

Determinación del Comportamiento Hidráulico de Cámaras de Inspección Plásticas

Moreno, Mario

Ingeniero Civil, MSc.

Profesor Instructor, Universidad de los Andes. Investigador Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: mario-mo@uniandes.edu.co

Rodríguez, Daniel

Ingeniero Civil, MSc.

Investigador Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: d.rodriguez49@egresados.uniandes.edu.co

Amador, Fabio

Ingeniero Civil, MSc.

Investigador Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: fe.amador38@uniandes.edu.co

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología
Sociedad Colombiana de Ingenieros
Bogotá, D.C. 22, 23 y 24 de mayo de 2008

Resumen. Las pérdidas menores en los sistemas de alcantarillado ocurren cuando hay restricciones locales o alteraciones del flujo al interior de las cámaras de inspección. Su consideración es de gran importancia en el diseño óptimo de los sistemas de alcantarillado. En esta investigación, mediante la construcción de un modelo físico se simularon diferentes condiciones de operación de estas estructuras en un sistema de alcantarillado usando cámaras plásticas fabricadas en polietileno de alta densidad. Las pérdidas de energía experimentales se determinaron según la metodología de pérdida de potencia. Se compararon los resultados experimentales con los calculados mediante cuatro diferentes métodos teóricos con el objeto de determinar su idoneidad para reproducir los resultados obtenidos experimentalmente. Finalmente se proponen ecuaciones de descripción del comportamiento hidráulico de las cámaras para diferentes condiciones de operación.

Palabras Clave. Alcantarillados, Pérdidas Menores, Cámaras de Inspección.

1. Introducción

Las cámaras de inspección son estructuras utilizadas en los sistemas de alcantarillado indispensables para cumplir con diferentes propósitos dentro de la red, como permitir el acceso para actividades de operación y mantenimiento, la aireación y conexión de conductos y la disipación de energía del flujo en aquellos casos en donde la topografía del terreno así lo exija.

Es importante al momento de realizar un diseño apropiado de un sistema de alcantarillado calcular la pérdida de energía generada en las cámaras de inspección. Esto con el fin de determinar el comportamiento hidráulico de la estructura y estimar la cota batea apropiada del conducto de salida, teniendo en cuenta en este análisis el régimen del flujo en la entrada y salida de la cámara de inspección.

Debido a la complejidad física de las cámaras de inspección y de las características del flujo a través de ellas, se han desarrollado diversos métodos teóricos para estimar las pérdidas menores; sin embargo, estos métodos, los cuales han sido desarrollados con base en experimentos realizados en modelos a escala, presentan limitaciones en condiciones fuera de los rangos experimentales y cuando existe flujo supercrítico en el conducto de salida.

Como consecuencia de la alta susceptibilidad de las cámaras de alcantarillado construidas en concreto y mampostería a sufrir daños con graves implicaciones sobre el sistema, recientemente ha cobrado una gran difusión el uso de materiales plásticos para la fabricación de estas estructuras. En esta investigación mediante la construcción de un modelo físico se estudió el comportamiento hidráulico de cámaras de inspección plásticas construidas en polietileno de alta densidad bajo diversas condiciones de operación. La determinación de las pérdidas de energía generadas en las cámaras se realizó mediante la metodología de pérdida de potencia y los resultados fueron comparados con los calculados mediante los métodos teóricos reportados en la literatura con el fin de determinar la habilidad de estos para describir las condiciones presentadas en las cámaras estudiadas. Los resultados de esta investigación permitieron el desarrollo ecuaciones características para el cálculo de las pérdidas de energía generadas a través de las cámaras de inspección plásticas en las condiciones experimentales evaluadas.

2. Pérdidas Menores en Cámaras de Inspección

Las pérdidas menores en los sistemas de alcantarillado ocurren cuando hay restricciones locales del flujo o alteraciones al interior de las cámaras de inspección. La pérdida total de energía a lo largo del sistema es la suma de las pérdidas por fricción y de las pérdidas menores.

