

**PROYECTO DE GRADO
INGENIERÍA CIVIL**

**DISEÑO OPTIMIZADO DE TUBERÍAS EN SERIE EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO
INCLUYENDO SISTEMAS DE BOMBEO**

**PRESENTADO POR:
JUAN IGNACIO ARBELAEZ VELEZ**

ASESOR:
Juan Guillermo Saldarriaga Valderrama
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
JULIO 2021**

Agradecimientos

A mi familia por apoyarme incondicionalmente a lo largo de mi vida,

A Juan Saldarriaga por guiarme y ayudarme a lo largo de este proyecto

A todo el equipo CIACUA y ex CIACUA que me colaboró en el desarrollo de este
proyecto de grado

Tabla de contenido

Agradecimientos	2
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas	7
1. Introducción y objetivos	8
1.1. Introducción	8
1.2. Objetivos	8
1.2.1. Objetivo General	8
1.2.2. Objetivo Específicos	8
2. Antecedentes	9
2.1. Metodología para la optimización del diseño de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado (Duque, 2013)	9
2.2. Metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado (Duque, 2015) 10	
2.3. Diseño optimizado de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado incluyendo estructuras de caída (Marú, 2018)	11
3. Marco teórico	12
3.1. Sistema integrado de drenaje urbano	12
3.1.1. Tipos de redes de drenaje urbano	13
3.1.2. Componentes de las redes de drenaje urbano	14
3.2. Diseño de redes de drenaje urbano	15
3.2.1. Tipos de flujo	15
3.2.2. Características geométricas de las tuberías	16
3.2.3. Calculo de velocidad.....	17
3.2.5. Restricciones hidráulicas normativas	18
4. Metodología	19
4.1. Datos de Entrada	19
4.2. Modelaje del grafo	20
4.2.1. Modelaje del grafo incluyendo cámaras de caída.....	20
4.2.2. Modelaje del grado incluyendo estaciones de bombeo	21
4.3. Variable de decisión	21
4.4. Función Objetivo	21
4.4.1. Función objetivo previamente usada	22
4.4.2. Función objetivo incluyendo estaciones de bombeo	22
4.5. Restricciones	23

4.5.1.	Restricciones en las tuberías.....	23
4.5.2.	Restricciones en las cámaras de caída	24
4.5.3.	Restricciones en las estaciones de bombeo	24
4.6.	Representación serie de tuberías de alcantarillado mediante grafo.....	24
5.	Resultados y análisis de resultados.....	29
5.1.	Series de 10 tramos.....	30
5.1.1.	Serie de L = 400m, S = 0, Caudal por pozo = 100 L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	30
5.1.2.	Serie de L = 500m, S = 0, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	31
5.1.3.	Serie de L = 1000m, S = 0, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	32
5.1.4.	Serie de L = 300m, S = 0, Caudal por pozo = 1000L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	33
5.1.5.	Serie de L = 400m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100 L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	34
5.1.6.	Serie de L = 200m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	35
5.1.7.	Serie de L = 100m, S = -0.5%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	36
5.1.8.	Serie de L = 400m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 300L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	37
5.1.9.	Serie de L = 400m, S = 0, Caudal por pozo = 100 L/s, Pozos con bombeo disponible = 7,8,9,10	38
5.1.10.	Serie de L = 200m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = 7,8,9,10	39
5.2.	Series de 20 tramos.....	40
5.2.1.	Serie de L = 300m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	40
5.2.2.	Serie de L = 400m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	41
5.2.3.	Serie de L = 500m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	43
5.3.	Análisis de Resultados	44
6.	Conclusiones y recomendaciones	45
7.	Bibliografía	45

Índice de Figuras

Figura 1. Conjunto de nodos que pertenecen a un mismo pozo de inspección. (Duque, 2015).....	9
Figura 2. Representación de un arco en el grafo de diseño hidráulico . (Duque, 2015).....	10
Figura 3. Representación del grafo generado en la metodología propuesta por Duque (2013). (Duque, 2015)	10
Figura 4. Tipos de tuberías para cada tramo de una red de alcantarillado. (Duque, 2015) ..	11
Figura 5. Idealización de diseño hidráulico incluyendo cámaras de caída.....	12
Figura 6. Esquema de un sistema de alcantarillado combinado. (Butler & Davies, 2011) ..	13
Figura 7. Esquema de sistema de alcantarillado separado. (Butler & Davies, 2011).....	14
Figura 8. Elementos geométricos de una tubería parcialmente llena. Adaptado de Butler (2020)	16
Figura 9. Representación de un arco tipo 1 en la metodología propuesta	20
Figura 10. Representación de un arco tipo 2 en la metodología propuesta	21
Figura 11. Representación de un arco tipo 3 en la metodología propuesta	21
Figura 12. Representación arcos tipo 1 para el primer nodo de pozo i a pozo j.....	25
Figura 13. Representación arcos tipo 1, dos pozos con tres diámetros disponibles y tres cotas de batea en el pozo 1	26
Figura 14. Representación arcos tipo 1, tres nodos de igual profundidad y diferente diámetro en el pozo i y pozo k.....	27
Figura 15. Representación arcos tipo 3, tres nodos de igual profundidad y diferente diámetro en el pozo j	27
Figura 16. Representación arcos tipo 1 y 3, tres nodos de igual profundidad y diferente diámetro en el pozo i y pozo k.....	28
Figura 17. Representación arcos tipo 1 y 3, para una solución	29
Figura 18. Figura de Serie de $L = 400\text{m}$, $S = 0$, Caudal por pozo = 100 L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos	30
Figura 19. Figura de Serie de $L = 500\text{m}$, $S = 0$, Caudal por pozo = 100L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos	31
Figura 20. Figura de Serie de $L = 1000\text{m}$, $S = 0$, Caudal por pozo = 100L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos	32
Figura 21. Figura de Serie de $L = 300\text{m}$, $S = 0$, Caudal por pozo = 1000L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos	33
Figura 22. Figura de Serie de $L = 400\text{m}$, $S = -0.1\%$, Caudal por pozo = 100 L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos	34
Figura 23. Figura de Serie de $L = 200\text{m}$, $S = -0.1\%$, Caudal por pozo = 100L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos	35
Figura 24. Figura de Serie de $L = 100\text{m}$, $S = -0.5\%$, Caudal por pozo = 100L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos	36
Figura 25. Figura de Serie de $L = 400\text{m}$, $S = -0.1\%$, Caudal por pozo = 300L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos	37
Figura 26. Figura de Serie de $L = 400\text{m}$, $S = 0$, Caudal por pozo = 100 L/s , Pozos con bombeo disponible = 7,8,9,10	38

Figura 27. Figura de Serie de $L = 200\text{m}$, $S = -0.1\%$, Caudal por pozo = 100L/s , Pozos con bombeo disponible = 7,8,9,10	39
Figura 28. Figura de Serie de $L = 300\text{m}$, $S = 0\%$, Caudal por pozo = 100L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos	40
Figura 29. Figura de Serie de $L = 400\text{m}$, $S = 0\%$, Caudal por pozo = 100L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos	41
Figura 30. Figura de Serie de $L = 500\text{m}$, $S = 0\%$, Caudal por pozo = 100L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos	43

Índice de Tablas

Tabla 1. Posibles clasificaciones de tipos de flujo. Adaptado de Saldarriaga (2020)	15
Tabla 2. Diseño de Serie de L = 400m, S = 0, Caudal por pozo = 100 L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	30
Tabla 3. Diseño de Serie de L = 500m, S = 0, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	31
Tabla 4. Diseño de Serie de L = 1000m, S = 0, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	32
Tabla 5. Diseño de Serie de L = 300m, S = 0, Caudal por pozo = 1000L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	33
Tabla 6. Diseño de Serie de L = 400m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100 L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	34
Tabla 7. Diseño de Serie de L = 200m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	35
Tabla 8. Diseño de Serie de L = 100m, S = -0.5%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	36
Tabla 9. Diseño de Serie de L = 400m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 300L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	37
Tabla 10. Diseño de Serie de L = 400m, S = 0, Caudal por pozo = 100 L/s, Pozos con bombeo disponible = 7,8,9,10	38
Tabla 11. Diseño de Serie de L = 200m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = 7,8,9,10	39
Tabla 12. Diseño de Serie de L = 300m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	40
Tabla 13. Diseño de Serie de L = 400m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	41
Tabla 14. Diseño de Serie de L = 500m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos	43

1. Introducción y objetivos

1.1. Introducción

El servicio de alcantarillado es un servicio básico que necesita la población para evitar problemas de salud pública o ambientales generados por el manejo incorrecto de aguas residuales y/o lluvias generadas en los asentamientos humanos. Normalmente la construcción de las estructuras que realizan la evacuación de aguas residuales y/o lluvias requiere de grandes inversiones monetarias, por lo que han sido desarrolladas varias metodologías para optimizar su diseño y minimizar el costo de estas estructuras.

La metodología propuesta por Duque (2013) y que se continuó desarrollando por Marú (2018) permite el diseño de series de tuberías de alcantarillado incluyendo cámaras de caída, encontrando el diseño que es el mínimo global respecto a la función de costo que sea usada en el programa. Aunque este programa permite el diseño de tuberías en serie de terrenos de alta pendiente con las modificaciones que realizó Marú, el programa aun no cuenta con la capacidad de series de tuberías de sistemas de alcantarillado incluyendo estaciones de bombeo, que podría ampliar las posibilidades del uso de programa a zonas muy planas o de pendiente adversa.

