que tradicionalmente se ha usado. La EAAB usa programas de simulación como EPASWMM y SEWERGEMS. Para realizar el trazado en planta hacen uso de AutoCAD, peor no hay ningún software que haga esto automáticamente.

ENTREVISTA 3

Nombre: Manuel Ricardo Ruiz Romero

Lugar de trabajo actual: Independiente.

Fecha: Abril de 2013.

El ingeniero Ricardo Ruiz tiene 33 años de experiencia en el diseño de redes de alcantarillado. Trabajo con IHT, con varias compañías enfocadas en diseños de sistemas de alcantarillado y fue Decano de la Universidad Gran Colombia. Desde la experiencia de este diseñador, este nos comenta que tanto para una red de alcantarillado pluvial, sanitaria o combinada, cuando se va a realizar el trazado, todos los aspectos mencionados en la encuesta son importantes. Sin embargo el agregaría a estos los aspectos geológicos y geotécnicos del sitio ya que muchas veces esto termina cambiando el diseño original que se tenía incurriendo en mayores gastos. Por lo tanto es de suma importancia verificarlos desde las etapas iniciales de cualquier proyecto. Asimismo aspectos constructivos, la inspección a la zona de los trabajos y la experiencia del consultor en la solución de problemas es de vital importancia en la selección de cualquier trazado ya que muchas veces realizar estas visitas y hacer anotaciones de campo ayudar a ver si cierto corredor vial es apto por espacio para por ejemplo la instalación de un sistema de alcantarillado separado.

En cuanto a la diferenciación de la selección de trazado entre los tres tipos de red de alcantarillado, el Ing. Ruiz estipula que el trazado de las redes pluviales o combinadas normalmente van buscando la pendiente y los drenajes naturales del terreno y en los sistemas sanitarios no necesariamente se cumple lo anterior. El trazado de sistemas sanitarios da un poco más de libertad en cuanto a las pendientes que se manejan pero en sitios de topografía plana se trata de ajustarse a las pendientes del terreno o a valores mayores que cumplan las restricciones hidráulicas. Debido a que el es diseñador de redes secundarias, el ingeniero dice que los sistemas teóricos recomiendan sistemas en peine, en bayoneta y por el drenaje natural pero en realidad los sistemas se acomodan a la topografía de las ciudades salvando los inconvenientes geotécnicos y geológicos que pueden variar las condiciones generales del trazado; por lo tanto el tiene en cuenta estas recomendaciones pero no hay una forma de trazado general que se repita constantemente.

De la afirmación de seguir el drenaje natural para definir el trazado de la red, el Dr. Ruiz piensa que tal vez es la manera más acertada porque en su experiencia esto tiende a disminuir los costos de construcción. Sin embargo no se puede aplicar al 100% de los casos. En el caso de la selección del colector principal como la ruta de mayor pendiente el ingeniero discrepa y muchas veces no lo usa debido a que este concepto tiene inconvenientes por la velocidad con la cual se transporta el agua y con problemas de erosión y abrasión que pueden presentarse en las tuberías.

Para el diseño hidráulico del sistema existe una diferencia entre el tipo de red que se tenga en cuanto al funcionamiento hidráulico. En los sistemas sanitarios el caudal es gradualmente variado mientras que en los sistemas pluviales el caudal es variable pero puede manejarse tramo a tramo

con caudales. En cuanto a los costos de la red, todos los mencionados en la encuesta son relevantes y deben ser lo más reales posibles, se deben obtener cotizaciones de los materiales y efectuar los diferentes análisis de precios unitarios con la ayuda o comparación con los costos estándar que manejan las divisiones de contratación de las entidades que prestan los servicios en cuanto a los presupuestos. Si no hay datos actuales llevarlos a valor presente o proyectarlos a las fechas de ejecución de las obras. Para disminuir costos debido a que el área de diseño es en redes secundarias, se trata de utilizar al máximo las redes existentes, de buscar las menores excavaciones posibles así como el uso de materiales que garanticen durabilidad y un costo que hagan posible hacer las obras; en sistemas secundarios y urbanizaciones nuevas se está tratando de emplear PVC. Principalmente las variables para minimizar costos son las siguientes:

- **costos de materiales.**
- **costo de instalación** (excavación, base, instalación y relleno).
- **costos de operación y mantenimiento.**

Como diseñador independiente, el Ingeniero Ruiz hace una evaluación de diferentes alternativas posibles para el trazado, analizando varias opciones en la parte técnica y económica para ver la conveniencia o inconveniencia de cada una de ellas. En el caso se selecciona una sola alternativa, esta tiene que ser bastante obvia y en términos generales debe presentar una conveniencia aceptable en términos económicos.

Los puntos de entrega se seleccionan de acuerdo con aspectos técnicos, de ubicación, geológicos, geotécnicos, de disponibilidad de compra de los predios y en todo caso que permitan la evacuación correcta de las aguas transportadas. Por otro lado los puntos de arranque normalmente son los puntos más altos del sistema que permitan la localización y construcción de las diferentes redes.

Finalmente el Dr. Ruiz afirma que debido a que los caudales de diseño son aproximados y nunca van a ser exactos, no hay razón para tener un cálculo exacto del funcionamiento de la red con fórmulas más exactas como el caso de la ecuación de Darcy-Weisbach; por lo tanto el usa en sus diseños la ecuación de Manning la cual no presenta ninguna compilación en la hora de emplearla.



ENTREVISTA 4

Nombre: Gustavo González.

Lugar de trabajo actual: CONTELAC

Fecha: Abril de 2013.

El Ingeniero Gustavo González tiene más de 40 años de experiencia en diseño de sistemas de alcantarillado. Él dice que el trazado va ligado directamente con la topografía que se tenga y con la distribución espacial de la población. Sin embargo para la empresa CONTELAC, que es donde él se desempeña, el trazado es un segundo plano ya que el ingeniero ve el problema de alcantarillado como un problema de elevación y no como un problema planimétrico. Cuando se está eligiendo el trazado, la decisión es bastante clara para el ingeniero en cuanto a que se debe seguir el drenaje natural del sitio ya que esto da la mejor solución, inclusive para los sistemas que transportan agua residual. Esto implica a su vez que se debe seguir la pendiente del terreno ya que brindará los menores costos de excavación. El Ing. González indica que aunque los anteriores son criterios generales para disminuir costos, la función de costos general depende enteramente del lugar donde se esté realizando el proyecto y por lo tanto variará de lugar a lugar, por lo que recomienda que no se tenga una función general ya que esta no describirá adecuadamente los costos reales de cada proyecto.

El Ingeniero cuestiona e indica que la mayoría de problemas que se presentan en las redes de alcantarillado son debido a que se tienen en cuenta periodos de retorno muy pequeños para el diseño del sistema, por lo cual constantemente ocurren inundaciones lo cual no es culpa de los diseñadores sino de la normativa que está rigiendo. Con esto introduce a la idea de que el diseño hidráulico no debe cumplir al pie de la letra la normativa estipulada por el RAS si no que esta debe ser una guía con la cual se logre el funcionamiento adecuado de la red. En cuanto a la parte de costos el ingeniero concuerda con los ítems propuestos por la encuesta pero agrega que el más importante de ellos y el cual no se ha tenido en cuenta es el impacto ambiental y hacia la población. Este impacto tiene que ver con la destrucción de calles para la incorporación de tubería lo cual afecta gravemente la zona durante el periodo constructivo. Por lo tanto el ingeniero establece que es importante que el país se actualice frente a metodologías constructivas que pueden disminuir este impacto como lo es la tecnología sin zanja. Para los puntos de entrega, dice que no hay criterios de elección ya que desde hace rato eso dejó de ser una elección del ingeniero y pasó a ser un sitio estipulado por los planes de ordenamiento territorial o por lotes previamente comprados y destinados para este uso.

El Dr. González puntualiza que todos los cálculos los realiza con hojas de cálculo de Excel y con herramientas de ayuda como AutoCAD, pero cree firmemente que un software computacional no le da la solución ingenieril adecuada y por lo tanto el criterio de diseñador y experiencia tiene un peso muy importante para la concepción de cualquier proyecto que el haga. La ecuación de diseño que usa es la de Manning ya que normalmente estos sistemas tienden a estar sobrediseñados y el usar esta ecuación no representaría otro aumento significativo que aumente los costos.



ENTREVISTA 5

Nombre: José Guillermo Mancilla

Lugar de trabajo actual: HMM ingenieros.

Fecha: Abril de 2013.

El ingeniero José Mancilla tiene 15 años de experiencia y establece que el criterio principal para la elección del trazado de cualquier tipo de red es tener la longitud más corta que conecte los puntos de arranque con los sitios de vertimiento final de las aguas. Para este profesional, el factor geotécnico es el que más pesa en conjunto con la topografía de la zona, ya que eso aparte de definir el corredor (Longitud y geometría) incidirá en el diseño hidráulico debido a que establecerá el tipo de material que se debe usar para los colectores y estructuras hidráulicas.

En cuanto a diferenciar los tres tipos de alcantarillado según el trazado, no hay ninguna diferencia aparte de la ubicación espacial que se le debe dar en las vías y en los espacios públicos. En ciudades como Bogotá el criterio es seguir la pendiente del terreno y conseguir las mínimas distancias; sin embargo eso es por la disposición de topografía plana que tiene la ciudad. El ingeniero sugiere ver los criterios en otras ciudades para ver si estos difieren y así, si se va a realizar un software empezar a regionalizarlo por distintas clases de topografía (Plana, empinada, escarpada, etc.). Para la elección de puntos de descarga, normalmente esto está estipulado y es un requisito de cumplimiento en la licitación. Los puntos de arranque serán aquellos con mayor altura topográfica.