Los codos y las válvulas no son comunes en los sistemas de alcantarillado a gravedad, de manera que la mayoría de las pérdidas menores son atribuidas a las cámaras de inspección. Tradicionalmente, la pérdida de energía es expresada como el producto de un coeficiente de pérdidas menores y la diferencia absoluta entre las cabezas de velocidad aguas arriba y aguas abajo del accesorio. Para la mayoría de situaciones, el coeficiente de pérdidas menores para cámaras de inspección tradicionales varía desde 0.1 a 1.0 y las pérdidas de cabeza varían desde 0 hasta aproximadamente 0.06 m. Desde el punto de vista hidráulico, el

detalle más importante de una cámara de inspección es el fondo, el cual puede proporcionar una transición del flujo más suave. (Walski, Barnard, Harold, Merritt, Walker y Whitman, 2006).

Debido a la complejidad de la geometría de las cámaras de inspección, se han desarrollado varios métodos teóricos especializados para el cálculo de las pérdidas menores en sistemas de alcantarillo los cuales se presentan a continuación. (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, 2006a).

2.1. Método Absoluto

Este es un método sobre simplificado para el cálculo de pérdidas menores en cámaras de inspección en el cual se asignan valores fijos de pérdidas de altura en cada una de las cámaras de inspección. Estos valores no dependen de factores como: El ángulo de deflexión entre los conductos, las velocidades del flujo en los conductos de entrada y de salida de la cámara de inspección, y de ningún otro factor propio de la topología de la red.

2.2. Método Estándar

Este método, a pesar de incluir una característica propia de la red como lo es la velocidad de salida del flujo, sigue siendo simplificado toda vez que no incluye de manera directa otros factores como lo son los ángulos de deflexión, el tipo de cañuela empleada, entre otros. El método consiste en multiplicar la cabeza de velocidad generada en el conducto de salida por un coeficiente que depende de la conformación geométrica de la cámara de inspección.

2.3. Método HEC-22

Este método, al igual que el estándar, determina las pérdidas menores en las cámaras de inspección multiplicando la cabeza de velocidad del conducto de salida por un coeficiente de pérdida. Sin embargo, este método tiene como principal característica el involucrar un buen número de variables propias de la red en el cálculo de los coeficientes de pérdidas de cada cámara de inspección.

2.4. Método AASHTO

Esta metodología fue desarrollada por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* de los Estados Unidos. Es importante destacar que este método en sus cálculos no solo incluye la cabeza de velocidad del conducto de salida, sino que también las pérdidas menores se ven afectadas por la cabeza de velocidad de los conductos de entrada; lo anterior implica que este método tiene en cuenta tanto las características del flujo de salida como los de entrada.

2.5. Método Genérico

Este método, al igual que el AASTHO, calcula las pérdidas menores en las cámaras de inspección teniendo en cuenta las características de los flujos de entrada y del flujo de salida. Sin embargo, no involucra factores como cambio de dirección del flujo o uso de cañuelas, entre otros. La metodología de cálculo

consiste utiliza dos factores de pérdidas K_1 y K_2 , los cuales son multiplicados por la cabeza de velocidad de salida y de entrada respectivamente:

$$\Delta E = K_1 \left(\frac{v_s^2}{2g} \right) + K_2 \left(\frac{v_e^2}{2g} \right) \quad [1]$$

2.6. Método Compuesto de pérdida de energía (HYDRA)

El método es usado para calcular una única pérdida de energía en la cámara de inspección, para cada uno de los tubos de entrada. Para obtener la energía total en el extremo aguas abajo del tubo de entrada, se suman la pérdida de energía y la energía total en el extremo aguas arriba del tubo de salida. Luego, se puede determinar la línea de gradiente hidráulico restando la cabeza de velocidad del tubo de entrada a la energía total calculada previamente. La pérdida de energía por la estructura, para un tubo de entrada particular, está dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta E = K \left(\frac{v_s^2}{2g} \right) \quad [2]$$

donde ΔE es la pérdida de energía total, K corresponde al coeficiente ajustado de pérdidas menores, v_s es la velocidad del flujo en la tubería de salida y g es la aceleración de la gravedad.