En este proyecto de grado se va a incluir en el programa la posibilidad de diseñar estaciones de bombeo en series de tubería de alcantarillado teniendo en cuenta la idealización del problema propuesta por Duque (2013). La estructura del documento a continuación es la siguiente: En el capítulo 2 se presentan la metodología para el diseño de tuberías en serie propuesta por Duque (2013) y la inclusión de cámaras de caída en esta metodología que fue desarrollada por Marú (2018), es decir, la explicación de los antecedentes de la metodología. En el capítulo 3 se desarrolla el marco teórico y se describe brevemente como es el diseño de tuberías en redes de drenaje urbano. En el capítulo 4 se explica el funcionamiento de la metodología del programa Series, junto a las características con las que se modeló el problema para determinar los resultados presentados en el capítulo 5. En el capítulo 5 se presentan los resultados que fueron obtenidos a partir de la metodología propuesta, utilizando el programa Series y un análisis de los resultados obtenidos. Por último, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones que fueron obtenidas de este trabajo de grado.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Desarrollo de módulo de estaciones de bombeo dentro de programa de diseño optimizado de series de alcantarillado

1.2.2. Objetivo Específicos

- Entender el funcionamiento actual de Series e identificar donde incluir el modulo
- Establecer función objetivo que representa el problema de manera correcta el problema propuesto

- Resolver el problema de diseño optimizado de una serie de tuberías de una red de alcantarillado
- Reportar resultados que han sido encontrados

2. Antecedentes

2.1. Metodología para la optimización del diseño de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado (Duque, 2013)

El desarrollo de la metodología inicio con el proyecto de grado de Natalia Duque (2013) en el que se propuso una metodología para el diseño de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado. Este proyecto de grado propone una metodología para el diseño de una serie de tuberías de una serie de alcantarillado aplicando un algoritmo de optimización que encuentra el óptimo global de la función.

Esta metodología se basa en el algoritmo de Bellman-Ford. En un inicio se propone el modelaje del problema de diseño de tuberías en serie como un grafo, por lo que el problema se convierte en un problema de la ruta mas corta que es resuelto por medio del algoritmo de Bellman-Ford. La idealización del problema como un grafo se basa en la representación de las variables de decisión del problema por medio de nodos y arcos. En un pozo de alcantarillado van a existir un numero de combinaciones posibles de diámetros y cotas de batea que puede tener la tubería. Cada posible combinación que existe en un pozo es un nodo del grafo tal como se representa en la Figura 1.

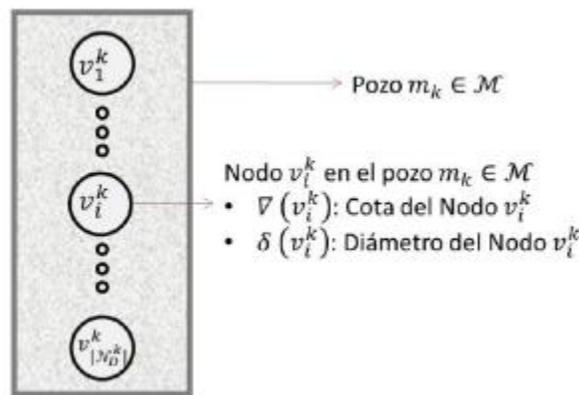


Figura 1. Conjunto de nodos que pertenecen a un mismo pozo de inspección. (Duque, 2015)

Al idealizar los nodos de esta manera se consideran todas las posibilidades del diseño de una tubería que puede tener ese pozo en un sistema de alcantarillado. Los arcos que componen el grafo son la conexión entre nodos y cada arco va a estar relacionado con el costo de construcción que trae ese arco, como se muestra en la Figura 2.

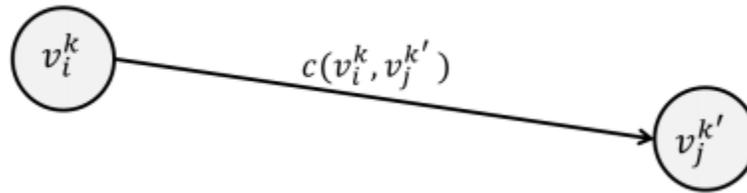


Figura 2. Representación de un arco en el grafo de diseño hidráulico. (Duque, 2015)

El algoritmo inicia generando las etiquetas del grafo, es decir asignando un costo a todos los arcos a partir de las conexiones entre los nodos de cada arco e incluyendo las restricciones hidráulicas que sean tenidas en cuenta. Al realizar el etiquetado de todo el grafo se hace un recorrido de éste para determinar la ruta mas corta, en este caso, la ruta mas corta será la que tenga un menor costo y que cumpla con todas las restricciones hidráulicas. En la Figura 3 se puede observar la representación de una serie de tuberías con tres pozos y dos tramos.

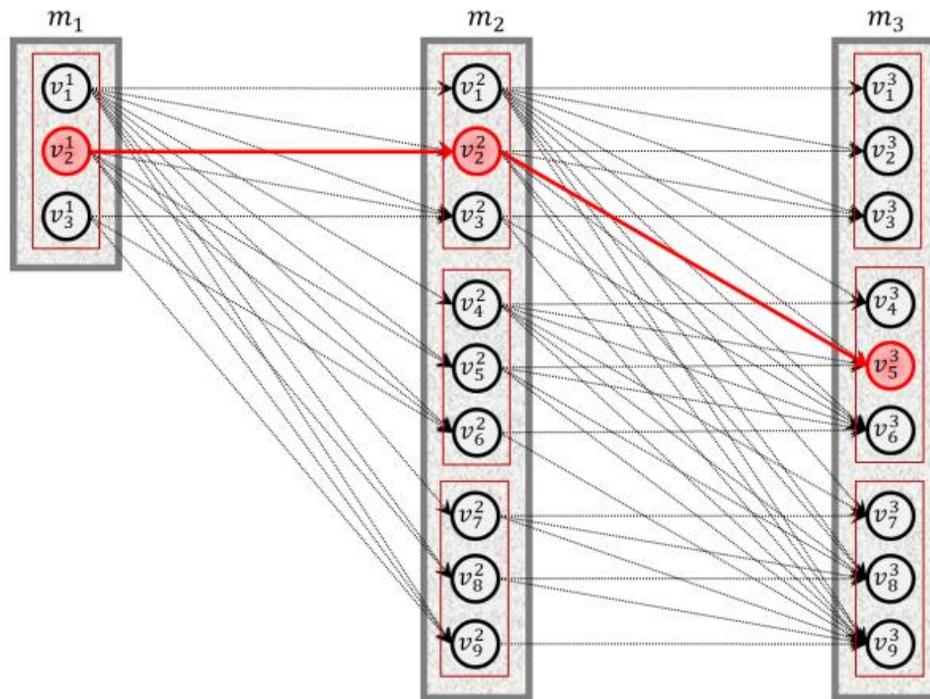


Figura 3. Representación del grafo generado en la metodología propuesta por Duque (2013). (Duque, 2015)

2.2. Metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado (Duque, 2015)

En su tesis de maestría Natalia Duque continuo con la metodología de su proyecto de grado, pero ahora propuso una metodología para todo el diseño de redes de alcantarillado. Es decir,

la metodología abarcaría las dos partes del diseño de redes de alcantarillado, la selección de trazado y el diseño hidráulico, que fue desarrollado en su proyecto de grado.

El problema de selección de trazado es un problema denominado Network Design Problem, que es un problema de Programación Entera Mixta (Duque, 2015). En este caso se modela la red de alcantarillado como un grafo dirigido en el que se establece que los arcos que representan los dos sentidos de flujo y los dos tipos de tubería en la red. En la Figura 4 se presenta un diagrama de los tipos de arcos que hay entre dos nodos de la selección de trazado. Los dos tipos de tubería son las tuberías de inicio no llevan caudal de la red aguas arriba y las tuberías caudal las cuales si pueden transportar caudal de aguas arriba.

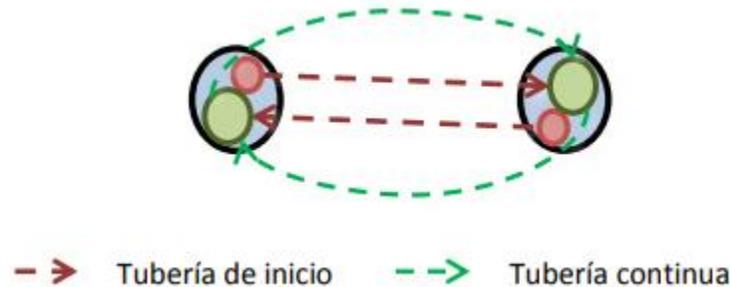


Figura 4. Tipos de tuberías para cada tramo de una red de alcantarillado. (Duque, 2015)

El problema de selección de trazado de la red de alcantarillado involucra dos tipos de problemas, la selección de dirección de flujo y la selección de tipo de tubería. Este problema es resuelto por medio de un software de optimización entera mixta. Una vez el problema de la selección de trazado es resuelto se procede a la resolución del problema de diseño hidráulico como es planteado en Duque (2013). En este proyecto de grado no se trabajará en el problema de selección de trazado, solo en el diseño hidráulico.

2.3. Diseño optimizado de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado incluyendo estructuras de caída (Marú, 2018)

El trabajo continuo con la tesis de maestría de Marú (2018), en esta tesis de maestría se le añade a la metodología propuesta por Duque (2013) el diseño de cámaras de caída. La importancia de las cámaras de caída es que el diseño de sistemas de alcantarillado puede requerir de cámaras de caída cuando el terreno es muy empinado. Las cámaras de caída fueron añadidas a la metodología propuesta para el diseño hidráulico generando un nuevo tipo de arcos en los pozos. Este nuevo tipo de arco se dará en un mismo pozo y representará a las cámaras de caída. En la Figura 5 se observa la idealización del grafo con arcos de pozos de caída. Como se puede observar las cámaras de caída representan un nuevo tipo de arco, el cual se da en el mismo pozo de inspección.

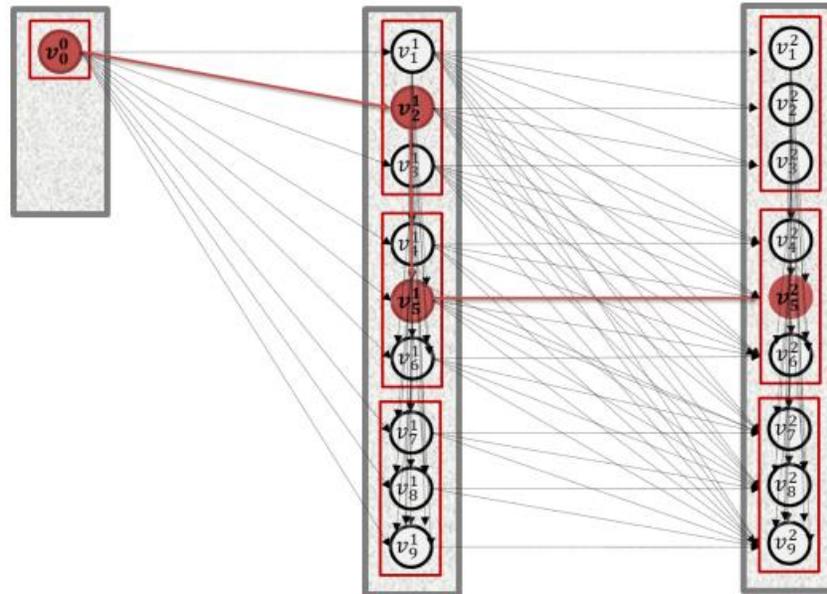


Figura 5. Idealización de diseño hidráulico incluyendo cámaras de caída

3. Marco teórico

3.1. Sistema integrado de drenaje urbano

El sistema integrado de drenaje urbano es una obra civil construida por el hombre con elementos naturales que permiten al agua que pasa por los asentamientos humanos ser tratada y no generar daños ambientales y/o sanitarios (Butler & Davies, 2011). El agua residual que es producida en los asentamientos humanos debe ser dispuesta después de su correcto tratamiento en la naturales. De igual manera, el agua lluvia que cae en el área de los asentamientos humanos, en muchos casos también es perjudicial para el ambiente por lo que debe ser tenida en cuenta en el saneamiento necesario.