Para la parte de costos el Ing. Mancilla establece que lo que más pesa son los costos de instalación y cimentación. Esto anterior incluye claramente los costos de excavación. Para el análisis de costos para el valor de las tuberías, se hace un análisis de precios unitarios teniendo en cuenta distintos tipos de material. En la mayoría de los casos se suele trabajar con concreto debido a que el material que es removido en la excavación, también sirve para el relleno. Lo cual no siempre pasa cuando se trabaja con PVC, ya que para los rellenos se necesitan material de préstamo lo cual sube inmediatamente los costos debido al transporte de estos materiales en obra. El ingeniero recalca entonces que uno de los costos importantes en la parte de instalación sería la de transporte y en consecuencia nunca hay que dejarla por fuera de los cálculos; esto nuevamente varía dependiendo del sitio donde se esté haciendo el proyecto. De igual manera las cámaras de inspección son un ítem importante y representan aproximadamente un 20% del costo total así que es importante saber que no se estén usando cámaras adicionales cuando no es necesario. HMM ingenieros también realiza una cuantificación del daño y la reparación a la malla vial que se debe hacer cuando se decide hacer un sistema de alcantarillado; este factor es de suma importancia ya que puede cambiar el trazado inicial que se tenía con el fin de disminuir costos.

Por último el ingeniero dice que usa para sus diseños la ecuación de Darcy-Weisbach y que utiliza programas como StormCAD, SEWERGEMS y EPASWMM para verificar el adecuado funcionamiento de la red una vez diseñada.



ENTREVISTA 6

Nombre: Carlos Giraldo

Lugar de trabajo actual: Aguas azul

Fecha: Abril de 2013.

Carlos Giraldo es un Ingeniero con más de 15 años de experiencia en el sector de alcantarillado, trabaja con la empresa Aguas Azul y es docente de cátedra de la Universidad de los Andes en el Departamento de Ingeniería Ambiental. El Ing. Giraldo dice que los sistemas de drenaje urbano se deben diseñar por gravedad y tratando de minimizar las estaciones de bombeo. Este tiene el criterio de que el colector principal o interceptor en algunos casos debe ser puesto por el punto más bajo del terreno lo cual estaría en contraposición de la afirmación de que los colectores principales deberían estar en la ruta de mayor pendiente.

La idea de tener múltiples opciones para el trazado se le hace poco realista debido a que dada la urbanización y las características de las ciudades las opciones para realizar el trazado son realmente escasas. Este focaliza en que el trazado elegido es aquel que sea más corto e igualmente que trate de minimizar profundidades teniendo en cuenta la cota del punto de llegada ya que se busca que el punto final total del sistema esté lo menos enterrado posible. En consecuencia para lograr este objetivo, siempre se diseña con la pendiente mínima y siguiendo la pendiente natural del terreno, la cual producirá la velocidad mínima de auto limpieza. El ingeniero dice que la geotecnia no es importante para el trazado pero sí para la parte constructiva, lo cual se soluciona realizando mejores cimentaciones. En cuanto a los puntos de arranque dice que estos establecen la diferencia principal entre sistemas separados, ya que los puntos de arranque para alcantarillado pluvial serán los más altos en la ciudad y los de aguas residuales dependerán de donde comienzan las conexiones domiciliarias en el área urbana. Cuando se trata de sistemas pluviales, el Dr. Giraldo dice que el diseño debería tratar de hacerse con todo el caudal fluyendo por escorrentía natural. Dice que el criterio para empezar a transportar las aguas por tuberías debería ser cuando se alcance una profundidad de 10 cm en la superficie. En estos sitios se debería colocar los sumideros y así empezar el transporte subterráneo de las aguas.

Para la parte de costos, lo más relevante son los costos debido a la parte constructiva y no a los insumos para el diseño hidráulico de la red (tuberías, cámaras, etc). Manejar el criterio de lo más “corto” reduce ambos costos, así que por esta razón es el criterio general. El ingeniero indica que los costos de impacto ambiental vendrían siendo una constante que no depende de la excavación que se realiza. Este dice que la reparación de la malla vial será la misma si se excava 3 metros o 10; sin embargo si hay que tenerla en cuenta pero no cambiará el trazado por efectos de costos. Finalmente el Ing. Giraldo realiza como mínimo 2 evaluaciones de las opciones disponibles para el trazado y usa la ecuación de Manning debido que hay mucha incertidumbre en el proceso para complicarse con una ecuación más larga. El ingeniero usa la hoja de cálculo de PAVCO desarrollada por la ingeniera Inés Wills y se usan EPASWMM y SEWERGEMS para la simulación del funcionamiento de la red usando flujo gradualmente variado y otras condiciones.



ENTREVISTA 7

Nombre: Santiago Villanueva

Lugar de trabajo actual: IHT S.A.S

Fecha: Abril de 2013.

El ingeniero Santiago Villanueva, gerente de la empresa IHT, con más de 15 años de experiencia en el área, manifestó que los factores principales que hay que tener en cuenta para el trazado son: la localización de predios (más que todo los públicos), tener claro cuáles serán los puntos de empalme con otras redes o los puntos de descarga y finalmente una topografía detallada con un levantamiento adecuado de detalles importantes como cámaras existentes, etc. Si es posible también se debería saber la ubicación de otras redes de servicio público para saber si hay espacio suficiente en el corredor para pasar las tuberías por este sitio o es mejor realizar una evaluación de otra ruta. Teniendo esto en mente el trazado se realiza empezando por la ruta principal la cual es la espina dorsal del proyecto; esta se traza teniendo en cuenta el drenaje natural del sector y siguiendo la pendiente del terreno ya que esto brindará los mejores resultados económicamente hablando. Sin embargo el trazado es un criterio del diseñador y se basa en la experiencia y condiciones generales del proyecto. Por razones constructivas el ingeniero dice que es mejor tener rutas menos profundas con diámetros mayores debido a que si se hace lo contrario los costos de entibados subirán alarmantemente. Debido a la suposición anterior, los costos de la tubería serán los que rijan en los proyectos que usen la anterior metodología.

Para disminuir costos lo que se hace también es disminuir los puntos de arranque en la red, esto se disminuye con ciertas configuraciones de trazado, pero debido a que esto cambia de sitio a sitio no existe una manera adecuada de describir este proceso. El ingeniero Villanueva dice que no hay entonces una diferencial vital en cuanto a la configuración de trazado para los tres tipos de alcantarillado y que quiere resaltar en que no siempre el colector principal es aquel de mayor pendiente; esto solo se cumple para casos muy específicos. El diseño hidráulico es básicamente el mismo ya que la hidráulica es la misma independiente de la cantidad de caudal que se maneje. Lo que cambia es la forma de simular el funcionamiento de las redes ya que ambas tendrán régimen de flujo distinto dependiendo de su naturaleza, lo cual se hace usando los programas EPASWMM y SEWERGEMS

Puntualiza, con que la ecuación de diseño que usa es la de Manning, pero no tiene ninguna razón particular de preferencia solo a que es la que siempre se ha usado y es de fácil manejo. El es experto en tecnologías sin zanja y recalca que muchas veces esta es la mejor solución para disminuir costos en una red y que no se debe descartar esta opción si no buscar nuevos métodos constructivos.

ENTREVISTA 8

Nombre: Miguel Ángel Castro.

Lugar de trabajo actual: Asesor del programa de aguas del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Fecha: Abril de 2013.

En Dr. Castro, respondió a la encuesta de la siguiente manera:

Para **alcantarillado sanitario** es de suma importancia la ubicación de la PTAR; esta se debe ubicar de tal forma que el agua llegue lo más rápido posible a esta y todo el diseño se debe realizar con base al criterio de la evacuación rápida de las aguas hacia las afueras del casco urbano. En un sistema sanitario básicamente se debe replicar por todas las calles que hacen parte del dominio público con las tuberías, y este será el trazado básico de la red. A toda costa se debe evitar las contrapendientes por lo tanto un levantamiento topográfico de calidad es vital para el buen desarrollo del proyecto. Por otro lado para **alcantarillado pluvial** se debe tener en cuenta que en los primeros 100 metros no hay necesidad de tuberías ya que se puede manejar el agua por escorrentía natural, luego de esto si se tendrían los puntos de arranque en la red. Para sistemas combinados se tiene que es la mezcla de ambos criterios.

El ingeniero Castro indica que la red deberá tener la mínima longitud posible y que los colectores secundarios se deben diseñar para que hidráulicamente trabajen a su máxima capacidad. Establece que para la parte de costos se debe tener en cuenta los pozos de inspección debido a que estos incrementan los costos del diseño como tal. En la parte constructiva siempre se deberá minimizar en los costos de excavación y también se deberá tratar de minimizar el número de tramos iniciales, pues esto facilita la comparación entre las posibles alternativas mirando los costos globales del proyecto. El Dr. Castro coincide con los costos puestos en la encuesta.

En cuanto a la evaluación de alternativas, normalmente no hay muchas, así que con dos posibles soluciones al problema es suficiente para la elección de un diseño sobre otro. El ingeniero no conoce ningún programa que ayude a elegir el trazado y todos los cálculos que revisa están basados en hojas de cálculo cuya ecuación base es la de Manning. El diseño hidráulico se hace sobre el trazado elegido y tiene poco que ver en el momento de elección de una ruta específica en el trazado de la red.

Finalmente el ingeniero puntualiza en que para el trazado es de gran importancia no usar la información geográfica del IGAC si no contratar un levantamiento topográfico especial para la zona con un requisito mínimo de 10 m entre las curvas de nivel entregadas al diseñador.

ENTREVISTA 9

Nombre: Gustavo Navia

Lugar de trabajo actual: INGETEC

Fecha: Abril de 2013.

El Ingeniero Gustavo tiene más de 20 años de experiencia en el área. Con base a esto respondió inicialmente que los fundamentos de elección de un trazado no dependen para nada del tipo de aguas que este esté transportando; por lo tanto no hace una discriminación entre trazados para los distintos tipos de alcantarillado.

El trazado depende de varios factores y por lo general la importancia de ellos cambia con cada proyecto nuevo que se tenga. Sin embargo, existen factores definitivos como la topografía y el urbanismo los cuales indican la ruta por la cual debería ir el agua. Se debe tener previo a la construcción, la ubicación de otros servicios públicos como gas y agua potable. De igual modo se debe tratar de que en sistemas combinados y pluviales se tengan longitudes de tramo cortas y que lleguen lo más pronto posible al interceptor.