El coeficiente ajustado K de pérdidas menores está definido como se muestra en la ecuación 3:

$$K = C_B (C_1 C_2 C_3 + C_4) \quad [3]$$

donde C_1 corresponde al coeficiente por el diámetro relativo de acceso, C_2 es el coeficiente por la profundidad del agua en la cámara de inspección, C_3 es el coeficiente por flujo lateral, ángulo lateral y flujo sumergido, C_4 es el coeficiente por los diámetros relativos de los tubos y C_B es el coeficiente por cañuelas.

3. Modelo Físico

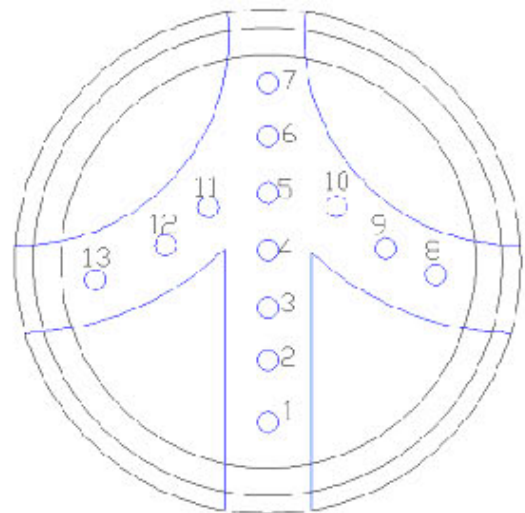


Figura 1. Montaje Físico: (a) Vista General. (b) Localización de los piezómetros al interior de la cámara.

El modelo físico está compuesto por un tanque de almacenamiento con capacidad de 31 m^3 , donde se bombea el agua desde un tanque subterráneo, mediante una bomba de 36 Hp de potencia con una tubería de salida de 10 pulgadas de diámetro. Este tanque genera una cabeza constante de 2.1 metros por medio de un rebose que lleva el agua adicional de vuelta al tanque subterráneo.

El tanque de almacenamiento distribuye el agua a tres tanques elevados de distribución por medio de tres válvulas de cortina; las tuberías de conducción son en PVC de 200 mm. de diámetro. Los tanques de distribución se encuentran a 0.85 metros del nivel del piso, tienen una capacidad de 1.7 m^3 y alimentan las tuberías de 200 mm. que van hacia la cámara de inspección, de acuerdo con la configuración que se desee manejar.

Las cámaras de inspección probadas son modelo doble T de diámetros de 600 mm. y 1000 mm. Con entradas y salida de 200 mm. de diámetro. Se soportan sobre una base metálica, la cual tiene la posibilidad de ser movida verticalmente, por medio de un gato hidráulico de 5 toneladas, con el fin de permitir la variación en la pendiente de las tuberías de entrada de la cámara.

La cámara de inspección está compuesta por tres entradas con configuraciones de 90° , 180° y 270° ; y una tubería de salida. La configuración interna de la cámara de inspección, presenta cañuelas que hacen que el flujo de las tres entradas converja en la tubería de salida. La pendiente de la tubería de salida se controla de manera independiente al soporte del sistema que define las pendientes de las tuberías de entrada. El agua que sale de la cámara de inspección es llevada al tanque subterráneo para realizar un proceso de recirculación del agua durante las pruebas.

En los tanques de distribución existen vertederos de cresta delgada de 60° , que permiten aforar el caudal que circula por las tuberías que llegan a la cámara de inspección. Estos aforos se realizan por medio de limnómetros de precisión de 0.1 mm que permiten medir la altura de la lámina de agua que está pasando por encima del vertedero.

Las tuberías de 200 mm. que unen los tanques de distribución con la cámara de inspección, se soportan sobre cerchas metálicas con el fin de asegurar su estabilidad y evitar posibles pandeos. Para lograr una unión adecuada entre la tubería y el tanque de distribución se utilizan neumáticos para garantizar hermeticidad y realizar cambios de pendiente. La tubería de salida de la cámara de inspección deposita el agua que ingresa al sistema en el canal de conducción.

Para determinar los niveles del flujo en las tuberías y en la cámara se instalaron piezómetros a lo largo de las tuberías y la cámara de inspección; estos son mangueras transparentes de 4.7 mm de diámetro y se miden en un tablero nivelado.

