



# COMPARACIÓN ECONÓMICA ENTRE ALCANTARILLADO OPTIMIZADO Y ALCANTARILLADO CONDOMINIAL.

Sara Criollo<sup>1</sup>, María Alejandra González<sup>2</sup>, Juan Saldarriaga<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Estudiante Doctoral, Centro de investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de Los Andes, Colombia, Carrera 1 Este N° 19A – 40, Bogotá D.C.

<sup>2</sup>Instructora, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de los Andes, Colombia, Carrera 1 Este N° 19A – 40, Bogotá D.C.

<sup>3</sup>Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes, Colombia, Carrera 1 Este N° 19A – 40, Bogotá D.C.

<sup>3</sup>*jsaldarr @uniandes.edu.co*

## RESUMEN

Se ha demostrado que la implementación de sistemas de alcantarillado no convencionales, como los condominiales, puede ser más económica que la de sistemas convencionales. Sin embargo, esta comparación se ha hecho principalmente con sistemas convencionales estándar, no con sistemas convencionales optimizados. En este estudio se compararon los costos de construcción de tres tipos de alcantarillado en dos zonas planas de Colombia: convencional, convencional optimizado y condominial. Los sistemas convencionales optimizados se diseñaron mediante la implementación del software UTOPIA, mientras que los sistemas condominiales se diseñaron con el software SewerGEMS. Los resultados mostraron que, contrariamente a lo que se pensaba, los alcantarillados condominiales no siempre son los más económicos. En Tumaco, el diseño convencional optimizado fue 30% más económico que el convencional sin optimizar y 32% más económico que el condominial. En Ciudad Verde, el diseño convencional optimizado presentó una economía del 24.4% en comparación con el diseño convencional, y se encontró que el diseño convencional realizado en el macroproyecto no cumplía con las restricciones de diseño establecidas en la norma. Además, se evidenció que el sistema condominial es 4.42% más costoso que el sistema convencional optimizado.

## Palabras clave

Optimización, alcantarillado condominial, alcantarillado convencional

## 1. INTRODUCCIÓN

A pesar de la importancia que poseen los sistemas de alcantarillado para el desarrollo de la sociedad, aún existe un rezago en comparación con los de abastecimiento de agua potable, a los que a menudo se les da mayor atención. En Colombia, por ejemplo, las cifras muestran

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

que la cobertura del servicio de agua potable es del 94%, mientras que la prestación del servicio de alcantarillado se dio en el 88.2% de la población total del país [1].

Para dar solución a la demanda del servicio de alcantarillado se ha abarcado el problema desde diferentes estrategias, de acuerdo con el contexto de cada país, mediante la implementación de distintos tipos de alcantarillados: convencionales y no convencionales. La selección de un tipo u otro en determinado territorio se ve influenciada, principalmente, por los costos. Conforme a la normativa colombiana, para todas las poblaciones se deben adoptar soluciones de sistemas convencionales. Sin embargo, se pueden implementar sistemas no convencionales cuando los sistemas convencionales no son viables ni financiera ni socioeconómicamente.

Entre los alcantarillados no convencionales se encuentran los condominiales. Su implementación surgió en Brasil, en la década de los ochenta, con el fin de incrementar la cobertura de redes de agua y alcantarillado en el país dados los desafíos que implicaron la expansión periurbana [2]. Estos alcantarillados se diferencian de los convencionales en su configuración, al redefinir la unidad física servida. Es decir, se tienen bloques de casas y se cuenta con una conexión única similar a la que existe en un edificio de apartamentos. Esto permite que no se requiera que la red pase por cada calle.

Dada su flexibilidad técnica, se afirma en varios estudios [3, 4] que la construcción de estos sistemas es más económica que los convencionales. No obstante, esta comparación se ha realizado con base en los alcantarillados convencionales, más no con los convencionales optimizados. En este sentido, en este estudio se incluye la comparación de costos de tres tipos de alcantarillado los convencionales, los condominiales y los convencionales optimizados para dos casos de estudio en Colombia.