Para la parte de costos se debe evaluar el tipo del suelo para ver la viabilidad de ciertos materiales y de ciertos métodos de cimentación. De igual manera se debe ver la edad de las calles por donde se construirá la red para evaluar posibles impactos ambientales y sociales los cuales son determinantes en los costos totales de la red ya que la mayoría de las veces estos impactos ambientales son los que hacen que ciertos proyectos sobrepasen el presupuesto estipulado. Por lo tanto aunque se pensaría que tecnologías sin zanja aumentarían los costos de la red, a veces son preferibles para reducir los costos de afectación de los usuarios. Las excavaciones abarcan un gran porcentaje de los costos del proyecto; sin embargo, en algunos casos, es necesario evaluar que es más económico, si el aumento de los diámetros o el aumento en la profundidad de excavación. El ingeniero dice que los materiales con los que se construyen las cámaras de inspección son muy costosos (mampostería) y por lo tanto se podría pensar en sustituirlos por los nuevos materiales plásticos que están saliendo al mercado. Finalmente el Dr. Navia comenta la importancia de hacer revisión en campo antes de realizar el trazado ya que esto indicaría sitios por los cuales no se debería pasar y que probablemente no estén demarcados en los levantamientos topográficos.



ENTREVISTA 10

Nombre: Lucas Olivella

Lugar de trabajo actual: EAAB

Fecha: Abril de 2013.

El ingeniero Lucas Olivella, lleva más de 10 años trabajando para la EAAB e indicó que el trazado está limitado a la ubicación de las vías y al espacio que se tenga disponible ya que hay mucho espacio subterráneo en el cual ya hay redes de otros servicios públicos. En ciudades grandes y con expansión hacia la periferia como lo es Bogotá, el sentido del flujo en gravedad no siempre se cumple y muchas veces se ha tenido que trabajar en contrapendiente teniendo que usar sistemas de bombeo.

Dice que en ciudades planas tener varios puntos de inicio suele ser apropiado, pero esto no siempre garantiza que se disminuyan los costos de excavación. Debido a que se está trabajando con el sector público, los factores que muchas veces limitan el trazado no son técnicos, si no que son puramente políticos o burócraticos por lo cual no hay mucho que se pueda hacer. Debido a lo anterior una vez dibujado un trazado viable, es difícil hacerle cambios a este para ver alternativas en costos. Por lo general lo que se hace es realizar una evaluación usando distintos métodos constructivos y usando distintos materiales para la construcción de la red como tal.

El Dr. Olivella indica que muchas veces la norma del RAS entra en conflicto con la de la EAAB debido a que las norma de la EAAB no tiene en cuenta especificaciones para áreas tributarias muy grandes, lo cual actualmente está en revisión y prontamente entrara otra normativa en vigencia que solucione este problema. De igual manera el ingeniero comenta que toda excavación mayor a 1.5 m debe llevar entibado y que esto encarece las obras sin embargo es algo necesario. Adicionalmente indica que se debería revisar la norma de los 120 m como distancia mínima entre cámaras, ya que con los nuevos materiales disponibles para estas, esta distancia podría aumentar llevando a menores costos. En general lo que se busca optimizar entonces son los costos de excavación.

El ingeniero dice que el trazado es básicamente igual para los tres tipos de sistemas salvo restricciones pequeñas de ubicación que establece la norma. Debido a que el está más involucrado con los sistemas troncales y con el debido empalme de redes secundarias a la red matriz, los cálculos que hace son más de funcionamiento de la red los cuales los hace con programas como EPASWMM. La ecuación que siempre usó para diseño fue la de Manning.

3.4 CALI

ENTREVISTA 11

Nombre: Carlos Arango

Lugar de trabajo actual: Hidrooccidente

Fecha: Mayo de 2013

El ingeniero Carlos Arango, gerente de la empresa Hidrooccidente, con más de 10 años de experiencia en el área, manifestó que los factores principales que hay que tener en cuenta para el trazado son:

Primero que todo se debe tener en cuenta el futuro del área de estudio para no limitar al trazado que se vaya a hacer solo a los suscriptores que se encuentren actualmente en el área. Esto anterior es en especial para sistemas de alcantarillado residual ya que el régimen hidrológico en términos generales no puede cambiar tan drásticamente. Lo que se mira para cualquier tipo de red es la topografía el urbanismo y el esquema vial existente; estos tres factores le dan al diseñador los criterios suficientes para hacer su elección.

La experiencia del diseñador se encuentra más focalizada hacia sistemas de drenaje pluvial; por lo tanto desde este punto de vista lo primero que se realiza es localizar los colectores principales los cuales coincidirán con las vías principales. Todo tendrá su excepción dependiendo de la topografía; sin embargo es la tendencia general que se tiene. Algunas veces se realiza la evaluación de distintas alternativas desde el punto de vista técnico y económico. Normalmente la decisión involucra el trazado más corto y aquel que favorezca de una mejor manera el drenaje por gravedad. Para la evaluación de estos trazados, se realiza un diseño hidráulico por cada uno y el recorrido que de los menores diámetros y las menores longitudes es el que se elige.

En cuanto a los puntos de arranque el único criterio es que sean ubicados teniendo en cuenta la localización más alejada con respecto a los puntos de descarga y que todavía tengan suscriptores en las cercanías. Se trata de que sean lo mínimos posibles para disminuir costos. De igual manera solo para alcantarillados pluviales se trata de seguir el drenaje natural ya que esto hace que la evacuación del agua sea más eficiente; para aguas residuales esto no siempre se cumple. De manera similar se tiene que la ruta principal no será aquella por donde más valor de pendiente se tenga ya que probablemente esto no coincida con las vías principales de la ciudad.

La ecuación de diseño que utiliza el ingeniero Arango es la ecuación de Manning.



ENTREVISTA 12

Nombre: Orlando Figueroa

Lugar de trabajo actual: Independiente.

Fecha: Mayo de 2013

En Dr. Figueroa, respondió a la encuesta de la siguiente manera:

Para la parte de trazado, tanto para alcantarillado pluvial como residual, se tienen en cuenta los siguientes parámetros en orden de importancia:

1. Conocer las características topográficas de la entrega.
2. Localización de la entrega (punto de descarga o PTAR).
3. Características topográficas del área a drenar.
4. Características de las vías.
5. Proyectos de desarrollos viales o ampliaciones.
6. Existencia de redes de alcantarillado pluvial y sanitario
7. Planes de integración con las redes existentes y capacidad de los conductos.
8. Existencia de otras redes de servicio y su localización.
9. Proyectos de ampliación o modificación de redes existentes.

Para el caso de proyectos que sean de alcantarillado combinado se debe tener en cuenta la localización de sitios de alivio y la existencia de planes futuros para independización de las aguas residuales y lluvias. El ingeniero dice que todas las anteriores influyen en la decisión de elegir un trazado y que al ser tantas, se limitan las posibilidades hasta hacerlas casi reducidas dejando unos pocos corredores disponibles. En cuanto a la configuración de la red el trazado que según su criterio se adapta mas a variaciones topográficas es el de red de alcantarilla abierta, multidireccional, con orientación a los colectores principales ya que este permite optimizar el tamaño de las tuberías.

Para el diseño hidráulico se busca que los recorridos que vayan de los puntos más altos a los más bajos para que la red no se entierre demasiado y generando entregas graduales al colector o colectores principales, de tal manera que su aumento de diámetro sea gradual. De igual manera estipula que el diseño de los colectores no debe basarse solo en la pendiente si no que hay que hacer una combinación entre esto, el punto de descarga y el menor recorrido posible.

Por último el Ing. Figueroa estipula que no conoce ningún programa que ayude en la selección de trazado, que él se apoya de herramientas graficas como AutoCAD, hojas electrónicas con la ecuación de Manning y programas como el EPASWMM 5.0 para modelación.

ENTREVISTA 13

Nombre: Rosario Quevedo

Lugar de trabajo actual: Independiente.

Fecha: Mayo de 2013

La ingeniera Rosario Quevedo establece que los únicos factores relevantes para la escogencia de un trazado en la topografía del terreno en especial las vías y claramente la distribución urbanística. Esto se logra con un catastro bueno y con un levantamiento adecuado que tenga los detalles importantes del sitio que se busca drenar. Para el Valle del Cauca la mayoría de sistemas que se tienen son combinados por lo tanto este tipo de sistemas se sigue aprobando debido a que realizar la separación empezando desde las casas resulta bastante complicado.

Para los sistemas que se diseñan se tiene como único criterio ubicar la ruta principal por el punto más bajo del proyecto y poner los sitios de inicio en los colectores como los puntos más altos topográficamente. En cuanto a la parte de costos lo ideal sería seguir la pendiente del terreno ya que con esto se disminuye los costos de excavación; sin embargo a veces se tienen problemas ya que con los diámetros que se manejan resulta difícil cumplir el requerimiento mínimo de altura a la cota clave del ducto.

El punto de descarga final es definido o seleccionado conjuntamente con la empresa de servicios públicos, pero normalmente no involucran descarga directa al cuerpo receptor si no empalmes a redes. En estos sitios se cumple al pie de la letra la normatividad del RAS y para realizar modelaciones se trabaja con programas como Mouse, SewerCAD, EPASWMM y hojas de Excel. La ingeniera especifica que la ecuación de diseño es la de Manning y que no conoce en Cali alguien que use la ecuación de Darcy para el diseño de alcantarillados.

Confirma que efectivamente si se hace una evaluación de opciones de trazados, pero esta evaluación como máximo tendrá 3 posibles distribuciones las cuales no difieren geométricamente mucho debido a la disponibilidad de espacio en la ciudad.

ENTREVISTA 14

Nombre: Juan Sebastián Peña

Lugar de trabajo actual: EMCALI.