Los sistemas de drenaje urbano son compuestos por tres elementos:

- Sistema de alcantarillado
- Planta de tratamiento de aguas residuales
- Cuerpo receptor

El sistema de alcantarillado se encarga de conducir el agua hasta la planta de tratamiento, en muchos casos se conduce solo por medio de gravedad, pero puede ser necesario el uso de sistemas de bombeo. La planta de tratamiento de aguas residuales se encarga de realizar los correspondientes tratamientos químicos y físicos de manera que el agua pueda ser depositada en el cuerpo receptor. Por medio de su capacidad de autodepuración el cuerpo receptor se encarga de terminar la limpieza del agua y de esta manera el agua vuelve a entrar al ciclo del agua. (Saldarriaga, 2020).

3.1.1. Tipos de redes de drenaje urbano

- *Sistemas de alcantarillado combinados*

Los sistemas de alcantarillado combinados son aquellos en los que las aguas lluvias y las aguas residuales fluyen por los mismos conductos. En la Figura 6 se puede observar un esquema de cómo es un sistema de alcantarillado combinado. Estos sistemas de alcantarillado tienen ciertas características como que las tuberías son de mayor tamaño respecto a los sistemas de alcantarillado separados, debido a que se debe diseñar para un mayor caudal. Otra característica es el uso de sobre flujos, los cuales permiten que el agua de las tuberías llegue al cuerpo receptor sin pasar por tratamiento cuando los caudales son muy altos. Esto se permite porque los caudales van a ser muy altos cuando las aguas lluvias dentro del sistema de alcantarillado sean altas y estas van a estar poco contaminadas diluyendo los contaminantes de las aguas residuales. Esto permite ahorrar costos disminuyendo el tamaño de la tuberías que debe ser usado.

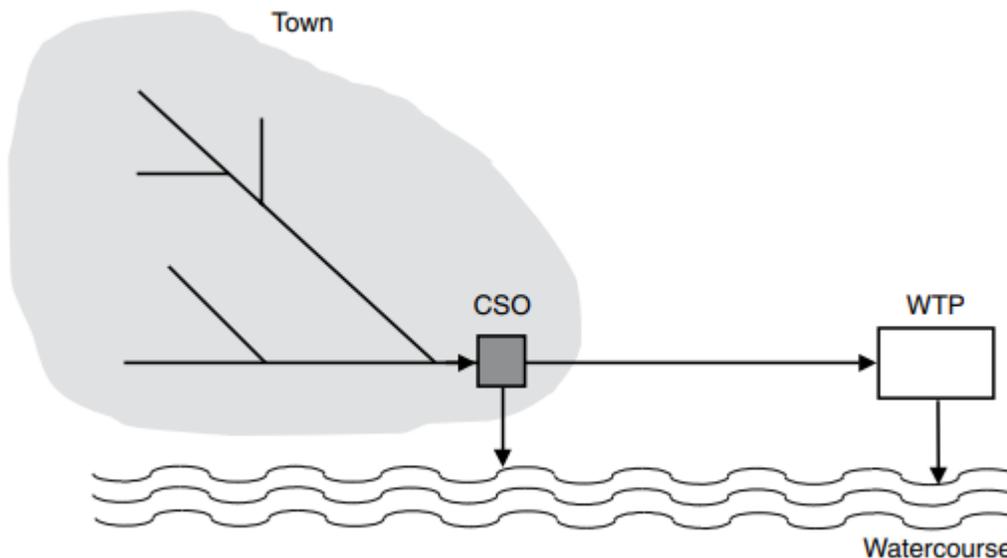


Figura 6. Esquema de un sistema de alcantarillado combinado. (Butler & Davies, 2011)

- *Sistemas de alcantarillado separados*

Los sistemas de alcantarillado separados se caracterizan porque el agua residual y el agua lluvia fluyen por diferentes conductos. En la Figura 7 se puede observar un esquema de un sistema de alcantarillado separado. Este sistema tiene varias características, siendo una de las más importantes que toda el agua residual que es producida en el asentamiento humano llega a la planta de tratamiento de aguas residuales. Existen otras características de este sistema como que puede haber mayores costos en su instalación al ser dos sistemas de tuberías diferentes o que pueden ocurrir conexiones erradas en los domicilios, es decir, que una vivienda conecta la tubería de agua residual en el sistema pluvial.

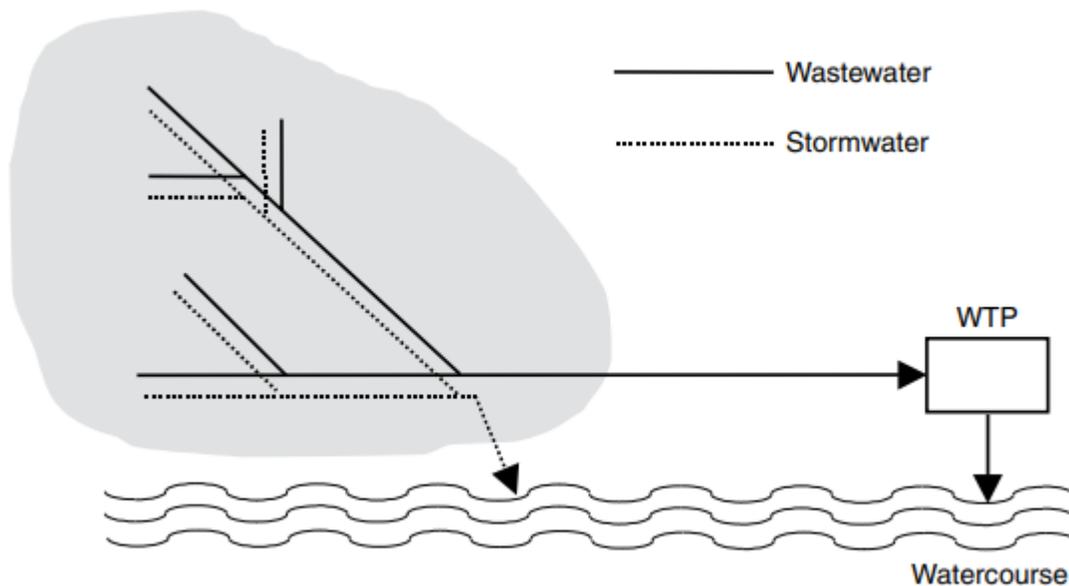


Figura 7. Esquema de sistema de alcantarillado separado. (Butler & Davies, 2011)

3.1.2. Componentes de las redes de drenaje urbano

Las redes de drenaje urbano tienen ciertos componentes que aseguran su correcto funcionamiento. Algunos de estos componentes se presentan en todos los sistemas de alcantarillado, pero otros solo se presentan cuando hay necesidad. Según Saldarriaga (2020) estos componentes son estructuras de captación, de conducción, de inspección y conexión, de regulación y alivio y de bombeo.

3.1.2.1. Estructuras de captación

Las estructuras de captación se encargan de conducir el agua lluvia que cae en una superficie impermeable al sistema de alcantarillado. El agua residual que es producida en los asentamientos es conducida por medio de tuberías al sistema de alcantarillado. Algunos de estos componentes son los sumideros, canaletas y bajantes.

3.1.2.2. Estructuras de conducción

Las estructuras de conducción son todas las estructuras por las cuales fluye el agua. Su finalidad es que las aguas residuales y/o lluvias lleguen a la planta de tratamiento de agua residual. Estas estructuras son el mayor porcentaje de área de la red y su componente más importante.

3.1.2.3. Estructuras de inspección y conexión

Las estructuras de inspección y conexión son los pozos de inspección y las cámaras de caída. Según el RAS las cámaras de inspección son elementos integrales de un sistema de alcantarillado que permiten la conexión de dos o más tramos de tubería y permiten la conexión con las superficies, de manera que se pueden realizar labores de inspección y/o mantenimiento (Ministerio de Vivienda, 2016). Por otra parte, las cámaras de caída son

elementos construidos en zonas con alta pendiente, donde no se puede cumplir con las restricciones de velocidad máxima (Ministerio de Vivienda, 2016).

3.1.2.4. Estructuras de regulación y alivio

Las estructuras de regulación y alivio son estructuras que permiten el correcto funcionamiento de los sistemas de alcantarillado. Estas estructuras son sinfones invertidos, sistemas de almacenamiento temporal, aliviaderos, canales abiertos y estructuras de disipación de energía. Por ejemplo, los sinfones invertidos “son usados cuando el sistema de alcantarillado requiera atravesar un cuerpo de agua y/o evitar la interferencia con otros servicios públicos” (Ministerio de Vivienda, 2016). Los canales abiertos son estructuras de conducción de agua que tienen diferentes características a las estructuras de conducción cerradas como su menor costos de construcción, facilidad en su mantenimiento y pueden usar la cabeza hidráulica más eficiente (Butler & Davies, 2011). Por otra parte, los aliviaderos de alcantarillados combinados permiten una disminución en los costos de construcción de las estructuras de conducción, disminuyendo el caudal que fluye por las estructuras de conducción (Ministerio de Vivienda, 2016).