## **2. METODOLOGÍA**

Para poder realizar la comparación económica entre el alcantarillado condominial y el alcantarillado convencional optimizado se ejecutaron los siguientes pasos: 1) seleccionar dos casos de estudio, 2) diseñar el sistema convencional optimizado usando UTOPIA, 3) realizar el diseño condominial usando el programa SewerGEMS y 4) seleccionar las ecuaciones de costos que serán usadas en ambos diseños. A continuación, se describe cada etapa de esta metodología.

### **2.1 CASOS DE ESTUDIO**

El primer caso de estudio es Ciudad Verde. Este es un sector del municipio de Soacha, en Bogotá, Colombia. Ciudad Verde es un macroproyecto que cuenta con 328 hectáreas, en las cuales existen viviendas unifamiliares, multifamiliares, comercio e instituciones. La constructora que realizó este proyecto no solo hizo las edificaciones, sino que también realizó el sistema de alcantarillado para la zona. Este sistema cuenta con 414 nodos, una descarga y con tuberías que oscilan entre 227 mm y 1300 mm de diámetro.

El segundo caso de estudio se ubica en la zona urbana del municipio de Tumaco, en el Pacífico Colombiano. El área estudiada abarca una extensión de 33 hectáreas y corresponde a un subsector, de cinco generados por Zárate [5], con 98 nodos. El municipio, así como el área seleccionada, se conforma por zonas planas o ligeramente onduladas y las elevaciones fluctúan entre los 0 msnm hasta los 400 msnm. Uno de los principales problemas de

### SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Tumaco es el desorganizado e improvisado desarrollo urbano, el cual se refleja en la baja cobertura de servicios de saneamiento básico y agua potable en comparación con el promedio nacional. Con respecto al servicio de alcantarillado en la zona urbana, sólo el 7.2% de las viviendas lo tienen [6].

## 2.2 DISEÑO CONVENCIONAL OPTIMIZADO

Para el diseño optimizado se implementó el programa UTOPIA que fue realizado por la Universidad de los Andes y se basa en la metodología propuesta por Duque, Duque y Saldarriaga [7]. En esta metodología se menciona que el problema de diseño se puede dividir en dos etapas: selección del trazado y diseño hidráulico. En la selección del trazado se determina el sentido de las tuberías, los caudales de diseño y el tipo de tubería (inicio o continua). Mientras que en el diseño hidráulico se determinan los diámetros, las pendientes y las profundidades de excavación de cada tubería.

En primer lugar, en la selección del trazado el programa implementa una Programación Entera Mixta en la que se modela la red de alcantarillado como un grafo dirigido. Por otro lado, en UTOPIA el problema de diseño hidráulico se resuelve como un Problema de Ruta más corta con el algoritmo de Bellman-Ford. A través de este algoritmo se puede determinar la ruta más corta desde un punto de partida hasta todos los nodos del grafo. En la siguiente imagen se detalla la metodología implementada por UTOPIA.

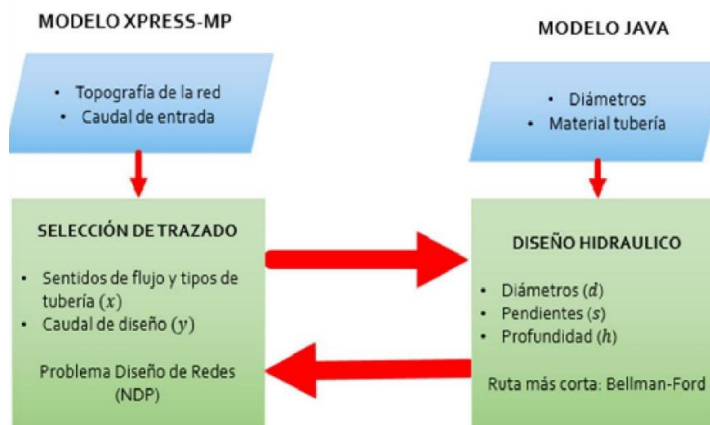


Figura 1 Metodología desarrollada por Duque, Duque y Saldarriaga [7] para el diseño de alcantarillado. Tomado de Aguilar [8]