Fecha: Mayo de 2013

El ingeniero Juan Sebastián Peña, tiene 5 años trabajando para EMCALI e indicó que el trazado está limitado principalmente a la topografía que se tenga en el sitio. Adicional a este hecho se deber ver la presencia de otros servicios públicos, el sitio de entrega final, el tipo de pavimento que tenga la vía y como elemento final el estudio de suelos que se tenga de la zona. Estos factores influyen en la decisión ya que impactan implícitamente en los costos que se van a generar para construir el proyecto.

Debido a que en Cali se tienen muchos sistemas combinados, es importante para diseñar el trazado de estos que se tenga en cuenta localización de estructuras de separación de caudales y de cuerpos receptores ya que de esto dependerá la longitud del trazado y otras variables de suma importancia. De igual manera debido a la configuración topográfica del Valle del Cauca los trazados más diseñados han sido configuraciones perpendiculares para los colectores secundarios, los cuales hacen la entrega de caudal a los colectores principales. En cuanto al diseño hidráulico, este se hace para los distintos trazados que se tengan y se escoge la alternativa que mejor optimice el diámetro de los conductos a la vez que sea factible hidráulicamente en los parámetros que gobiernan el diseño (fuerza atractiva, q/Q , parámetros del RAS, etc.).

Seguir el drenaje natural sería lo óptimo pero esta no es la realidad de Cali ya que fue una ciudad que no fue planeada urbanísticamente y por lo tanto hay muchas partes en las cuales el flujo por gravedad no es viable. El trazado se hace encima de los planos urbanísticos y topográficos; es un proceso que se hace bajo el criterio del ingeniero y se realiza a mano alzada inicialmente. Luego se ingresa a AutoCAD para perfeccionarlo y con base a este hace el levantamiento altimétrico de la red. Todos los costos se tratan de ajustar el presupuesto. Finalmente el ingeniero indica que para los cálculos hidráulicos hace uso de la metodología tradicional usando la ecuación de Manning

ENTREVISTA 15

Nombre: Jesús Antonio Soto Moreno

Lugar de trabajo actual: EMCALI.

Fecha: Mayo de 2013

El ingeniero Jesús Soto está en el área de consultoría del Departamento de Acueducto y Alcantarillado de EMCALI EICE ESP. Es Ingeniero sanitario de la Universidad del Valle y tiene 25 años de experiencia.

Al igual que otros ingenieros este establece que los criterios de trazado se pueden resumir en los siguientes ítems:

1. La topografía del terreno a drenar (drenar naturalmente).
2. El esquema vial.
3. El punto de entrega ya sea para aguas lluvias o para aguas residuales.
4. La premisa de que el sistema debe funcionar por gravedad.

La elección del trazado final simplemente se hace teniendo en cuenta que no haya ninguna violación al cuarto ítem expuesto anteriormente. Si llegan a existir varias posibilidades, se mira la parte hidráulica y aquella que presente menores costos por diámetros es la que se erigirá.

Para determinadas formas de áreas, la selección del colector principal por la ruta de mayor pendiente, puede permitir tener diámetros menores, pero es una alternativa que se debe analizar junto con otras posibilidades de localización del o los colectores principales. Por lo tanto no es una generalización que se pueda hacer categóricamente. En cuanto a los costos la parte de cámaras no se tiene en cuenta para la determinación de decir si se hace o no el proyecto. Lo que más se mira son los costos de excavación, todo lo relativo a la construcción de la red y en algunos casos a futuro los costos de operación.

Para la modelación del sistema se hace uso de EPASWMM más que todo y de AutoCAD para la configuración geométrica. Se usa la ecuación de Manning en el diseño. Los puntos de descarga ya han sido estipulados con anterioridad por la empresa por lo tanto esto no se vuelve a planificar, lo que se hace realmente es verificar según la modelación de la red matriz, aquellos puntos donde todavía se pueden recibir conexiones adicionales.

ENTREVISTA 16

Nombre: Jenner Sarria Velasco.

Lugar de trabajo actual: EMCALI.

Fecha: Mayo de 2013

El ingeniero Sarria, lleva más de 32 años trabajando en sistemas de alcantarillado; actualmente trabaja con EMCALI e indicó que para realizar el trazado se debe conocer aquellos sitios más alejados a los cuales habrá que prestar el servicio de alcantarillado ya que esto definirá la longitud del sistema. De igual manera la topografía es decisiva para no tener sistemas de bombeo los cuales encarecen el proyecto. Similarmente se trata de evitar tener rellenos masivos debido a que tanto el material de préstamo para hacer esto, como el material de excavación que hay que retirar para la instalación resultan muy costosos.

Cabe aclarar que la evaluación de distintos trazados se limita solo a la ubicación de los colectores principales y no se tiene en cuenta los colectores secundarios. Se elige como primera opción aquella que tenga los menores diámetros en su ruta principal y por lo tanto esa ruta principal suele coincidir en sistemas de alcantarillado pluvial con la ruta de mayor pendiente.

Sin embargo estos criterios los aprendió de la experiencia ya que lo que había en literatura no aplicaba para todos los proyectos. En cada sitio se tiene que implementar metodologías distintas y como aplicarlas es cuestión de la experiencia del diseñador.

Los software más usados para simular la red son:

- EPASWMM
- MOUSE
- SEWERCAD

El diseño se realiza con la ecuación de Manning y se prefiere este debido a que es el lenguaje de diseño universal que se usa en Colombia y en otros sitios como Estados Unidos.



3.5 Medellín

ENTREVISTA 17

Nombre: Nelson González

Lugar de trabajo actual: Independiente. Proveedor de EPM

Fecha: Junio de 2013

El ingeniero González trabaja como independiente realizando diseños de alcantarillado para urbanizaciones nuevas en la ciudad de Medellín. Tiene 22 años de experiencia en el área y debido a su trabajo se le considera como proveedor de EPM.

Este estipula que para el trazado se debe tener en cuenta más que todo la distribución de la malla vial con respecto a la distribución de edificaciones. Se debe tener en cuenta que no se debe pasar muy cerca a estructuras grandes, gasoductos, etc. y que bajo ningún motivo se podrá tener cámaras de inspección de más de 6 m de profundidad. El Ing. González dice que no hay ninguna diferencia entre la elección del trazado ya que normalmente se tiene la misma distribución, solo que van por distintos sitios de la vía, así que es indiferente de cuál sea el agua que transporte el ducto.

EPM tiene estipulado todo el sistema de alcantarillado como separado; sin embargo el ingeniero comenta que hay algunos sitios como las comunas o barrios populares en los cuales por disponibilidad de espacio se debe manejar todo por alcantarillado combinado. En estos sitios, una vez fuera del sector se hace la adecuada separación de caudales y se hace la conexión respectiva a la red existente.

Debido a que el material que prima en Medellín para la construcción es PVC, se tiene que para la parte de costos los rellenos entran a pesar mucho dentro del valor total de la obra ya que en el 100% de los casos se debe usar material de préstamo. De igual manera la cimentación es muy importante ya que se deben hacer camas especiales para apoyar las tuberías; por lo tanto esto también se debe tener en cuenta para sacar el costo total de la red. Debido a la naturaleza del terreno en Medellín (topografía empinada), el costo de cámaras de quiebre y de caída es muy alto ya que para cumplir con las restricciones de EPM se deben instalar muy frecuentemente estas estructuras. Casi el 50% del costo total del proyecto está relacionado con este tipo de estructuras hidráulicas. La razón de usar PVC es que los costos de mano de obra se reducen y no se hace necesario el uso de retroexcavadoras o mini-grúas para la instalación. Debido a que la topografía no permite seguir la pendiente del terreno ya que se incumpliría con los criterios de velocidad máxima en longitudes muy cortas, la elección de pendiente está a merced de la experiencia del diseñador y puede haber una mayor flexibilidad en cuanto a la elección de este parámetro. La pendiente que se elige se hace pensando en no profundizarse tanto pero si lograr con esta diámetros adecuados.



Para los puntos de arranque estos son señalados por el urbanizador y en cuanto a los de descarga los establece EPM. El diseñador debe llegar a los puntos indicados y debe hacerse cargo de demostrar que la tubería a la que se conecta tiene capacidad suficiente para resistir la descarga y analizar su comportamiento hidráulico por lo menos hasta 100 m aguas abajo de la conexión para garantizar el funcionamiento de toda la red.

La instalación de tuberías para el sistema de alcantarillado pluvial se inicia por norma como mínimo a una distancia de 80 m desde el inicio de la calzada. Sin embargo la costumbre que se tiene es que desde los 40 o 50 m ya se tienen sumideros los cuales conducen las aguas a las tuberías de tramos iniciales. La hoja de cálculo que se usa para el diseño es la que suministra EPM o en ocasiones la de PAVCO; esta última se basa en la ecuación de Manning. Sin embargo la primera de estas realiza el cálculo de la velocidad con la ecuación de Darcy-Weisbach.

Por último el Ing. González dice que EPM sugiere el uso de algunos programas como EPASWMM para el análisis del funcionamiento del sistema. Pero al no ser de obligatorio cumplimiento esto no se hace, dejando el diseño sólo en la etapa primaria el cual se basa en el flujo uniforme por la red. No se realiza análisis de flujo gradualmente variado, no permanente o rápidamente variado.

ENTREVISTA 18

Nombre: Miguel Jerónimo Vergara M

Lugar de trabajo actual: Miguel Vergara ingenieros consultores.

Fecha: Junio de 2013

El ingeniero Miguel Vergara, tiene 10 años de experiencia diseñando sistemas de alcantarillado. El establece que para el trazado de la red, según las aguas que se transporte, se tiene cierto orden de importancia en los aspectos relevantes para el trazado.