3.1.2.5. Estructuras de bombeo

Las estructuras de bombeo son todos los sistemas relacionados con los pozos de bombeo. Es necesario realizar estas estructuras cuando la conducción del agua no se puede dar solamente por medio de la gravedad. Según Butler & Davies (2011) los sistemas de alcantarillado que usan la gravedad requieren de poco mantenimiento, mientras que los sistemas de alcantarillado que requieren bombeo van a necesitar de más mantenimiento. Las estructuras de bombeo solo deben usadas cuando sea necesario, por las exigencias en el mantenimiento que conllevan y por el incremento de costos de operación y construcción que pueden significar.

3.2. Diseño de redes de drenaje urbano

3.2.1. Tipos de flujo

Cuando se va a realizar un diseño de alcantarillado es necesario suponer un tipo de flujo que sea lo mas cercano a la realidad para poder representar de la forma correcta como se comportara el sistema de alcantarillado. Los tipos de flujo se clasifican de acuerdo con su variación en el tiempo y en el espacio. En la Tabla 1 se presentan las diferentes clasificaciones de tipos de flujo.

Tabla 1. Posibles clasificaciones de tipos de flujo. Adaptado de Saldarriaga (2020)

	Flujo Permanente	Flujo no-permanente
Flujo Uniforme	Flujo Uniforme – Permanente	Flujo uniforme – No permanente
Flujo Variable	Flujo Variado – Permanente	Flujo variado – No permanente

Según Saldarriaga (2020) existen cuatro diferentes clasificaciones del flujo en los sistemas de alcantarillado. La primera es el Flujo Uniforme – Permanente, también llamado Flujo Permanente. Este flujo es el que se presenta usualmente en los sistemas de alcantarillado, es

constante en el tiempo y respecto a la distancia recorrida. El segundo tipo de flujo es el flujo Uniforme – No Permanente, este flujo se da cuando hay variación a lo largo del tiempo, pero no a lo largo del espacio. También es llamado Flujo No Permanente. El tercer tipo de flujo es el flujo que varía a lo largo de la distancia, pero no a lo largo del tiempo, este flujo es el Flujo Variado – Permanente, también conocido como Flujo Variado. El ultimo tipo de flujo es el Flujo Variado – No permanente, este flujo no se da en la naturaleza por lo que no es tenido en cuenta para el diseño de alcantarillados.

3.2.2. Características geométricas de las tuberías

A continuación, se presentan las ecuaciones que son usadas para el diseño de alcantarillados asumiendo que la tubería es circular.

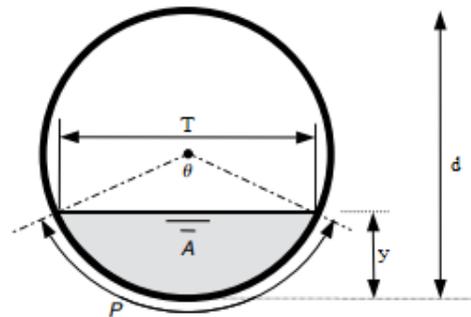


Figura 8. Elementos geométricos de una tubería parcialmente llena. Adaptado de Butler (2020)

Las ecuaciones de que describen la geometría de la tubería parcialmente son función de la lámina de agua (y), y el diámetro de la tubería (d).

- Angulo θ :

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

Ecuación 1. Angulo θ

- Área mojada:

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

Ecuación 2. Área mojada

- Perímetro mojado:

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

Ecuación 3. Perímetro mojado

- Radio hidráulico:

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

Ecuación 4. Radio hidráulico

- Ancho de la superficie:

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

Ecuación 5. Ancho de la superficie

- Profundidad hidráulica:

$$D = \frac{A}{T} = \frac{d(\theta - \text{sen}(\theta))}{8 \text{sen} \left(\frac{\theta}{2} \right)}$$

Ecuación 6. Profundidad hidráulica

Ahora bien, también existen ecuaciones para describir las características del flujo dentro de la tubería. Estas son las siguientes:

- Numero de Froude:

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

Ecuación 7. Número de Froude

- Numero de Reynolds:

$$Re = \frac{4\rho vA}{\mu P}$$

Ecuación 8. Número de Reynolds

- Esfuerzo cortante:

$$\tau_0 = \rho gRS$$

Ecuación 9. Esfuerzo Cortante

3.2.3. Calculo de velocidad

En esta sección se presentan las ecuaciones que son usadas para calcular la velocidad del flujo en las tuberías.

- Ecuación de Manning:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Ecuación 10. Ecuación de Manning

- Ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{ks}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Ecuación 11. Ecuación de Colebrook-White

- Ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L v^2}{d 2g}$$

Ecuación 12. Ecuación de Darcy-Weisbach

- Ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con ecuación de Colebrook-White:

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

Ecuación 13. Ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con Colebrook-White

3.2.4. Cálculo de potencia

Para este proyecto de grado también es necesario hacer claridad de cómo se calcula la potencia hidráulica. En este caso se usará la siguiente ecuación:

$$P = \rho g Q h$$

Ecuación 14. Ecuación para el cálculo de la potencia

$$P = \text{Potencia hidráulica [W]}$$

$$\rho = \text{viscosidad dinámica del agua} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$g = \text{gravedad} \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$Q = \text{Caudal que va a ser bombeado} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$h = \text{altura que el fluido será bombeado [m]}$$

3.2.5. Restricciones hidráulicas normativas

Para asegurarse del correcto funcionamiento de los sistemas de alcantarillado se imponen ciertas restricciones al diseño de estos sistemas. En general, las restricciones de estos sistemas son para asegurar una capacidad de autolimpieza y capacidad hidráulica de todas las estructuras involucradas en el funcionamiento de los alcantarillados. En primer lugar, todas la tuberías y estructuras del sistema de alcantarillado deben tener características que aseguren que tienen suficiente capacidad para que fluya el caudal con el cual se diseña. La otra característica que deben tener los sistemas de alcantarillado es capacidad de autolimpieza, esta capacidad se debe asegurar para que no ocurran represamientos o daños en las tuberías que generen problemas de salud pública.

- Diámetro mínimo: El diámetro mínimo es una restricción que intenta asegurar que no haya taponamiento en las tuberías debido a residuos de tamaño muy grande que entren al sistema.

- Velocidad mínima: La velocidad mínima es una de las restricciones que asegura que el sistema de alcantarillado tenga capacidad de autolimpieza.
- Velocidad máxima: La restricción de velocidad máxima es para evitar problemas de socavación en las tuberías.
- Relación de llenado máxima: La relación de llenado máxima existe para evitar problemas de socavación en la tubería que puedan ser causados por materiales sólidos que entren a los sistemas de alcantarillado y para asegurar que la tubería no tenga problemas en caso de que se presenten resaltos hidráulicos.
- Profundidad mínima a cota clave de tubería: La profundidad mínima se exige para que no haya daños estructurales a los sistemas de alcantarillados generados por los esfuerzos en la superficie del terreno.
- Profundidad máxima a cota clave de tubería: La profundidad mínima es una restricción que existe para asegurar la viabilidad económica de la construcción del sistema de alcantarillado.
- Esfuerzo cortante mínimo: Al igual que la restricción de velocidad mínima, esta restricción existe para asegurar que las tuberías tengan capacidad de autolimpieza.

4. Metodología

4.1. Datos de Entrada

La finalidad del diseño de una serie de tuberías de alcantarillado es minimizar el costo total de la construcción cumpliendo con todas las restricciones impuestas. Para solucionar este problema Duque (2015) propone que el la serie de tuberías sea modelada como un grafo, en donde:

- Los nodos representan la combinación de cota de batea a la cual se puede encontrar la tubería y el diámetro de esta tubería
- Los arcos representan las tuberías, es decir, son las conexiones entre nodos. En la tesis de Marú (2018) se plantea que los arcos también pueden ser cámaras de caída y este tema será tratado mas adelante.

Cada pozo de tubería será conformado por un grupo de nodos, estos nodos contarán con sus características (cota de bate y diámetro comercial). De esta manera los datos de entrada deben describir las características del terreno, las diferentes tuberías comerciales disponibles y las restricciones. Específicamente, los datos de entrada son:

- \mathcal{N} : Conjunto de nodos

$$\mathcal{N} = \{v_0, v_1, v_2, v_3, \dots, v_v\}$$

- \mathcal{N}_k : Conjunto de nodos que pertenecen al pozo $k \in P$

$$\mathcal{N}_k = \{v_1^k, v_2^k, v_3^k, \dots, v_{n_k}^k\}$$

En general, los datos de entrada para el problema son:

- δ : Diámetros comerciales
- P : Lista de pozos que conforman la serie
- Q_k : Caudal asociado a cada pozo
- k_s : Rugosidad del material de la tubería disponible
- l : longitud de cada tramo

- v : viscosidad cinemática del agua
- En que pozo puede haber una estación de bombeo

La pendiente asociada a cada arco tipo 1 se calcula a partir de la longitud de este arco y de sus nodos, de la siguiente manera:

$$s(v_i^k, v_j^{k+1}) = \frac{\nabla(v_i^k) - \nabla(v_j^{k+1})}{l}$$

4.2. Modelaje del grafo

En el modelaje propuesto cada nodo cuenta con dos características fundamentales, el primero es la cota de batea ∇ y el diámetro de la tubería δ , ambos dados en metros. Por otra parte, el grafo esta conformado por arcos (v_i^k, v_j^{k+1}) que se dan entre dos nodos y cada arco tiene una característica fundamental que es el precio de construcción de este arco según la ecuación de costo correspondiente para este arco. Al iniciar, el programa Series solo tenía un tipo de arco, los arcos tipo 1, estos arcos correspondían a las conexiones entre pozos hechas por tuberías de manera convencional. Estos arcos debían cumplir las restricciones hidráulicas que fueran impuestas al problema.