Para el adecuado funcionamiento del programa es necesario contar con la siguiente información inicial: el caudal de entrada de cada nodo, las coordenadas X y Y, la elevación de cada pozo, la lista de los diámetros comerciales, la rugosidad de las tuberías y las restricciones hidráulicas; tales como velocidad mínima y máxima, esfuerzo cortante mínimo, relación de llenado máximo, entre otros.

## 2.3 DISEÑO CONDOMINIAL EN SEWERGEMS.

Para el diseño condominial se implementó SewerGEMS, que es un software de modelado de sistemas de alcantarillado. Este permite analizar y diseñar estos sistemas a través de herramientas de análisis de flujo y agua residual, entre otras.

En este diseño, lo primero que se realizó fue el trazado de la red, teniendo en cuenta las curvas de nivel de cada caso de estudio y que tuberías tenían que estar en las aceras de las

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

casas y/o edificios. Posteriormente, con SewerGems se verificó que en todas las tuberías trazadas el flujo se transportara a favor de la pendiente, esta fue una de las mayores dificultades en la selección del trazado, ya que ambas zonas de estudio eran planas y se generaban tuberías en contrapendiente.

Después de tener el sentido y ubicación de las tuberías, se determinó el caudal de cada uno de los pozos. El caudal de cada tubería fue calculado usando polígonos de Thiessen en SewerGEMS. Posteriormente, se usaron los siguientes diámetros comerciales = {0.99,0.145,0.182,0.228,0.284,0.327,0.362,0.407,0.452,0.595,0.671,0.747,0.823,0.975,1.051, 1120} y se ingresaron todas las restricciones de diseño de la Resolución 0330 del 2017 en SewerGEMS. En la Tabla 1 están las restricciones de diseño que serán usadas para el sistema convencional y sistema condominial.

*Tabla 1 Restricciones hidráulicas de diseño. [9]*

<b>Parámetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>Condominial</b>
Trazado	En vías, aproximadamente ¼ de la calzada	Acera o dentro de lotes privados
Profundidad mínima a la cota clave	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.75 m vías peatonales o zonas verdes</li> <li>• 1.20 m a vías vehiculares</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.3 m en lotes</li> <li>• 0.6 m en acera</li> <li>• 1.0 en cruces y entradas de garajes</li> </ul>
Diámetro interno real mínimo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 170 mm para poblaciones &gt;2500</li> <li>• 140 mm para poblaciones ≤ 2500</li> </ul>	100 mm
Esfuerzo cortante	1.0 Pa	1.0 Pa
Velocidad máxima	Concreto: 5 m/s Termoplásticos: 10 m/s	5 m/s
Relación de llenado	85%	80%

## 2.4 ECUACIONES DE COSTO

Para poder realizar la comparación económica entre ambos sistemas se determinarán los costos de construcción a partir de la ecuación de Navarro [10], la cual sirve para determinar los costos del sistema de alcantarillado, la cual incluye el costo por metro lineal de tubería y el costo de excavación.

$$C_{ij} = k(9579.31d_{ij}^{0.5737}l_{ij} + 1163.77V_{ij}^{1.31}) \quad (1)$$

$C_{ij}$ : Costo de la sección ij [\$ COP]

$l_{ij}$ : Longitud de la sección section ij [m]

$d_{ij}$ : Diámetro de la tubería ij[m]

$V_{ij}$ : Volumen de excavación de la sección ij [m<sup>3</sup>]

$k$ : Factor de conversión de diciembre 2007 a Julio 2018, igual a 1.58 [adimensional]