En sistemas pluviales el orden según la relevancia sería:

1. Topografía de la zona
2. Distribución urbanística incluyendo malla vial
3. Drenaje natural de la cuenca

En sistemas sanitarios o combinados el orden según la relevancia sería:

1. Ubicación de plantas de tratamiento o zonas de empalme
2. Topografía de la zona
3. Distribución urbanística incluyendo malla vial

Para los estudios hidrológicos, según la ubicación del proyecto EPM le asigna la cuenca hidrográfica con la cual debe hacer los cálculos pertinentes para los caudales de aguas lluvias. Esto facilita los cálculos ya que EPM tiene registros pluviométricos en distintas estaciones con lo cual hay poco incertidumbre en los valores usados para el diseño llevando a diseños que no estén tan sobredimensionados. La distribución geométrica en Medellín (trazado) se hace para aguas lluvias de oriente a norte y para las aguas residuales se hace la distribución en sentido sur y occidente. Debido a que cada proyecto es distinto no se puede decir que haya un trazado más frecuente esto está ligado directamente al urbanismo que se tenga.

El Ing. recalca que seleccionar el colector principal como la ruta de mayor pendiente no es nada conveniente en sitios de topografía empinada ya que los problemas de socavación de la estructura son muy graves. El único criterio que se tiene es que el colector se trate de trazar paralelo a la quebrada o cuerpo de agua donde vaya a descargar. Para la parte de costos se indica que es importante revisar los costos de reparación de malla vial así como a excavación en conjunto con costos de instalación ya que si solo se mira costos de excavación primaria más el costo de tubería por metro lineal que el metro cúbico de terreno removido.

En general se trata que se tenga las tuberías enterradas en promedio el 1.2 m de profundidad que exige la norma, es decir trabajar con las mínimas profundidades. De igual manera se hace una

observación de que debido al cambio del régimen de lluvias que se está experimentando por Cambio Climático se debería aumentar los periodos de retorno de los aguaceros de diseño para tener menos riesgos de sobrecarga en los sistemas. EPM obliga a que se miren 2 o 3 alternativas posibles para el trazado; este es un trabajo en conjunto con el proveedor y con la empresa prestadora del servicio. Para los puntos de arranque normalmente se tiene para agua lluvias que las tuberías se localizan 50 m aguas abajo del inicio de la vía. Los diseños se hacen con la hoja de cálculo de EPM y por tal razón dependiendo de la versión que se tenga se trabaja con la ecuación de Manning. El ingeniero finaliza comentando que no se hace análisis de FGV o FNP para simular el funcionamiento de la red.

ENTREVISTA 19

Nombre: Mario D’Amato.

Lugar de trabajo actual: Urbanismo Viable

Fecha: Junio de 2013

El Ing. D’Amato con más de 45 años de experiencia en el sector de alcantarillado, manifestó que para realizar cualquier trazado es indispensable tener un buen levantamiento topográfico que indique tanto el urbanismo como las cotas de los Manholes existentes, las zonas de servidumbre y sobre todo un levantamiento de detalles que involucren la localización de postes de energía eléctrica. Lo último se hace debido a que el costo de mover un poste de luz es muy grande y por lo tanto a toda costa se debe evitar pasar por estos sitios y esto se debe tener en cuenta en el trazado.

Una configuración en zigzag o lo que se denomina bayoneta es el trazado más común en zonas planas para las rutas secundarias; sin embargo en sitios con alta pendiente esto cambia ya que se pueden presentar allí problemas de excesiva velocidad o aumento excesivo de cámaras de caída, atraques en concreto, etc. Puede ser más económico dar un rodeo con lo cual cambia totalmente la configuración del sistema. Lo que hay que tener en cuenta es que para alcantarillado pluvial se debe recoger todas las áreas productoras de escorrentía y conducir las lo más rápidamente posible a su descarga y que para alcantarillados residuales se debe llegar al punto de entrega usando la ruta más corta asegurando cubrir a todos los subscriptores.

Para la parte de construcción y diseño hidráulico de la red lo que trata de hacer Urbanismo Viable es implementar aquella opción que genere una compensación de masas, ya que debido a la topografía de Medellín, aparte del relleno que se necesitara para la instalación de las tuberías, se tendrá que poner relleno en ciertas partes para acomodar el trazado elegido. En cuanto a la construcción de estructuras de caída estas también tienen un peso importante ya que normalmente se encuentran cada 40 m y a lo máximo a 80 m cuando se trabaja por el límite de la norma de EPM.

La posibilidad de alternativas depende de la pendiente del terreno. En zonas de alta o moderada pendiente, el trazado está supeditado al urbanismo definido, el cual a su vez depende de numerosas variables. El ingeniero comenta que su empresa desarrolló un programa especial que hace un uso exhaustivo de AutoCAD. Para hacer uso de este programa se debe tener algo que se denomina la topografía modificada del terreno, la cual incluye todos los detalles de los cuales se ha hablado anteriormente. A continuación se muestra el procedimiento que sigue el ingeniero D’Amato para realizar cualquier proceso de diseño

1. “Nuestra oficina difiere de la mayor parte de otros diseñadores puesto que nuestro alcantarillado no es un simple tubo para cumplir una función. Se tiene en cuenta la funcionalidad y la economía como requisitos indispensables, además de cumplir las

normas de ingeniería. A continuación describimos nuestra labor, partiendo de un urbanismo realizado por otro profesional:”

1. “Se repite la malla tridimensional entregada por el topógrafo, conforme los puntos entregados con XYZ y su descripción, labor realizada por un ingeniero. Este trabajo se realiza con un software elaborado por nuestra oficina, similar a un DTM, interactivo con AutoCAD. Con este programa se diseñan vías y alcantarillados.”
2. “En AutoCAD se inserta la propuesta urbanística en coordenadas XYZ iguales al trabajo topográfico y nunca más se podrá cambiar su posición. Esta propuesta se analiza con varios comando elaborados dentro del programa nuestro.”
3. “Se proponen variaciones al urbanismo que tenga en cuenta las condiciones propias del lote. Además, las recomendaciones del estudio de suelos y geotecnia.”
4. “Las propuestas se realizan después de conocer las posibles terrazas del urbanismo original, las posibles rasantes de vías, chaflanes, etc.”
5. “La modificación busca conciliar un proyecto viable y no simples rayas. Se analizan los nuevos terracedos, nuevas rasantes, etc. Con el software, se determinan los cortes y llenos de cada vivienda o edificio, de las vías, zonas de parqueaderos, zonas comunes, etc. Esta información se dibuja en planta a colores identificando las zonas e indicando los espesores de corte o lleno obtenidos.”
6. “Se itera el proceso cuando se encuentra sitios puntuales que requieren alguna modificación.”
7. “Con la información anterior, se elabora una nueva malla tridimensional del proyecto final obtenido.”
8. “Solo después de ejecutadas las anteriores labores, se procede a dibujar en la planta urbanística, dentro de Autocad, las líneas que visualmente consideramos que van a pasar a ser redes de alcantarillado. Su ubicación en las vías se ejecuta siguiendo los parámetros de la entidad que vaya a revisar el proyecto. Generalmente, es una paralela al eje a una distancia determinada, a un costado Aguas Residuales y al otro las Aguas Lluvias.”
9. “Se obtienen los perfiles de estas líneas y se dibujan, indicando el perfil del terreno natural, el de la topografía modificada (llámese rasante o terraza) y líneas auxiliares paralelas a ambas a la distancia que el diseñador elija. Aquí el ingeniero revisa y coloca cámaras adicionales por cambios en las pendientes y hace los cambios de ruta que vea necesarios y elimina tramos que no se vean obligados para satisfacer las necesidades.”
10. “En este momento, el ingeniero inserta un comando llamado “tubo”, con el cual se identifica cada tramo de la red. Este comando recibe los atributos propios, a saber:
 - Área externa tributaria (de otros lotes vecinos).
 - Área propia del tramo.
 - Número de viviendas del tramo.
 - Rugosidad hidráulica de cada tramo.
 - Diámetro.”

11. “Facilidad para editar la información anterior y los datos de cotas de tapa y fondo de los puntos superior e inferior del tramo.”
12. “Este comando permite dibujar el perfil natural y modificado del tramo, indicando su longitud, pendiente y diámetro según lo ingresado por el ingeniero. Además los perfiles paralelos al tramo, bien sea naturales o modificados. El dibujo siempre lleva líneas de control que sirven para encadenar los tramos en el orden que prefiera el diseñador.”
13. “Una vez completo toda la malla de al menos una de las dos redes, se puede proceder al cálculo, también dentro de Autocad. El cuadro de diálogo solicita el consumo por vivienda en litros/día, el nombre de la estación pluviométricas donde se ubica el proyecto, la impermeabilidad del terreno, etc. Cualquier incongruencia en el cálculo genera una interrupción que solo se subsana corrigiendo el problema.”
14. “Las hojas de cálculo se generan en Excel y en dxf. Se pueden adicionar a los planos directamente. Suministra toda la información requerida en las hojas de cálculo según el modelo de EPM (puede variarse, si fuese necesario). Adicionalmente, entrega el listado de coordenadas de cada cámara de inspección y muestra todos los cruces de tubería presente en el proyecto. Cada cruce está identificado en coordenadas XYZ de cada uno de los tubos, dando las distancias y cotas del cruce.”
15. “El cálculo siempre sigue la secuencia del flujo y espera a otro ramal cuando hay una unión de dos de ellos. Así, se hace fácil la revisión y el empalme para dibujo.”
16. “También entrega un despiece según los diámetros utilizados.”
17. “El ingeniero revisa la información, corrige diámetros, puede que resuelva cambiar alguna pendiente para mejorar profundidades, disminuir diámetros en los siguientes tubos, etc. Con el comando “tubos” edita los datos a modificar y repite el cálculo de dibujos y la hoja de cálculo. No requiere dibujar otra vez todos los tramos, solo los corregidos”

Este programa es bastante útil para ver la geometría del problema y algún momento EPM lo trató de comprar; sin embargo en la actualidad solo le pertenece a la empresa Urbanismo Viable. Debido a que los cálculos se hacen con la hoja de cálculo de EPM se trabaja con la ecuación de Manning. Nuevamente no se realizan análisis de FGV o de FNP

ENTREVISTA 20

Nombre: Jaime Restrepo

Lugar de trabajo actual: DHS, Diseños Hidráulicos y Sanitarios.