- \mathcal{A} : Conjunto de arcos
- $\mathcal{A}_1: \{(v_i^k, v_j^{k+1}) | v_i^k \in \mathcal{N}_k, v_j^{k+1} \in \mathcal{N}_{k+1}\}$
- $c_1(v_i^k, v_j^{k+1})$: Costo del arco $(v_i^k, v_j^{k+1}) \in \mathcal{A}$

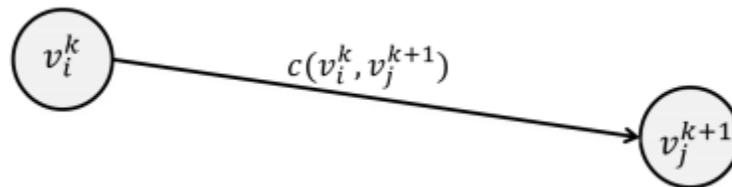


Figura 9. Representación de un arco tipo 1 en la metodología propuesta

4.2.1. Modelaje del grafo incluyendo cámaras de caída

En la tesis de maestría de Marú (2018) se le adiciono a Series la capacidad de diseñar cámaras de caída, lo cual permitía el diseño de la serie de tuberías de alcantarillado en terreno de alta pendiente. Para esto se genera un nuevo tipo de arco en el grafo, los arcos tipo 2. Estos arcos se darán en el mismo arco de un nodo con cota de mayor altura a un nodo con cota de menor altura y con mismo diámetro, además de esto se calculará el costo de este tipo de arco con una ecuación de costo diferente a la de los arcos tipo 1, que será explicada mas adelante.

- \mathcal{A}_2 : Conjunto de arcos tipo 2. $\{(v_i^{k+1}, v_i^{k+1})\}$
- $c_2(v_i^{k+1}, v_i^{k+1})$: Costo del arco tipo 2. (v_i^{k+1}, v_i^{k+1})

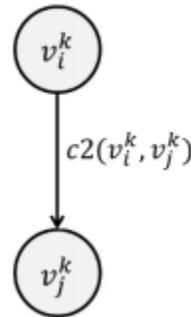


Figura 10. Representación de un arco tipo 2 en la metodología propuesta

4.2.2. Modelaje del grado incluyendo estaciones de bombeo

En este proyecto de grado se le añadió otra capacidad a Series, la cual consiste en el diseño de estaciones de bombeo. Para esto se propone la creación de un nuevo tipo de arco, el cual estará dado por dos nodos del mismo pozo, el nodo inicial se encontrará en una cota menor y el nodo final se encontrará en una cota mayor al nodo inicial. Este tipo de arco propuesto es el arco tipo 3.

\mathcal{A}_3 : Conjunto de arcos tipo 3. $\{(v_i^{k+1}, v_i^{k+1})\}$
 $c_3(v_i^{k+1}, v_i^{k+1})$: Costo del arco tipo 3. (v_i^{k+1}, v_i^{k+1})

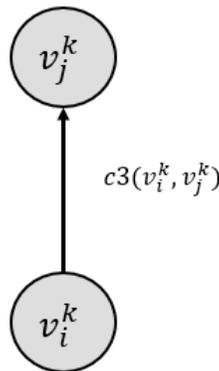


Figura 11. Representación de un arco tipo 3 en la metodología propuesta

4.3. Variable de decisión

Las variables de decisión son los arcos (tipo 1, 2 y 3), los cuales son variables binarias que toman el valor de 1 si el arco pertenece al camino de la ruta mas corta o toma 0 en caso contrario. Escoger un arco tipo 1 significa escoger un diámetro y una pendiente de diseño; escoger un arco tipo 2 significa la creación de una cámara de caída; escoger un arco tipo 3 significa la creación de un arco de bombeo con sus respectivas características.

$$x_{ij} \in \{0,1\} \forall v_i \in N, v_j \in N$$

4.4. Función Objetivo

La función objetivo es la función de costo que representa de manera adecuada todas las características de los nodos y arcos que puedan influir en el costo de construcción y

operación. El programa busca minimizar esta ecuación de costo de manera que encuentra el diseño hidráulico que tiene menor costo.

El modelador tiene la capacidad de modificar la ecuación de costo que es usada en programa de series, en esta sección se discutirán las funciones de costo que fueron usadas para generar los resultados que se presentan en la sección 295 y en el caso de la ecuación de cámaras de caída, esta fue propuesta por Marú (2018).

4.4.1. Función objetivo previamente usada

La función objetivo que tenía el programa Series previamente a las modificaciones realizadas en este proyecto de grado estaba compuesta por dos partes. La primera parte describía la función de costo de los arcos tipo 1, es decir, de los tramos de tubería entre pozos. La ecuación de costo que fue usada, es la ecuación que propone Maurer (2013) en “Quantifying costs and lengths of urban drainage systems with a simple static sewer infrastructure model”, para cuantificar el costo de tramos de alcantarillado que se encuentran debajo de calles.

$$C_1 = (0.11 * 10^{-3} * d + 127) * h_{prom} + (1.2 * 10^{-3} * d - 35)$$

Ecuación 15. Costo de construcción de sistemas de alcantarillado de Maurer et al (2013)

En donde C_1 es el costo por tramo dado en $\frac{USD}{m}$, d es el diámetro de la tubería en metros y h_{prom} es la profundidad promedio de la tubería. El valor de C es multiplicado por la longitud de la tubería para determinar el valor final de ese tramo de alcantarillado.

Para los arcos tipo 2, es decir, las cámaras de caída, Marú determino una ecuación que se ajustaba a los costos de unos diseños realizados por ella misma, a partir de la ecuación de Peinado (2014). Esta ecuación es:

$$C_2 = 289.14 * H^{1.3}$$

Ecuación 16. Ecuación cámaras de caída de Marú (2018)

En donde C_2 es el costo de la cámara de caída [USD] y H es la altura de la cámara de caída. La suma de estas dos ecuaciones es la función objetivo usada anteriormente en el programa de Series.

4.4.2. Función objetivo incluyendo estaciones de bombeo

Ahora bien, estas dos ecuaciones no pueden ser usadas para representar el costo de las estaciones de bombeo. Para representar los costos de los arcos tipo 3, es decir, las estaciones de bombeo se usan la ecuación que propone Cabral et al (2018) en “Statistical modelling of wastewater pumping stations costs” y se propone un cálculo de los costos operacionales de la estación de bombeo a lo largo de 4 años. La ecuación que propone Cabral et al (2018) para estimar los costos totales de construcción de una estación de bombeo de aguas residuales es:

$$C_{3_1} = e^{4.3184} * P^{0.5329}$$

Ecuación 17. Ecuación de costo para estaciones de bombeo propuesta por Cabral et al (2018)

Este costo se encuentra en miles de dólares por lo que con se usa un factor de 1.2 para convertirlo en dólares y se hace la conversión a dólares de la siguiente manera:

$$C_{3c} = e^{4.3184} * P^{0.5329} * 1000 \frac{\text{€}}{\text{k€}} * 1.2 \frac{\text{USD}}{\text{€}}$$

Ecuación 18. Ecuación de costos utilizada en Series para el costo de construcción de estaciones de bombeo

En donde P es la potencia total en kW , y el costo esta dado en USD . Ahora bien, también es necesario representar los costos operacionales de la estación de bombeo bomba, por lo que se eligió un representar los costos operacionales por 4 años. Se uso la siguiente expresión para representar los costos operacionales:

$$C_{3o} = \left(\frac{1}{\eta}\right) * C_{energia} * t * f_{operacional} * P$$

Ecuación 19. Ecuación de costo de operación de las estaciones de bombeo

En donde C_{3o} es el costo operacional de la estación de bombeo por el tiempo que se indique, η es un factor que representa la eficiencia a la cual la bomba opera $[-]$, $C_{energia}$ es el costo de la energía el cual se seleccionó como $15.3 \frac{USD}{kW * h}$ de acuerdo con la UPME (2019), t es el tiempo que va a operar la bomba, que como fue mencionado anteriormente son 4 años y por ultimo $f_{operacional}$ que es un factor que representa cuanto tiempo operará la bomba en el día, pues usualmente la operación de estas bombas no ocurre de manera continua. Se asume η como 0.8 y $f_{operacional}$ como 0.8, por lo que la ecuación que se usará en Series es:

$$C_{3o} = \left(\frac{1}{0.8}\right) * 15.3 \frac{USD}{kW * h} * (35040 h) * 0.8 * P$$

Ecuación 20. Ecuación de costos utilizada en Series para el costo de operación de estaciones de bombeo

De manera que la ecuación que representa el costo total de las series de alcantarillado es la suma de los costos de los arcos

$$C_T = \sum C_{1i} + C_{2i} + C_{3c_i} + C_{3o_i}$$

Ecuación 21. Costo total de las series de alcantarillado

4.5. Restricciones

Como fue mencionado anteriormente en el diseño de series y sistemas de alcantarillado se usan restricciones hidráulicas para asegurar el correcto funcionamiento de estos sistemas. En esta sección se cubren las restricciones que se usaron en el diseño de las Series que son presentadas en la sección 5. Además de las restricciones hidráulicas se presentan las restricciones que son impuestas para la creación de arcos en el programa. Las restricciones de construcción que se proponen son para representar de mejor manera la realidad del diseño de series de alcantarillado.

4.5.1. Restricciones en las tuberías

Las restricciones en la tuberías, es decir, en los arcos son impuestas para que el diseño de series de alcantarillado funcione de manera correcta. Las condiciones usadas fueron:

- Relación de llenado máxima: La relación de llenado máxima es de 85% excepto para las tuberías con tamaño menor o igual a $0.6m$, que tienen una relación de llenado máxima de 70%.
- Velocidad máxima: La velocidad máxima para las tuberías de concreto es de $5 \frac{m}{s}$, la velocidad máxima para las tuberías para tuberías de PVC es de $10 \frac{m}{s}$.
- Velocidad mínima y esfuerzo cortante mínimo: Para tuberías con tamaño mayor o igual a $0.45m$, el τ_{min} es de $2Pa$ y para las tuberías de tamaño menor a $0.45m$ la velocidad mínima es $0.75 \frac{m}{s}$.
- Numero de Froude: Cuando el numero de Froude se encuentre entre 0.7 y 1.5, la relación de llenado debe ser menor a 0.7
- Profundidad de excavación mínima: 1.2m
- Profundidad de excavación máxima: 5.0m
- Lista de diámetros comerciales disponibles:

d[m]	0.2	0.25	0.3	0.35	0.38	0.4	0.45	0.5
d[m]	0.53	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.05	1.2
d[m]	1.35	1.4	1.5	1.6	1.8	2	2.2	2.4

4.5.2. Restricciones en las cámaras de caída

Las restricciones en las cámaras de caída son sobre restricciones de construcción de los arcos tipo 2.