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Para el volumen de excavación ( $V_{ij}$ ) se implementa la siguiente ecuación:

$$V_{ij} = \left( \left[ \frac{H + H'}{2} \right] + d + 2e + g \right) * (2B + 2e + d) * (l \cos[\tan^{-1} s]) \quad (2)$$

- $V_{ij}$ : Volumen de excavación de la sección ij [m<sup>3</sup>]
- $H$ : Profundidad de excavación hasta la cota clave aguas arriba de la tubería [m]
- $H'$ : Profundidad de excavación hasta la cota clave aguas abajo de la tubería [m]
- $d$ : Diámetro de la tubería [m]
- $e$ : Espesor de la pared de la tubería [m]
- $h$ : Relleno bajo la tubería [m]
- $B$ : Espacio lateral al lado de la tubería [m]
- $s$ : Pendiente de la tubería [-]
- $l$ : Longitud de la tubería [m]

### 3. RESULTADOS

Contrario a lo que se ha planteado hasta el momento en la literatura [7, 8], los alcantarillados condominiales no logran ser siempre los más económicos. Esto fue posible corroborarlo gracias a los casos de estudio de Tumaco y Ciudad Verde, en donde la comparación se condujo a través del diseño convencional, pero esta vez optimizado.

#### 3.1 CIUDAD VERDE

En la Tabla 2 se encuentran los resultados de los costos de construcción para el sistema condominial, el sistema convencional optimizado y el sistema convencional. A partir de los datos obtenidos, se puede analizar que la diferencia en los costos de construcción entre ambos sistemas convencionales de alcantarillado es del 24.44%; es decir, el sistema convencional optimizado es más económico que el diseño convencional. Por otro lado, la diferencia entre el diseño convencional optimizado y el diseño condominial es de solo el 4.42%, aunque el sistema condominial implemente tuberías de menor diámetro y se puedan tener profundidades de excavaciones más pequeñas, sigue siendo más costoso que el sistema convencional optimizado.

Al examinar el diseño convencional realizado en este macroproyecto (Ciudad Verde), se ha constatado que no cumple con las restricciones de diseño establecidas en la norma, particularmente con respecto a la restricción de esfuerzo cortante mínimo y la profundidad mínima permitida. Este no es un problema presente en el diseño optimizado, ya que UTOPIA asegura el cumplimiento de todos los parámetros.

*Tabla 2 Costos de los sistemas de alcantarillado en Ciudad Verde*

Diseño	Sistema Convencional	Sistema Convencional Optimizado	Sistema Condominial
Programa Usado	Brindado por la constructora	UTOPIA	SewerGEMS

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

<b>Diseño</b>	<b>Sistema Convencional</b>	<b>Sistema Convencional Optimizado</b>	<b>Sistema Condominial</b>
<b>Costo Construcción (\$USD)</b>	\$ 30,933,961	\$ 23,372,199	\$ 24,452,758

### 3.2 TUMACO

Los resultados del caso de Tumaco se presentan en la Tabla 3, en donde se evidencia la diferencia de costos de los tres tipos de alcantarillados considerados para esta zona. De esta manera, el diseño convencional optimizado para del sector elegido de Tumaco resultó ser 30% más económico que el convencional sin optimizar y un 32% más económico que el condominial. Es decir que, incluso sin optimizar, el alcantarillado convencional alcanza un costo más bajo que el condominial.

*Tabla 3 Costos de los sistemas de alcantarillado en Tumaco*

<b>Diseño</b>	<b>Sistema Convencional</b>	<b>Sistema Convencional Optimizado</b>	<b>Sistema Condominial</b>
<b>Programa Usado</b>	SewerGEMS	UTOPIA	SewerGEMS
<b>Costo Construcción (\$USD)</b>	\$ 40,211	\$ 28,227	\$ 41,549

## 4. CONCLUSIONES

Proporcionar agua potable y servicios de alcantarillado es una prioridad crucial para mejorar la salud y el medio ambiente. Sin embargo, en los países en desarrollo, mejorar la cobertura de saneamiento básico es un gran desafío debido a las limitaciones financieras. Para solucionar esta problemática se han implementado sistemas de alcantarillado no convencionales.