Fecha: Junio de 2013

En ingeniero Jaime Restrepo tiene 15 años de experiencia; ha sido proveedor de EPM por muchos años y sus diseños cumplen todo lo establecido por esta empresa de servicios públicos por lo cual constantemente se está presentando a licitaciones de planes maestros en municipios antioqueños.

Este indica que lo que afecta el trazado es la topografía y los puntos de descarga. Estas dos variables indican cuales serán las mejores rutas para transportar el agua. Normalmente la topografía incluye la distribución urbanista por lo tanto en la práctica se hace como máximo la evaluación de 3 alternativas para elegir dentro de estas la más apta para su construcción. De ninguna manera dada la topografía de Medellín y Antioquia se define la ruta de mayor pendiente para la colocación del conducto principal. Esto incurriría en una elevación de costos que está ligada a los anclajes que se deberían colocar en la tubería. Asimismo dadas las pendientes no se sigue siempre el drenaje natural ya que no se cumplirían las restricciones impuestas por EPM.

Para el ingeniero otro ítem que pesa en la parte de costos es los costos de las cámaras de quiebre. Así mismo se tratan de poner muchos puntos de arranque ya que estos permiten manejar pendientes más inclinadas lo cual aprovecha el hecho de seguir la pendiente del terreno y disminuir costos de excavación en los tramos iniciales.

Se usa la hoja de cálculo de PAVCO y de EPM por lo que en la mayoría de los casos se usa la ecuación de Manning; sin embargo ya se han hecho diseños exitosos usando la ecuación de Darcy-Weisbach. Para determinar el costo total de la red se hace una evaluación costo-beneficio. No se hacen verificaciones con FGV o FNP



ENTREVISTA 21

Nombre: Claudia Villegas

Lugar de trabajo actual: EPM

Fecha: Junio de 2013

La ingeniera Claudia Villegas clarifica que los proyectos de los que se encarga EPM corresponden a la reposición y optimización de las redes existentes por lo cual las preguntas de la encuesta no tendría mucha aplicabilidad. No obstante dice que para aquellos tramos que se diseñan se tiene en cuenta las interferencias con otras redes de servicios públicos, árboles, otras estructuras, disponibilidad de espacio, entre otros.

Cuando se está haciendo una reposición de redes lo ideal sería conservar el mismo alineamiento de la red existente; sin embargo esto muchas veces no es posible por las interferencias mencionadas. Esto sucede para los dos tipos de sistemas de se manejan en alcantarillados separados.

En resumen, EPM considera que un alineamiento es ideal (horizontal y vertical) cuando garantiza conexión a todas las domiciliarias, cuando tenga el mínimo de interferencias posibles y cuando garantice una descarga a un nivel tal que evite el represamiento del agua y su retorno por las conexiones domiciliarias.

La disposición final de las aguas es el punto más crítico para decidir tanto el trazado como el diseño hidráulico de la red porque limita la cota final de la red que se diseñe; en terrenos con pendientes bajas este factor puede limitar considerablemente todos los aspectos de la red. La ingeniera expresa que EPM está en el proceso de hacer que todos sus proveedores usen la ecuación de Darcy-Weisbach y de que se empiecen a usar programas para la simulación de la red como EPASWMM u otros programas; sin embargo esto ha sido difícil debido al arraigamiento que existe frente al uso de otras ecuaciones.

3.6 Síntesis del proceso de diseño Colombiano.

A continuación se realizará un resumen de los criterios que se usan en el medio colombiano para el diseño de sistemas de alcantarillados, ya sea pluvial, residual o combinado.

- ✓ El trazado se realiza a mano usando como criterios principales la topografía, la urbanización y los puntos de entrega.
- ✓ Si la topografía es plana el criterio de selección para alcantarillado pluvial es seguir en drenaje natural de la cuenca.
- ✓ En casos como el de Bogotá donde se sabe que la calidad del suelo es mala en términos del CBR²⁵, se usan mapas que indiquen el tipo del suelo para saber por dónde orientar el trazado.
- ✓ Para alcantarillado pluvial se sigue la pendiente de la rasante de las vías principales.
- ✓ El diseño más común es el separado; sin embargo a pesar de la normativa todavía existen zonas en el país que diseñan alcantarillado combinado.
- ✓ El trazado elegido, siempre presenta la característica de ser entre las opciones revisadas, aquel con la menor longitud de llegada hasta el punto de descarga.
- ✓ Para sitios de alta pendiente el colector principal nunca coincide con la ruta de mayor pendiente ya que esto causa problemas en el cumplimiento de las restricciones hidráulicas y además incrementa el número de cámaras de quiebre y anclajes necesarios para las construcción.
- ✓ Los parámetros que se usan para calcular el costo total de la red son: costos de excavación y entibado, costos de tuberías, costos de cámaras y pozos de inspección y costos de reparación de malla vial en cuanto a la reparación de la estructura de pavimento.
- ✓ Los costos dependen del sitio donde se esté haciendo el proyecto. Por lo tanto la función de costos aparte de ser dependiente de las variables como: costos de excavación y entibado, costos de tuberías, costos de cámaras y pozos de inspección y costos de reparación de malla vial en cuanto a la reparación de la estructura de pavimento, deben hacerse en función a la topografía que se tenga (plana, empinada, intermedia).
- ✓ El proceso de optimización que realiza la mayoría de diseñadores es disminuir al máximo los costos de excavación restringiendo la máxima profundidad a la que se pueden enterrar.
- ✓ Se está empezando a implementar la tecnología sin zanja para la instalación de tuberías, ya que muchas veces termina reduciendo costos del proyecto de una manera considerable. Aunque actualmente la tecnología es cara porque recién está entrando al país, con el tiempo se esperaría que se pudieran generar precios competentes.
- ✓ Los criterios del RAS dan una buena aproximación a lo que sería un red que funcione adecuadamente; sin embargo muchos ingenieros hacen la observación de ampliar el tiempo de retorno de los aguaceros ya que esto si mejoraría la seguridad de los sistemas.

²⁵ CBR es California Bearing Ratio, un índice empleado en Mecánica de Suelos para medir la capacidad de soporte de un material.



- ✓ Mauricio Rivera comenta que el no permitir contracciones en los diámetros es una medida que aparte de ser antieconómica no tiene ningún fundamento hidráulico. Si se realizara un adecuado mantenimiento de la red y se controlaran los sólidos suspendidos no debería haber ningún problema con los cambios de sección a tuberías más pequeñas en tramos aguas abajo.
- ✓ No se realiza la evaluación de más de tres opciones para el trazado de la red. Supuestamente dentro de estas 3 opciones estará la más económica debido a la experiencia del diseñador
- ✓ La ecuación que más se utiliza para el diseño hidráulico es la ecuación de Manning. Menos del 10% de los diseñadores encuestados usa la ecuación de Darcy-Weisbach ya que se tiene la concepción de que es una ecuación complicada.
- ✓ No en todo el país se exige la revisión del funcionamiento de la red diseñada. En el caso de que el diseñador decida hacerlo lo hace mediante programas como EPASWMM, SEWERGEMS, SEWERCAD, MOUSE y StormCAD.
- ✓ El material más usado para alcantarillado sigue siendo el concreto; sin embargo ya se ve la tendencia al cambio por tuberías de PVC.

4. INVESTIGACIÓN CIACUA

Como ya se mencionó en el Capítulo 2, el grupo CIACUA ha estado trabajando en la elaboración de un algoritmo computacional que permita seleccionar el trazado y el diseño hidráulico de una red de alcantarillado bajo un criterio de la alternativa más económica.

Esta investigación está siendo desarrollada teniendo en cuenta la definición de Weng & Liaw, (2005) la cual dice lo siguiente:

“El diseño de un sistema de alcantarillado está dividido en dos etapas: (1) La selección del trazado de la red, (2) El diseño hidráulico de las tuberías de alcantarillado para el trazado escogido (éste punto requiere la determinación de las tasas de descarga, el tamaño de los diámetros, las pendientes, y las cotas de batea). Por lo tanto, el óptimo de las dos fases se encuentra cuando se obtenga un “trazado de la red” que genere el menor costo del “diseño hidráulico” en un sistema de alcantarillado que sea capaz de solucionar todas las necesidades de los clientes”.

Por lo tanto la idea del programa desarrollado, es que evalué todas las posibles alternativas de trazado que se podrían tener en un proyecto y que a cada una se le calcule su respectivo diseño hidráulico, para luego con funciones de costo establecer cuál es el trazado que efectivamente da el diseño óptimo en términos de costos y de funcionamiento hidráulicamente adecuado que cumpla las restricciones impuestas por la normativa colombiana.

En primer lugar, la investigación partió del hecho de averiguar cómo funcionaba el programa SEDAL PLUS, lo cual es lo más cercano a un programa de diseño completo para sistemas de alcantarillado. Este programa fue desarrollado por los ingenieros Rafael Paredes y Mauricio Rivera y básicamente es un programa que es capaz de elegir la topología de la red de forma automática, es decir que puede elegir como se interconectan los tramos de la red. Una vez definida esta topología por el usuario o por el programa, SEDAL es capaz de realizar el diseño hidráulico que incluye la elección de diámetros y pendientes de cada uno de los tubos que satisfagan las restricciones técnicas. Los resultados finales son mostrados en formato de tablas y se pueden ver haciendo uso de la interfaz del programa EPASWMM. El algoritmo para la parte hidráulica tiene las siguientes características:

- Manejo de redes de tamaño limitado.
- Permite usar cámaras de unión y de inspección.
- Modela flujo uniforme, los otros regímenes y tipos de flujo los modela a través de SWMM.
- Permite calcular caudales por longitudes y por áreas aferentes en el caso de alcantarillado sanitario o combinado.
- Para el alcantarillado pluvial permite calcular los caudales por el método racional o por medio de curvas IDF.
- Calcula la hidráulica de flujo uniforme, haciendo uso de la ecuación de Manning.