4. Descripción de las Pruebas

Para determinar las pérdidas de energía de las cámaras de inspección, se realizaron pruebas durante aproximadamente seis meses. En cada prueba se consideraron distintos caudales en las diferentes configuraciones de operación (90° , 180° , $90^\circ-180^\circ$ y $90^\circ-180^\circ-270^\circ$) que cubrieran el rango posible de caudales de manera uniforme. Los caudales que fue posible analizar oscilaban entre 1.0 y 13 l/s por tubería

de entrada y entre 0.8 y 21 l/s en la tubería de salida (caudal total). Y las pendientes probadas en las tuberías de entrada estuvieron entre 0% y 5%, mientras que en la tubería de salida entre 0% y 6%.

Para el cálculo experimental de las pérdidas de energía generadas en el interior de las cámaras, en cada una de ellas se realizaron 48 pruebas cada una con seis variaciones de caudal a la entrada, bajo distintas combinaciones en la pendiente de las tuberías de entrada y de salida. Además se probaron todas las posibles configuraciones de entrada del flujo a la cámara.



Figura 2. Configuración de entrada 90°.



Figura 3. Configuración de entrada 180°.



Figura 4. Configuración de entrada 90° y 180°.



Figura 5. Configuración entrada 90°, 180° y 270°

4.1. Metodología de Cálculo de Pérdidas de Energía

La metodología de pérdida de potencia fue desarrollada por la necesidad de relacionar las pérdidas de energía que ocurren en las cámaras de inspección con el amplio rango de configuraciones de operación y condiciones de flujo. Este procedimiento estima las pérdidas de energía para flujo libre, transicional y presurizado.

La metodología de pérdida de potencia está basada en la premisa de que las pérdidas menores de energía generadas a través de una cámara de inspección pueden ser determinadas usando el concepto de conservación de potencia. La potencia que ingresa a la cámara de inspección puede ser igualada a la suma de la potencia de salida y la potencia perdida:

$$\sum_{i=1}^n PWR_i = PWR_s + \Delta PWR_p \quad [4]$$

donde PWR_i es la potencia suministrada por cada tubo de entrada a la cámara de inspección, PWR_s es la potencia a la salida de la cámara de inspección y ΔPWR_p corresponde a la pérdida total de potencia por el flujo a través de la cámara de inspección.

La potencia se define como el producto de la energía total del sistema, el caudal y el peso específico del fluido, tal como se muestra en la ecuación 5.

$$PWR = E \cdot \gamma \cdot Q \quad [5]$$

donde: E = Energía total en el tubo (m).

γ = Peso específico del agua, 9810 N/m³.

Q = Caudal en el tubo (m³/s).

La energía total perdida puede ser estimada despejando ΔE de la Ecuación 4, quedando expresada en términos de los caudales de entrada, el caudal total y las energías totales de las entradas y salidas de la cámara de inspección. En la Ecuación 6 se presenta este resultado:

$$\Delta E = \frac{(\sum Q_i \times E_i) - (Q_s \times E_s)}{Q_s} \quad [6]$$

donde Q_i y E_i corresponden al caudal y la energía total en el tubo de entrada i , Q_s es el caudal en el tubo de salida en m³/s, E_s corresponde a la energía total en el tubo de salida y ΔE es la pérdida total de energía en la cámara.

4.2. Coeficientes de Pérdidas Menores

En esta investigación se calcularon coeficientes de pérdidas menores de ocho formas distintas con el objetivo de determinar cuales realizan una adecuada descripción del comportamiento hidráulico de las cámaras evaluadas:

$$k_1 = \Delta E \left(\frac{2g}{v_s^2} \right) \quad [7]$$

donde: v_s = Velocidad en la salida en m/s.

$$k_2 = \Delta E \left(\frac{2g}{v_{Q_{Mayor}}^2} \right) \quad [8]$$

donde: $v_{Q_{Mayor}}$ = Velocidad en el tubo de entrada con mayor caudal en m/s.

$$k_3 = \Delta E \left(\frac{2g}{v_{+Recto}^2} \right) \quad [9]$$

donde: v_{+Recto} = Velocidad en el tubo de entrada más recto con respecto al tubo de salida en m/s.

$$k_4 = \Delta E \left(\frac{2g}{v_{Mayor}^2} \right) \quad [10]$$

donde: v_{Mayor} = Velocidad en el tubo de entrada de mayor velocidad en m/s.