- Altura mínima para construcción de cámara de caída: $0.5m$

4.5.3. Restricciones en las estaciones de bombeo

En los arcos tipo 3, es decir, las estaciones de bombeo tendrán las siguientes restricciones

- Altura mínima de bombeo = $3m$
- Altura máxima de bombeo = $15m$
- El arco de entrada anterior debe ser un arco tipo 1
- El caudal de bombeo es el caudal aguas arriba de donde ocurre el bombeo
- Delta de creación de estaciones de bombeo: $20cm$. Este delta hace referencia a cada cuanto se están creando los arcos tipo 3, que en este caso serán creados cada $20cm$ para disminuir el costo computacional de la metodología.

4.6. Representación serie de tuberías de alcantarillado mediante grafo

En la Figura 12 se presenta la representación de el grafo de diseño hidráulico de dos pozos de inspección en los que se encuentra disponible solo una altura pero tres diámetros diferentes para el diseño.

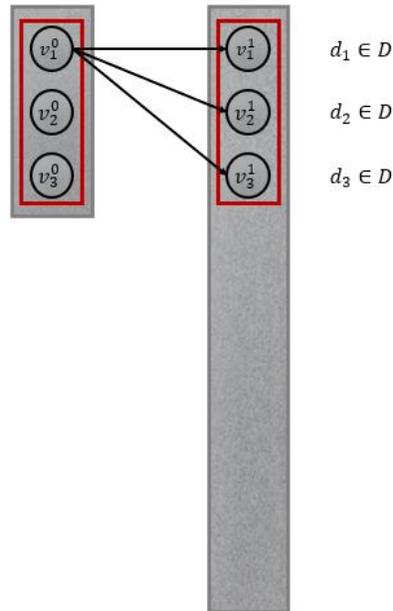


Figura 12. Representación arcos tipo 1 para el primer nodo de pozo i a pozo j

En la Figura 13 se presenta la representación para los arcos tipo 1 en el caso de dos pozos, en el pozo 0 solo se encuentra una altura disponible pero hay tres diámetros disponibles, en cambio en el pozo 2 se encuentran tres cotas disponibles y tres diámetros disponibles. Se puede apreciar como el problema del diseño hidráulico empieza a aumentar su tamaño al añadir mas posibilidades en el grafo.

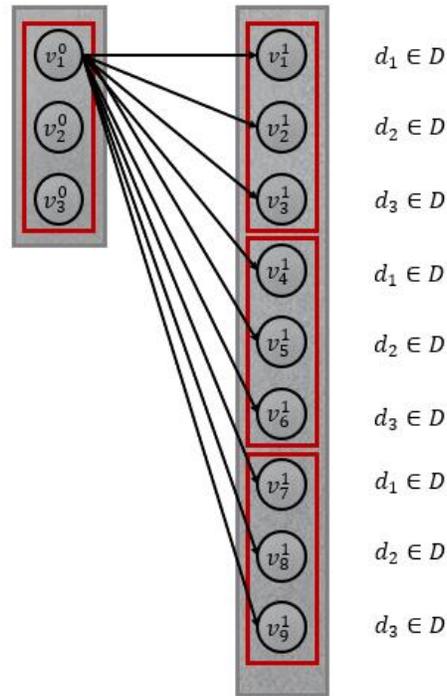


Figura 13. Representación arcos tipo 1, dos pozos con tres diámetros disponibles y tres cotas de batea en el pozo 1

En la Figura 14 se presenta el grafo para tres pozos de inspección, en el primer pozo solo hay una altura disponible y tres diámetros de diseño, pero para los otros pozos hay tres cotas disponibles y tres diámetros para realizar el diseño. En estas figuras solo se presentan la representación de los arcos tipo 1.

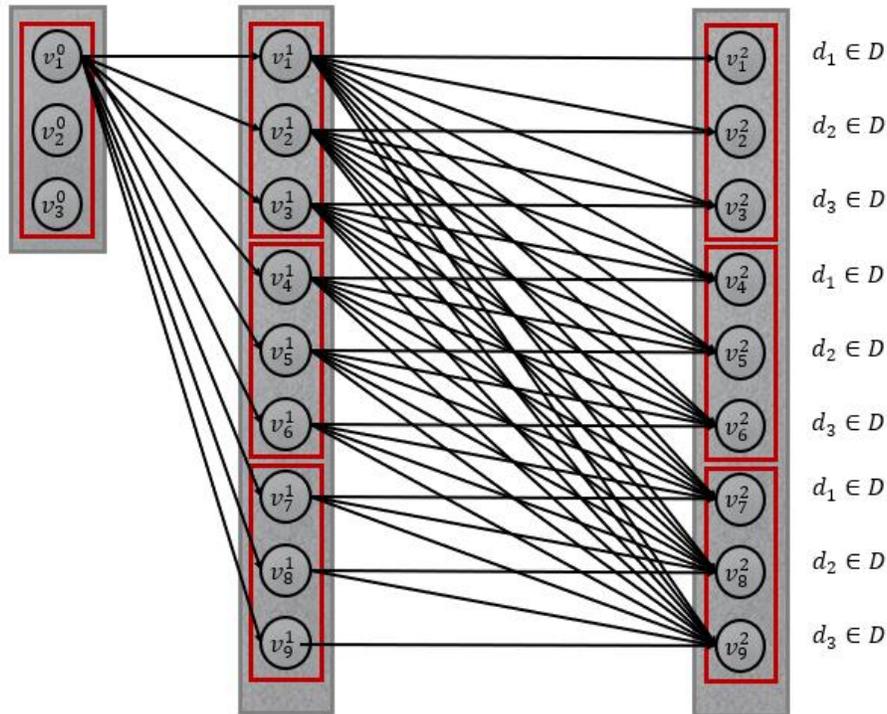


Figura 14. Representación arcos tipo 1, tres nodos de igual profundidad y diferente diámetro en el pozo i y pozo k.

Ahora bien, la representación para los arcos tipo 3 se presenta en la Figura 15. En esta figura hay tres cotas y tres diámetros disponibles en el pozo 1. Se puede observar como los arcos van de una cota con menor altura a una cota con mayor altura

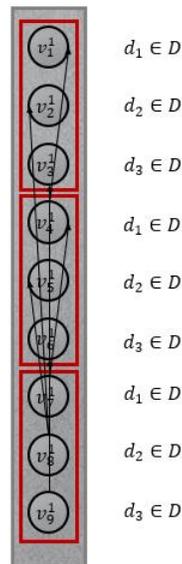


Figura 15. Representación arcos tipo 3, tres nodos de igual profundidad y diferente diámetro en el pozo j

Ahora bien, la creación de arcos tipo 3 y tipo 1 se puede observar en la Figura 16. En esta serie ya se representan los arcos tipo 3 y en la Figura 17 se puede visualizar como sería una solución en el grafo con los arcos tipo 3 incluidos.

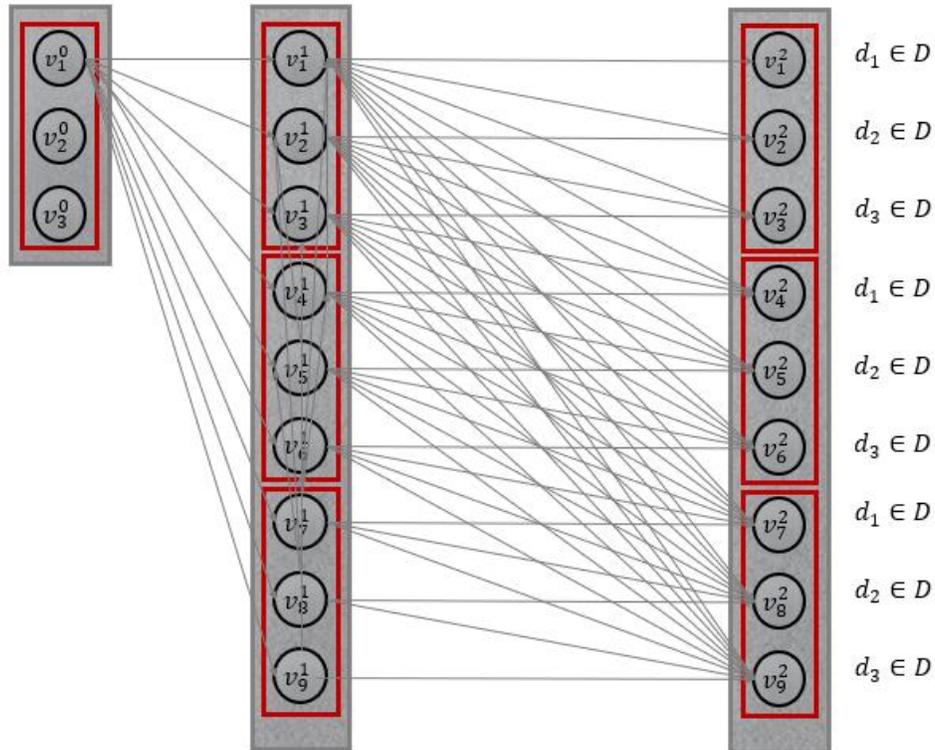


Figura 16. Representación arcos tipo 1 y 3, tres nodos de igual profundidad y diferente diámetro en el pozo i y pozo k.

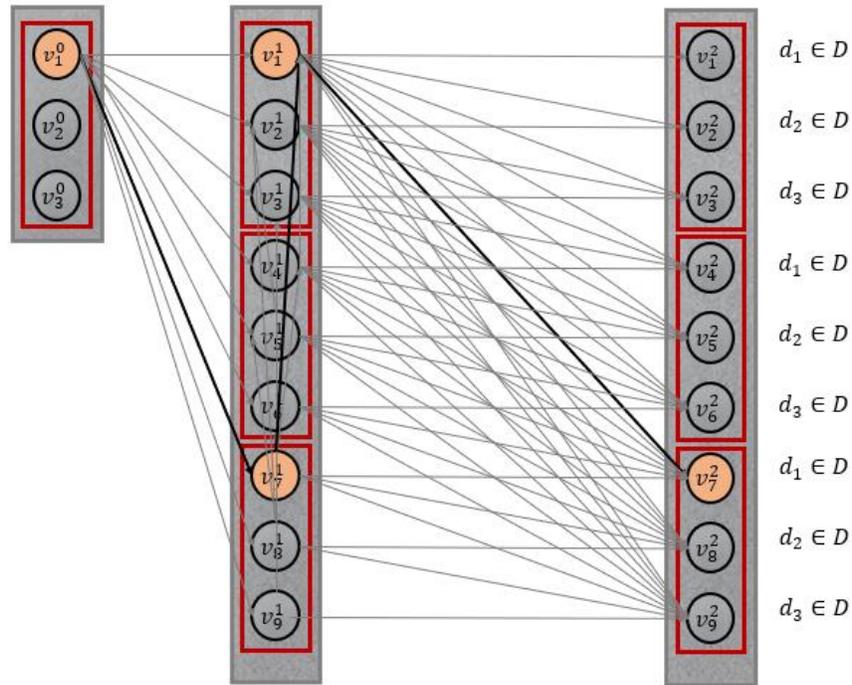


Figura 17. Representación arcos tipo 1 y 3, para una solución.