En el programa que quiere desarrollar el CIACUA se quiere que la hidráulica sea calculada por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach ya que se tendrán resultados más confiables. Adicionalmente se quiere que el proceso se acerque lo más posible a las condiciones que se tienen en la vida real, de ahí la importancia de documentar cuales son las prácticas de diseño en la vida real y todo lo documentado en el Capítulo 3.

Así mismo se quiere incorporar todos aquellos resultados obtenidos de la optimización de diseño de tramos individuales logrados con el concepto de Pendiente Propia y Potencia Unitaria los cuales se describieron en la Sección 2.6.2 del Capítulo 2 en el presente trabajo. El proyecto inicio a mediados del 2012 y debido a que todavía no está completamente terminado no se mostrará la interfaz del programa ni las funciones de costo que han sido estimadas para el programa. Sin embargo a continuación se mostraran las conclusiones y objetivos que se han alcanzado hasta el momento.

4.1 Resultados preliminares de la investigación CIACUA

Como resultados preliminares de la investigación, en cuanto al trazado de la red de alcantarillado se encontró que existen tres criterios de diseño importantes los cuales son: La topografía, la ubicación del cuerpo receptor y la ubicación de la población; la importancia cada una de ellas la define cada diseñador. Adicionalmente, existen otros factores externos que intervienen en el trazado como son la ubicación de otros servicios domiciliarios, disponibilidad de espacio y otros aspectos urbanísticos que determinaran la distribución de la red.

En cuanto a la evaluación de las alternativas posibles para el trazado, estas se hacen con respecto a los costos, pero a su vez, los criterios que definen costos en una red de alcantarillado varían en cada zona. Dependiendo de la topografía del lugar, variables como la excavación, los diámetros de la tubería o las longitudes pueden adquirir más peso. De igual manera, la mayoría de ingenieros que laboran en esta área, coinciden que es solo en el caso de alcantarillados nuevos (Urbanizaciones Nuevas) donde se logra realizar una valoración exhaustiva de diferentes rutas; sin embargo, estos proyectos son escasos y en la mayoría de proyectos se tienen que hay factores que condicionan el trazado, llevando a que solo se tenga una única ruta posible de evacuación de las aguas.

Actualmente, no existe aún una forma de encontrar el trazado óptimo de la red de alcantarillado; todos los métodos que se han venido desarrollando hasta el momento, parten de un trazado inicial lógico dado por la experiencia del diseñador, y posteriormente mejoran ese diseño, lo cual no garantiza el óptimo global, sino un óptimo local. Adicionalmente, la metodología de diseño de una red de alcantarillado se divide en dos procesos separados los cuales son el trazado y el diseño hidráulico de la red, por lo tanto al no trabajar simultáneamente el problema no se puede asegurar que se hayan encontrado diseños óptimos económicamente. Debido a que el trazado obedece a criterios de experiencia del diseñador, no existe un software y/o método de optimización que permita realizar una selección de trazado geométrico óptimo automático a partir de unas variables de entrada. No obstante, existen dos programas comerciales gratuitos para el diseño de alcantarillados los cuales son STORMCAD y SEDAL. El primero de ellos cuenta con un módulo de diseño o rediseño, pero está sujeto a un diseño previamente ingresado por el usuario, y



el segundo si realiza diseños, pero incumple diferentes restricciones hidráulicas impuestas por la normativa del RAS.

En la investigación desarrollada por el CIACUA, referente a la parte de costos de una red de drenaje urbano, se ha descubierto que el costo de tuberías es un porcentaje bajo del costo total de la red, mientras que el costo por excavación corresponde al mayor porcentaje; por lo tanto si se minimizan los costos de excavación, se reducen los costos del proyecto. Este comportamiento es mucho más claro en pendientes de instalación medias y altas, que en pendientes bajas.

Cuando se desarrolla el análisis de costos por tramos y por series, se observa que el aumento o la disminución del costo en diámetro se ve afectado por la disminución o el aumento de la pendiente de diseño respectivamente. En terrenos planos, los diseños de series que generan menores costos son aquellos en los que el gasto de la energía al inicio de la serie es bajo y al final aumenta, por lo que en terrenos planos es importante utilizar Pendientes Propias²⁶ bajas al inicio y altas al final de la red. Por otra parte en terrenos inclinados el gasto de la energía debe ser acorde al terreno, es decir que las pendientes del tubo sean similares a las del terreno. Lo anterior lleva a generar una sugerencia para el diseño de redes de alcantarillado y es que al inicio de la red donde los caudales son bajos es preferible que las pendientes sean bajas, mientras que al final de la red donde se transporta mayor caudal y se puede reducir el diámetro de los tubos con gastos de energía altos, es preferible que la pendiente del terreno sea mayor, es decir transportar más caudal por terrenos inclinados que por terrenos planos.

El criterio de optimización encontrado en la investigación preliminar es: *la pendiente de diseño de la red*. La pendiente de diseño es la que determina el diámetro que se debe seleccionar, y es con base a esta variable que se puede realizar un diseño exhaustivo de los tramos que componen una red de alcantarillado. Debido a lo anterior, el criterio más adecuado para el diseño optimizado de un tramo de alcantarillado es la selección de Pendientes Propias, con el objetivo de reducir en gran medida el costo de las tuberías del sistema y así tratar de reducir los costos totales de la red. Para terrenos inclinados, es necesario añadir a los diseños en los tramos, pendientes intermedias que minimicen la diferencia entre la pendiente del terreno y la pendiente de la tubería. Esto permite que, cuando se lleve a cabo la evaluación de series de tramos, los costos de excavación se reduzcan de forma importante.

Con los resultados obtenidos por el programa de optimización CIE que ha venido desarrollándose en el CIACUA, se han logrado obtener mejores resultados que el programa SEDAL PLUS para series en terrenos planos e inclinados con caudales y longitudes variables en los tramos. Esto se debe a que el programa CIE logra optimizar la Potencia Unitaria lo que lleva los tubos a su máximo porcentaje de llenado mientras cumpla las restricciones, esto haciendo uso de Pendientes Propias y en el caso de terrenos inclinados haciendo uso de pendientes intermedias y Propias para lograr ajustarse a éste. Asimismo, el programa CIE garantiza que el diseño hidráulico es exhaustivo sin aumentar el tiempo de cálculo debido a las metodologías de poda utilizadas; por lo tanto se están logrando evaluar todas las posibles configuraciones de la red y si se está logrando llegar a un óptimo verdadero.

²⁶ La Pendiente Propia fue un término introducido en el Capítulo 2 en el Numeral 2.6.1.

De las anteriores conclusiones se puede decir que según la propuesta del CIACUA, se puede tratar de realizar un diseño exhaustivo sin tener que incrementar el tiempo de cálculo; todo con la ayuda de un programa de diseño adecuado que se fundamente en ecuaciones físicamente basadas y en criterios apropiados de ingeniería hidráulica. La parte de experiencia del diseñador es fundamental, sin embargo no es suficiente para afirmar que siempre lleva al mejor criterio de economía, por lo tanto lo que pretende el programa CIE es ser una ayuda para encontrar un óptimo global al problema y no un óptimo local, que es lo que se viene haciendo por años en la ingeniería Colombiana.

El programa CIE ha logrado los anteriores resultados tratando de idealizar un esquema de sistema de alcantarillado. El esquema con el que se ha tratado de diseñar una red es el mostrado en la **Figura 22**. En éste se elige un punto de entrega establecido (punto azul) y los puntos por donde teóricamente se podría hacer una conexión de conductos respetando la urbanización que se tenga (Bloques cuadrados) y haciendo que el agua fluya por diferencia topográfica. Las líneas rojas indican todas las posibilidades de conexión en la matriz y lo que hace el programa, es contemplar cada una de las posibilidades de conexión desde el punto que se elija de arranque hasta el punto de descarga. Por cada ruta posible desde el punto de arranque hasta el punto de descarga, se determina el diseño hidráulico de todos los conductos y comparando cada una de las rutas contempladas por el programa, se determinan costos totales de la red usando ciertos aspectos económicos como la excavación, instalación, costo de cámaras y costo de tuberías. Finalmente se elige la ruta de costo mínimo realizando el diseño exhaustivo del que se hablo anteriormente.

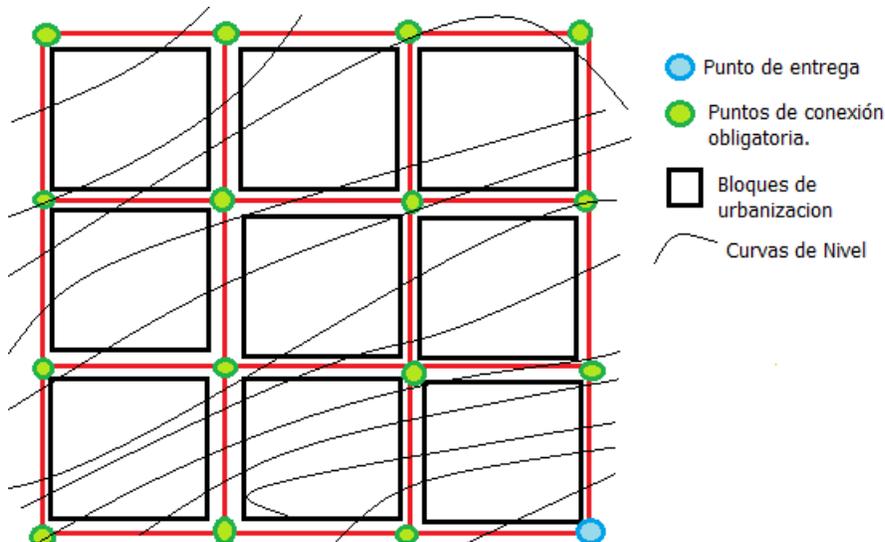


Figura 22. Esquema de un problema de diseño de alcantarillado

Debido a la simetría con la que se tiene conceptualizado el programa, no se ha podido evaluar el criterio de longitud, el cual parece ser decisivo en la elección del trazado. Sin embargo, el futuro del proyecto va encaminado hacia el diseño de una red real con la cual se puedan realizar más ajustes al programa comparando con los resultados y valores obtenidos de un sistema que ya esté diseñado y aprobado.

5. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en lo descrito en el capítulo 3 y en el capítulo 4 se realiza una primera crítica a la forma en la que se está diseñando en el país. Esta primera crítica es al uso de la ecuación de Manning como ecuación base para el diseño hidráulico de la red. A continuación se listan las razones por las cuales no se debería usar esta ecuación:

1. Ésta fue deducida en su momento para canales de sección transversal rectangular con Flujo Turbulento Hidráulicamente Rugoso (FTHR). Hoy en día en tuberías para sistemas de alcantarillado casi siempre se tiene Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso debido a los materiales con los cuales se elaboran las tuberías y a la calidad del terminado constructivo del material. Por lo tanto el límite de validez de esa ecuación es precisamente que el flujo sea FTHR lo cual se viola en la mayoría de sistemas de alcantarillado.
2. Los valores del coeficiente de rugosidad n de Manning estimados en laboratorio, son menores que los que se utilizan usualmente en el diseño de alcantarillados. Por lo tanto en el diseño se está sobredimensionando ya que la velocidad que se supone para el flujo es mucho más alta que la velocidad real. Esto aparte de llevar a diámetros más grandes, puede ser peligroso ya que se puede estar violando la norma de la mínima velocidad requerida en el sistema para transportar los sedimentos.
3. El n de Manning varía con la relación de llenado, por lo tanto no es un coeficiente que realmente describa la rugosidad de la tubería. Esto se aprecia en la **Figura 23**.

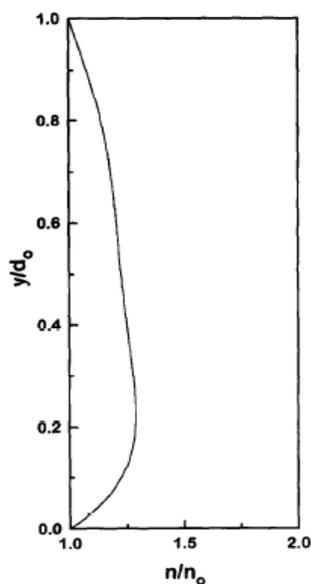


Figura 23. Curva de la relación de Manning con la relación de llenado.²⁷

4. De la **Figura 23** se concluye que el n de Manning para relaciones de llenado por debajo de la máxima velocidad ($y/d= 0.81$) es más grande en cerca del 25% que el valor constante

²⁷ Tomado de (Zaghloul, 1997)

supuesto cuando la tubería está llena. Lo cual nuevamente lleva a sobredimensionamientos si se tienen profundidades de flujo menores al 50% de llenado. Si se tienen profundidades mayores al 50% de llenado el conducto se está subestimando lo cual aumenta las probabilidades de sobrecarga.

Todas las razones anteriores indicarían que realmente usar la ecuación de Manning lleva a una acumulación de errores que no hacen que el diseño funcione óptimamente y más teniendo en cuenta que los diseñadores eligen un valor constante y no variable para este coeficiente. Si se mira la otra posibilidad la cual es calcular la velocidad por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach

$$V = -2\sqrt{8gRS} \log_{10}\left(\frac{ks}{14.8R} + \frac{2.51\nu}{4R\sqrt{8gRS}}\right)$$

se tiene que es una ecuación explícita y que en ella solo hay que reemplazar valores los cuales son conocidos durante la etapa de diseño. Por tal razón es una razón inválida decir que la ecuación es muy complicada para su uso.

Por otro lado queda la duda acerca de que tan verdadero sea el hecho de que el diseño óptimo se consiga tan solo con un proceso de observación del diseñador. Si bien la experiencia dará una buena aproximación, no hay razón por la cual no se deban utilizar las herramientas computacionales para realizar una revisión exhaustiva de todas las posibilidades de diseño. Ya se probó con los avances hechos en el programa CIE que realizar una revisión de todos los diseños no aumenta el tiempo computacional de cálculo de una manera significativa; por lo tanto es una práctica que se puede implementar y que seguramente disminuirá el presupuesto necesario para la construcción total de un red de alcantarillado.

El hecho de que no se hagan revisiones del funcionamiento hidráulico de la red una vez terminado y planteado el diseño, lleva a que no se identifiquen posibles sitios de sobrecarga y de inundación, llevando a que los sistemas fallen con una frecuencia no deseada. El análisis de FGV revela cuales son los sitios más propensos en la red, y ayuda a que se puedan implementar controles dentro de la misma para que en los eventos de crecientes altas se pueda controlar la presurización del sistema y se reduzca la posibilidad de inundación. Programas como EPASWMM son de acceso gratuito y los profesionales deberían estar en capacidad de aprender a manejarlo para aportar al buen diseño de las redes de alcantarillado Colombianas.

Se descubrió que todavía se tiene la concepción de que las aguas que viajan por el sistema de alcantarillado deben ser drenadas lo más rápido posible. Esto lleva a que todo el sistema esté sobredimensionado y que en poco tiempo las plantas de tratamiento se queden sin capacidad debido a que se generan picos de caudales muy grandes en tiempos cortos en el sitio de descarga hacia la PTAR. Por tal razón a pesar de que se esté tratando de disminuir en el proceso de diseño volúmenes de excavación, a la larga se tendrán diseños que la mayoría del tiempo estén sobredimensionados en más del 50% de la capacidad. La idea para los alcantarillados que se van a diseñar y los que toca rehabilitar es que sean sistemas integrados en los cuales tanto la red, la planta de tratamiento y el cuerpo receptor trabajen en conjunto para lograr el funcionamiento óptimo de la red. Para lograr esto hay que instalar en los sistemas controles en tiempo real para

atenuar los picos de caudal que se generan en eventos de lluvia y distribuirlo espacialmente en la red para lograr caudales constantes a lo largo de red.

De la parte de diseño de sistemas de drenaje urbano, se rescata que la evaluación de costos se hace teniendo en cuenta muchas variables, las cuales no se habían pensado en el ámbito académico y que gracias a la investigación realizada ahora se podrán tener en cuenta. Como ejemplo de esto se tiene la estimación de la reparación de la malla vial, la cual nunca se había contemplado y en realidad es una parte importante en los gastos en los que se incurre para poder construir un sistema de alcantarillado.

La investigación permitió identificar que tener una función de costos única, no es una aproximación real. La función de costos debería variar según la naturaleza del proyecto (topografía) y por lo tanto se recomendaría profundizar la investigación en aquellos casos particulares, en los cuales probablemente el diseño de alcantarillado cambie; casos como las ciudades costeras, probablemente tienen criterios de diseño diferentes a los identificados en esta investigación (Topografía Plana y escarpada); por lo tanto sería útil conocerlos para lograr caracterizar de una mejor manera el diseño de alcantarillados en todo el país.

Se recomendaría de igual manera que según lo obtenido en esta investigación se siga perfeccionando el programa CIE y que a la vez se indague en métodos matemáticos y computacionales que permitan la adaptación del programa al diseño de proyectos de alcantarillado de mayor tamaño.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Butler, D., & Davies, J. (2010). *Urban Drainage*. London: Taylor & Francis Group.
- Copete, D. (2012). *DISEÑO HIDRÁULICO OPTIMIZADO DE REDES DE ALCANTARILLADO USANDO LOS CONCEPTOS DE POTENCIA UNITARIA Y PENDIENTE LÓGICA*. Universidad de los Andes, Bogotá.
- Duarte Muñoz, A. (2007). *Metaheurísticas*. Madrid: DYKINSON S.L.
- Lopez, A. (Diciembre de 2011). Diseño optimizado de redes de drenaje urbano usando el concepto de Potencia Unitaria. Bogotá.
- Mays, L., & Tung, Y. (1992). *Hydrosystems engineering and management*. Boston, Massachusetts, United States of America: McGraw-hill.
- McGhee, T. J. (1999). *Abastecimiento de agua y alcantarillado*. (E. Ariza, Ed., & D. A. Agudelo Quigua, Trans.) Bogotá D.C: Mc Graw Hill.
- Navarro, I. (2009). *Diseño optimizado de redes de drenaje urbano*. Universidad de los Andes. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Ovalle Bueno, F. L. (2011). *CRITERIOS DE DISEÑO DE TUBERÍAS FLUYENDO PARCIALMENTE LLENAS: VELOCIDAD MÍNIMA, ESFUERZO CORTANTE MÍNIMO Y NÚMERO DE FROUDE CUASICRÍTICO*. Universidad de los Andes, Bogotá.
- Pavia, D. (2010). *DISEÑO HIDRÁULICO OPTIMIZADO DE REDES DE ALCANTARILLADO UTILIZANDO LOS CONCEPTOS DE RESILIENCIA Y POTENCIA UNITARIA*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Republica de Colombia. Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2011). *Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS*. Bogotá.
- Salcedo, C. (2012). *DISEÑO OPTIMIZADO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO UTILIZANDO LOS CONCEPTOS DE RESILIENCIA Y POTENCIA UNITARIA*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Saldarriaga, J. G. (2013). Diseño de alcantarillado de alta tecnología III. Clase de maestría Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Strum, T. W. (2001). *Open Channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill.
- Superintendencia de servicios publicos. (2010). *Sistemas de alcantarillado en Colombia, Visión del servicio público*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- The World Bank Group. (2013). *The World Bank*. Recuperado el 28 de Mayo de 2013, de <http://data.worldbank.org/topic/poverty>

Universidad Autónoma Metropolitana. (16 de Enero de 2006). *Universidad Autónoma Metropolitana, UAM en línea*. Recuperado el 6 de Junio de 2013, de <http://www.uamonline.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/libro2-hidrologia/HU4.7-03.pdf>

Walters, G., & Pereira, D. (1990). Optimal design of parallel storm and foul sewer systems. . En G. Walters, & D. Pereira, *Water Resources Research*.

Weng, H., & Liaw, S. (2005). Establishing an optimizatio model for sewer system layout with applied genetic algorith. *Journal of Environmental Informatics* , 26-35.