$$k_5 = \Delta E \left(\frac{2g}{v_{Prom.i}^2} \right) \quad [11]$$

donde $v_{Prom.i}$ = Promedio de las velocidades de los tubos de entrada.

$$k_6 = \Delta E \left(\frac{2g}{\left(\frac{\sum (Q_i \times v_i)}{Q_s} \right)^2} \right) \quad [12]$$

donde v_i y Q_i corresponden a la velocidad y al caudal en el tubo de entrada i respectivamente y Q_s es el caudal en el tubo de salida en m^3/s .

$$k_7 = \Delta E \left(\frac{2g}{v_{Mayor(v_i \cdot Q_i)}^2} \right) \quad [13]$$

donde $v_{Mayor(v_i \cdot Q_i)}$ es la velocidad en el tubo de entrada con producto mayor de $v_i \cdot Q_i$

$$k_8 = \left(\frac{\Delta E}{\left(Prom \left(\frac{v_i^2}{2g} \right) - \frac{v_s^2}{2g} \right)} \right) \quad [14]$$

donde v_i es la velocidad en el tubo de entrada i y v_s es velocidad en la salida.

5. Resultados

Al analizar los resultados de los valores de los coeficientes de pérdidas menores y las pérdidas de energía experimentales de las cámaras de inspección probadas, se puede concluir que estas presentan un comportamiento dinámico a lo largo de los rangos de los diferentes parámetros con las que fueron comparadas. En ninguno de los casos observados se logró identificar un rango de resultados único para las condiciones simuladas en el laboratorio, aunque para la mayoría de los casos se identificó que para valores bajos de los parámetros probados (velocidades, caudales, números de Froude y/o profundidades de flujo en la cámara) se obtuvieron resultados bastante altos y dispersos, y a medida que el parámetro aumentaba los resultados tendían a disminuir su valor y dispersión. Los resultados más representativos se muestran en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Valores y ecuaciones recomendadas del coeficiente de pérdidas menores. Cámara 600 mm.

Configuración de Entrada	Parámetro más Representativo	Valor promedio del coeficiente de pérdidas menores	Ecuación Recomendada	Rango de Validez
180°	Velocidad de Entrada	$K_2 = 0.452$	$K_2 = 0.8874*(\text{velocidad de entrada})^2 - 2.83*(\text{velocidad de entrada}) + 2.32$	0.5 a 2.4 m/s
	Velocidad de Salida	$K_2 = 0.513$	$K_2 = 2.44*(\text{velocidad de salida})^2 - 6.62*(\text{velocidad de salida}) + 4.61$	0.4 a 1.8 m/s
90°	Velocidad de Entrada	$K_2 = 1.43$	$K_2 = 1.22*(\text{velocidad en la entrada})^{0.73}$	0.4 a 2.2 m/s
90° - 180°	Caudal de Salida	$K_1 = 0.154$	$K_1 = 0.0006*(\text{caudal de salida})^{-1.1268}$	5 a 20 L/s
90° - 180° - 270°	Velocidad de Salida	$K_1 = 0.179$	$K_1 = 0.1328*(\text{velocidad de salida})^{-1.8593}$	0.5 a 1.2 m/s
	Velocidad de Entrada	$K_7 = 1.69$	$K_7 = 0.1024*(\text{velocidad de entrada})^{-2.2425}$	0.2 a 0.45 m/s

Tabla 2. Valores y ecuaciones recomendadas del coeficiente de pérdidas menores. Cámara 1000 mm.