5. Resultados y análisis de resultados

Se uso la ecuación de Darcy-Weisbach para el cálculo de velocidad, una precisión al decímetro, y el material de las tubería fue concreto para determinar las siguientes series de alcantarillado.

5.1. Series de 10 tramos

5.1.1. Serie de $L = 400\text{m}$, $S = 0$, Caudal por pozo = 100 L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos

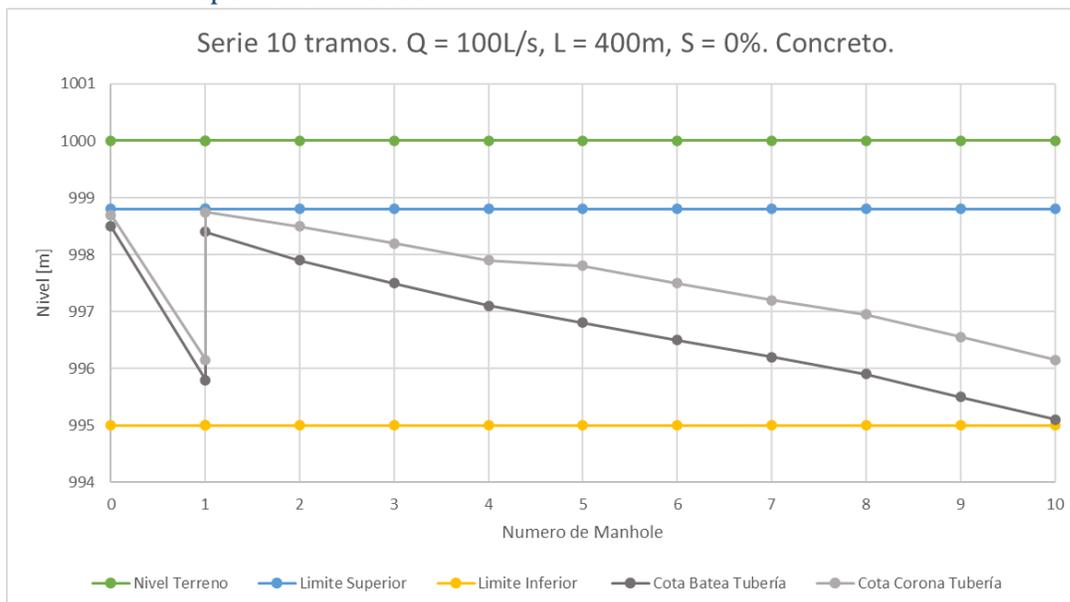


Figura 18. Figura de Serie de $L = 400\text{m}$, $S = 0$, Caudal por pozo = 100 L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos

Tabla 2. Diseño de Serie de $L = 400\text{m}$, $S = 0$, Caudal por pozo = 100 L/s , Pozos con bombeo disponible = Todos

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo[USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro [m]	yn/d [%]	Velocidad [m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altura bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 319,500.00	998.5	0.675%	0.2	0.604	1.65	6.46	1.25	100	-	-
1	3	\$ 1,515,774.59	995.8	-	-	-	-	-	-	-	2.60	2.55
	1	\$ 370,500.00	998.4	0.125%	0.35	0.665	1.00	2.14	0.54	200	-	-
2	1	\$ 452,560.00	997.9	0.100%	0.6	0.726	1.00	2.06	0.46	300	-	-
3	1	\$ 533,400.00	997.5	0.100%	0.7	0.691	1.08	2.31	0.49	400	-	-
4	1	\$ 660,340.00	997.1	0.075%	0.8	0.594	1.03	2.03	0.47	500	-	-
5	1	\$ 688,780.00	996.8	0.075%	1	0.675	1.06	2.15	0.44	600	-	-
6	1	\$ 717,220.00	996.5	0.075%	1	0.764	1.09	2.23	0.40	700	-	-
7	1	\$ 771,300.00	996.2	0.075%	1	0.768	1.12	2.34	0.40	800	-	-
8	1	\$ 805,250.00	995.9	0.100%	1.05	0.749	1.29	3.11	0.47	900	-	-
9	1	\$ 844,050.00	995.5	0.100%	1.05	0.830	1.30	3.13	0.42	1000	-	-
10	-	-	995.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		\$ 7,678,674.59										

5.1.2. Serie de L = 500m, S = 0, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

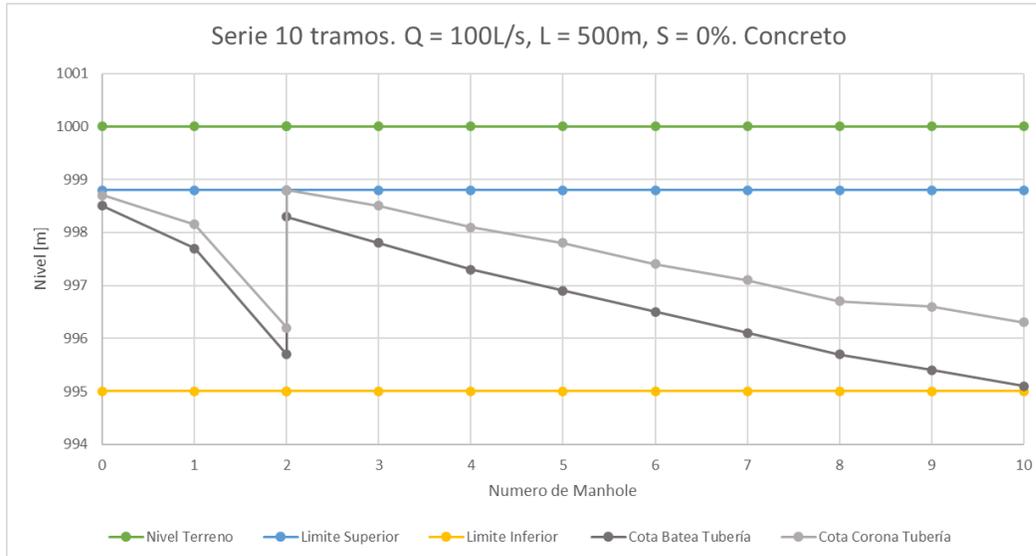


Figura 19. Figura de Serie de L = 500m, S = 0, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Tabla 3. Diseño de Serie de L = 500m, S = 0, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo [USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro [m]	yn/d [-]	Velocidad [m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altura bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 380,462.50	998.5	0.160%	0.2	0.635	0.94	2.02	0.60	100	-	-
1	1	\$ 537,300.00	997.7	0.400%	0.45	0.613	1.58	5.51	0.99	200	-	-
2	3	\$ 2,949,477.50	995.7	-	-	-	-	-	-	-	2.60	5.10
	1	\$ 530,000.00	998.3	0.100%	0.5	0.726	1.00	2.06	0.46	300	-	-
3	1	\$ 639,875.00	997.8	0.100%	0.7	0.691	1.08	2.31	0.49	400	-	-
4	1	\$ 748,500.00	997.3	0.080%	0.8	0.707	1.04	2.10	0.43	500	-	-
5	1	\$ 793,700.00	996.9	0.080%	0.9	0.837	1.06	2.15	0.36	600	-	-
6	1	\$ 902,450.00	996.5	0.080%	0.9	0.742	1.12	2.36	0.42	700	-	-
7	1	\$ 949,850.00	996.1	0.080%	1	0.849	1.12	2.38	0.36	800	-	-
8	1	\$ 1,123,375.00	995.7	0.060%	1	0.697	1.07	2.09	0.39	900	-	-
9	1	\$ 1,162,225.00	995.4	0.060%	1.2	0.760	1.08	2.14	0.37	1000	-	-
10	-	-	995.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		\$ 10,717,215.00										