El sistema no convencional más comúnmente implementado en América Latina es el sistema condominial. En la literatura se afirma que este tipo de alcantarillado puede reducir en hasta un 40% los costos en comparación con el sistema convencional [2], esta reducción se debe porque el sistema condominial implementa tuberías de menor diámetro y permite una profundidad de excavación menor en comparación con el sistema convencional.

Para poder realizar una comparación entre el alcantarillado convencional, condominial y convencional optimizado se implementaron dos casos de estudio que se encuentran ubicados en Colombia. El primer caso es en Tumaco, ciudad que se caracteriza por tener terrenos planos y por el desorganizado e improvisado crecimiento urbano. El segundo caso de estudio es el macroproyecto, Ciudad Verde, ubicado en el municipio de Soacha. En estos casos de estudio se implementó el programa SewerGEMS y UTOPIA para realizar el diseño condominial y el diseño convencional optimizado respectivamente.

A partir de los resultados obtenidos, en ambos casos de estudio, es posible afirmar que el diseño de alcantarillados convencionales optimizados logra una reducción de los costos de

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

construcción en comparación con los diseños condominiales y los convencionales. En el caso de Tumaco la diferencia de costos entre los diseños convencionales es del 30%, siendo el optimizado el más barato; mientras que entre el condominial y el convencional optimizado este porcentaje sube al 32%, donde el optimizado continúa siendo el menos costoso. Esta tendencia se mantiene para Ciudad Verde, en donde fue posible evidenciar que el sistema condominial es 4.42% más costoso que el sistema convencional optimizado.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Departamento Nacional de Planeación, «Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022,» Bogotá D.C., 2018.
- [2] J. Melo, «La experiencia de los sistemas de agua y alcantarillado condominiales en Brasil. Estudios de caso de Brasilia, Salvador y Parauapebas,» Banco Mundial. Programa de Agua y Saneamiento América Latina (PAS), Lima, 2005.
- [3] J. Ramos, «Análisis comparativo técnico – económico de la red de alcantarillado condominial y convencional en el centro poblado menor de Carhuacatac, distrito de Tarma, provincia de Tarma, departamento de Junín,» Universidad Católica, Lima, 2018.
- [4] D. Mara, «Sanitation: What’s the Real Problem,» *IDS Bulletin*, vol. 43, n° 2, 2012.
- [5] L. Zárate, «Diseño de sistemas de alcantarillado en terrenos muy planos. Factibilidad del diseño sin la operación de bomba. Caso de estudio: Alcantarillado del Distrito de Tumaco (Nariño),» Universidad de los Andes, Bogotá D.C., 2019.
- [6] Alcandía Municipal de Tumaco, «Plan de Desarrollo Municipal 2016-2019,» 2015.
- [7] N. Duque, D. Duque y J. Saldarriaga, «A new methodology for the optimal design of series of pipes in sewer systems.,» vol. 18, n° 5, 2016.
- [8] A. Aguilar, «MODELO DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO PARA EL DISEÑO DE REDES DE DRENAJE URBANO,» Universidad de los Andes, 2019.
- [9] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, «Resolución 0330,» 8 junio 2017. [En línea]. Available: [https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion\\_minviviendact\\_0330\\_2017.htm](https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_minviviendact_0330_2017.htm).
- [10] I. Navarro, « Diseño Optimizado de Redes de Drenaje Urbano,» Universidad de los Andes, Bogotá D.C., 2009.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- [11] V. Mezzomo, «Estudo comparativo entre os sistemas condominial e convencional do tipo separador absoluto de coleta de esgoto sanitário,» Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.