Configuración de Entrada	Parámetro más representativo	Valor promedio del coeficiente de pérdidas menores	Ecuación recomendada	Rango de validez
180°	Velocidad de Entrada	$K_2 = 0.289$	$K_2 = 0.2495 * \text{velocidad de entrada}^{1.342}$	0.2 a 1.8 m/s
	Velocidad de Salida	$K_2 = 0.341$	$K_2 = 0.3649 * \text{velocidad de salida}^{2.851}$	0.4 a 1.8 m/s
90°	Velocidad de Entrada	$K_2 = 2.463$	$K_2 = 1.2031 * \text{velocidad de entrada}^{1.4357}$	0.4 a 2.0 m/s
	Velocidad de Salida	$K_1 = 2.092$	$K_1 = 0.8056 * \text{velocidad de salida}^{2.5176}$	0.44 a 1.26 m/s
90° - 180°	Velocidad de Salida	$K_1 = 0.4131$	$K_1 = 0.2529 * \text{velocidad de salida}^{2.7213}$	0.44 a 1.30 m/s
	Velocidad de Entrada	$K_4 = 0.9677$	$K_4 = 0.349 * \text{velocidad de entrada}^{1.6796}$	0.3 a 1.50 m/s
90° - 180° - 270°	Caudal de Salida	$K_1 = 0.213$	$K_1 = 0.0092 * \text{caudal de salida}^{1.624}$	0.002 a 0.021 m³/s
	Caudal de Entrada	$K_1 = 0.218$	$K_1 = 0.006 * \text{caudal de entrada}^{0.6221}$	0.001 a 0.012 m³/s
	Velocidad de Entrada	$K_7 = 2.152$	$K_7 = 0.2474 * \text{velocidad de entrada}^{1.0372}$	0.193 a 1.126 m/s

6. Conclusiones

Se determinó que en la única configuración de operación donde la cámara no afecta de manera importante el comportamiento hidráulico del sistema es cuando opera con una sola entrada de 180°. Para la configuración de operación de 90°, dos entradas (90° y 180°) y tres entradas (90°, 180° y 270°) se encontró que la cámara afecta de manera importante el comportamiento hidráulico del sistema de alcantarillado ya que ésta se convierte en el control del flujo. Lo anterior implica que la cámara controla el comportamiento hidráulico del sistema hacia aguas arriba y abajo, donde genera un represamiento de agua en las tuberías

de entrada a la cámara de inspección (ocasionando que se presenten resaltos hidráulicos en la entrada de la cámara o en las tuberías de entrada) haciendo que en la mayoría de los casos el estado de flujo en la entrada sea subcrítico. En cambio cuando se analizó el comportamiento hidráulico de la salida de la cámara, se encontró que esta generalmente opera en condiciones de flujo supercrítico siendo controlado aguas arriba por el nivel represado de la cámara de inspección.

Se encontró que la configuración que genera mayores pérdidas de energía es la de 90°, donde se determinaron valores de pérdidas mucho mayores que en las demás configuraciones de operación y donde se generaron resaltos hidráulicos en casi todas las pruebas.

Se puede concluir que ningún método teórico se logra ajustar a los valores del coeficiente de pérdidas menores obtenidos de forma experimental, para ninguna de las configuraciones de flujo probadas en el laboratorio. Sin embargo, el método AASHTO es el que presenta la mayor cantidad de datos cercanos a los experimentales o que tiende a sobrestimarlos, a diferencia de los métodos HEC-22 y el HYDRA donde siempre se obtuvo una subestimación de los resultados para las cámaras de inspección probadas. Lo anterior indica que el método AASHTO cuenta con una buena correlación entre valores teóricos y experimentales, resultado inesperado ya que este es un método considerado como sobre-simplificado en comparación con el HEC-22 y el HYDRA.

7. Bibliografía

Butler, David. *"Urban Drainage"* (2004). Second Edition. Spon Press Editors. London and New York.

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) (2006a). *"Pérdidas menores dentro del sistema de alcantarillado"*. Proyecto Cátedra PAVCO. Universidad de los Andes.

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) (2006b). *"Estado del arte y tendencia mundial en la construcción de manholes"*. Proyecto Cátedra PAVCO. Universidad de los Andes.

Chow, Ven Te (1956). *"Open Channel Hydraulics"*. Mc Graw Hill.

Ministerio de Desarrollo Económico (2000). "Reglamento técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000 Título D. Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Pluviales". República de Colombia.

Saldarriaga Valderrama, Juan Guillermo (2007). "Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos", Editorial Alfaomega, Ediciones Uniandes.

Walski, Thomas. Barnard, Thomas. Harold, Eric. Merritt, LaVere. Walker, Noah. Whitman, Brian (2006). *"Wastewater Collection System Modeling and Design"*. Bentley Institute Press.