5.1.3. Serie de L = 1000m, S = 0, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

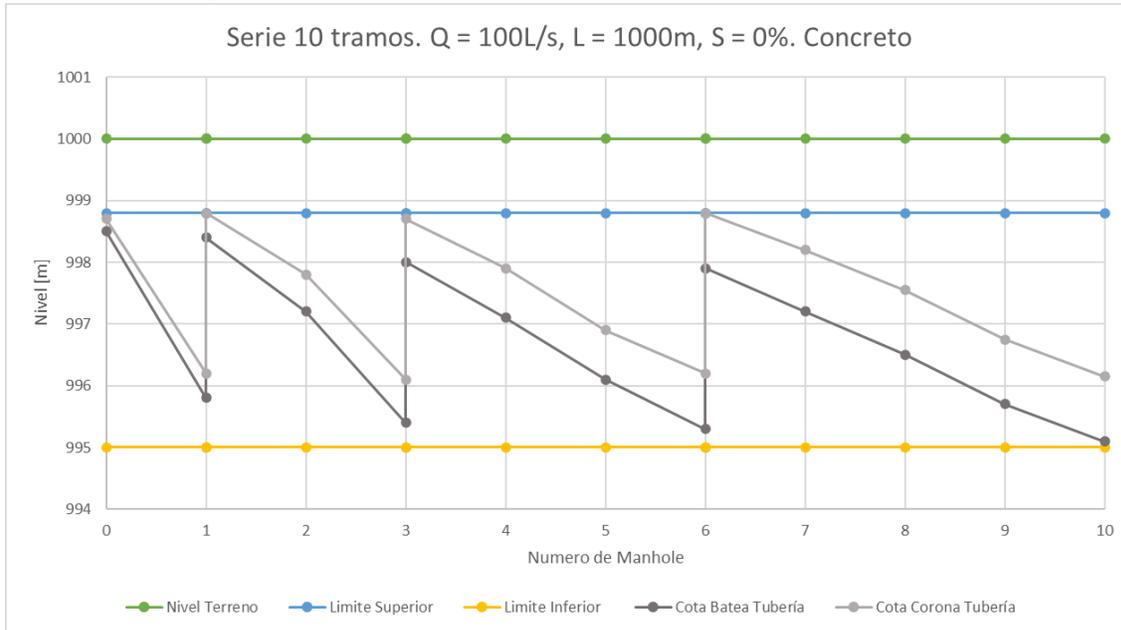


Figura 20. Figura de Serie de L = 1000m, S = 0, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Tabla 4. Diseño de Serie de L = 1000m, S = 0, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo[USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro [m]	yn/d [%]	Velocidad [m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altura bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 863,950.00	998.5	0.270%	0.2	0.654	1.15	3.06	0.77	100	-	-
1	3	\$ 1,515,774.59	995.8	-	-	-	-	-	-	-	2.60	2.55
	1	\$ 993,800.00	998.4	0.120%	0.4	0.675	0.99	2.07	0.52	200	-	-
2	1	\$ 1,417,000.00	997.2	0.180%	0.6	0.585	1.28	3.39	0.70	300	-	-
3	3	\$ 4,368,659.80	995.4	-	-	-	-	-	-	-	2.60	7.65
	1	\$ 1,279,750.00	998	0.090%	0.7	0.721	1.03	2.11	0.45	400	-	-
4	1	\$ 1,484,000.00	997.1	0.100%	0.8	0.850	1.10	2.38	0.39	499	-	-
5	1	\$ 1,813,400.00	996.1	0.080%	0.8	0.837	1.06	2.15	0.36	600	-	-
6	3	\$ 8,589,935.32	995.3	-	-	-	-	-	-	-	2.60	15.30
	1	\$ 1,508,650.00	997.9	0.070%	0.9	0.790	1.05	2.09	0.37	700	-	-
7	1	\$ 1,734,250.00	997.2	0.070%	1	0.794	1.08	2.19	0.37	799	-	-
8	1	\$ 1,916,125.00	996.5	0.080%	1.05	0.839	1.16	2.50	0.37	900	-	-
9	1	\$ 2,285,600.00	995.7	0.060%	1.05	0.760	1.08	2.14	0.37	1000	-	-
10	N/A	-	995.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		\$ 29,770,894.71										

5.1.4. Serie de L = 300m, S = 0, Caudal por pozo = 1000L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

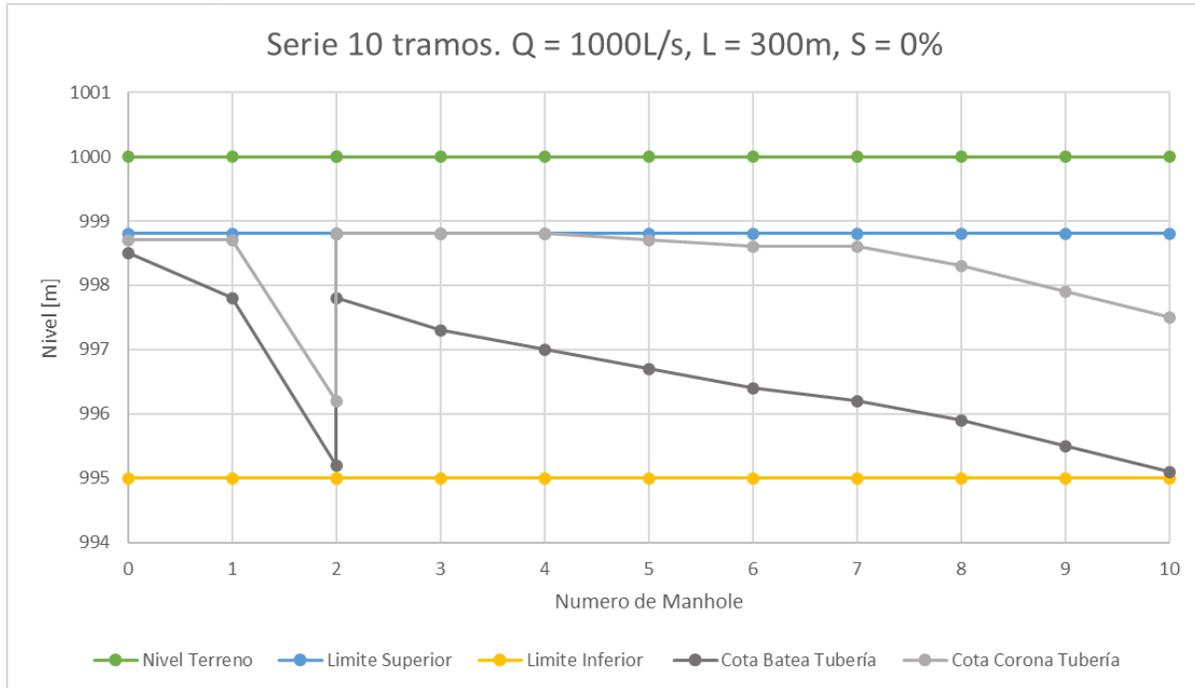


Figura 21. Figura de Serie de L = 300m, S = 0, Caudal por pozo = 1000L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Tabla 5. Diseño de Serie de L = 300m, S = 0, Caudal por pozo = 1000L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo [USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro [m]	yn/d [%]	Velocidad [m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altura bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 377,910.00	998.5	0.233%	0.2	0.805	1.82	6.27	0.66	1000	-	-
1	1	\$ 527,250.00	997.8	0.867%	0.9	0.657	3.66	24.60	1.54	2000	-	-
2	3	\$ 28,080,391.55	995.2	-	-	-	-	-	-	-	2.6	51.01
	1	\$ 612,720.00	997.8	0.167%	1	0.757	2.09	7.41	0.63	3000	-	-
3	1	\$ 739,875.00	997.3	0.100%	1.5	0.811	1.81	5.37	0.46	4000	-	-
4	1	\$ 829,215.00	997	0.100%	1.8	0.771	1.92	5.95	0.49	5000	-	-
5	1	\$ 919,875.00	996.7	0.100%	2	0.728	2.02	6.47	0.53	6000	-	-
6	1	\$ 1,005,990.00	996.4	0.067%	2.2	0.825	1.75	4.78	0.38	7000	-	-
7	1	\$ 1,035,315.00	996.2	0.100%	2.4	0.767	2.15	7.13	0.51	8000	-	-
8	1	\$ 1,076,370.00	995.9	0.133%	2.4	0.749	2.48	9.47	0.60	9000	-	-
9	1	\$ 1,123,290.00	995.5	0.133%	2.4	0.831	2.49	9.54	0.53	10000	-	-
10	-	-	995.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		\$ 36,328,201.55										

5.1.5. Serie de L = 400m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100 L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

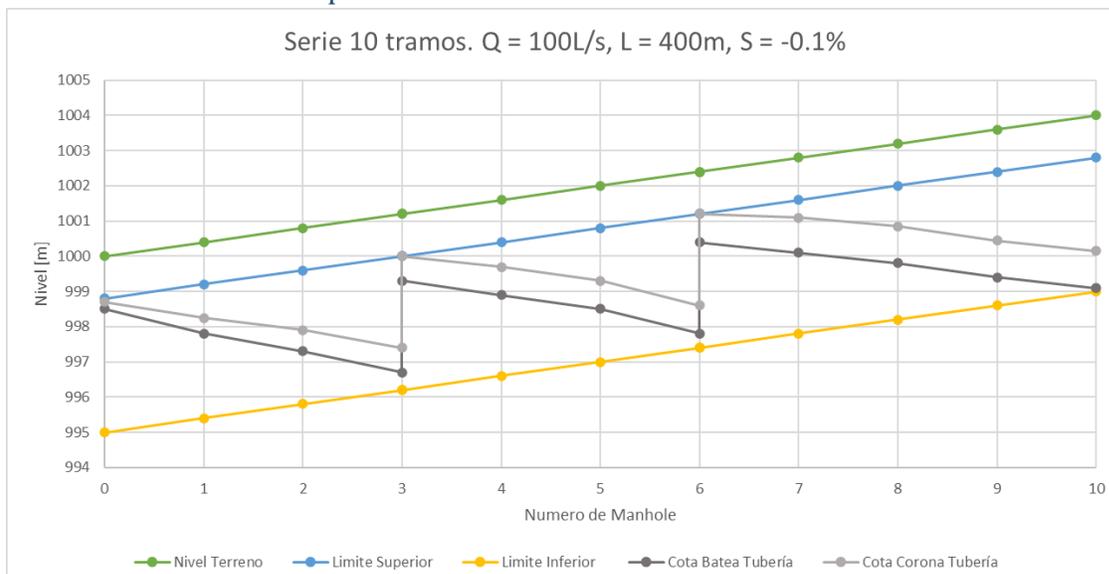


Figura 22. Figura de Serie de L = 400m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100 L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Tabla 6. Diseño de Serie de L = 400m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100 L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo[USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro [m]	yn/d [%]	Velocidad [m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altura bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 314,960.00	998.5	0.175%	0.2	0.616	0.97	2.17	0.64	100	-	-
1	1	\$ 463,140.00	997.8	0.125%	0.45	0.665	1.00	2.14	0.54	200	-	-
2	1	\$ 591,280.00	997.3	0.150%	0.6	0.623	1.19	2.91	0.62	-	-	-
3	3	\$ 4,368,659.80	996.7	-	-	-	-	-	-	300	2.6	7.652
	1	\$ 499,000.00	999.3	0.100%	0.7	0.691	1.08	2.31	0.49	400	-	-
4	1	\$ 567,800.00	998.9	0.100%	0.8	0.850	1.10	2.38	0.39	500	-	-
5	1	\$ 649,500.00	998.5	0.175%	0.8	0.763	1.46	4.16	0.60	600	-	-
6	3	\$ 8,589,935.32	997.8								2.6	15.304
	1	\$ 593,980.00	1000.4	0.075%	0.8	0.764	1.09	2.23	0.40	700	-	-
7	1	\$ 684,000.00	1000.1	0.075%	1	0.768	1.12	2.34	0.40	800	-	-
8	1	\$ 756,750.00	999.8	0.100%	1.05	0.749	1.29	3.11	0.47	900	-	-
9	1	\$ 909,060.00	999.4	0.075%	1.05	0.692	1.20	2.61	0.44	1000	-	-
10	N/A	\$ -	999.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		\$ 18,079,005.12										

5.1.6. Serie de L = 200m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

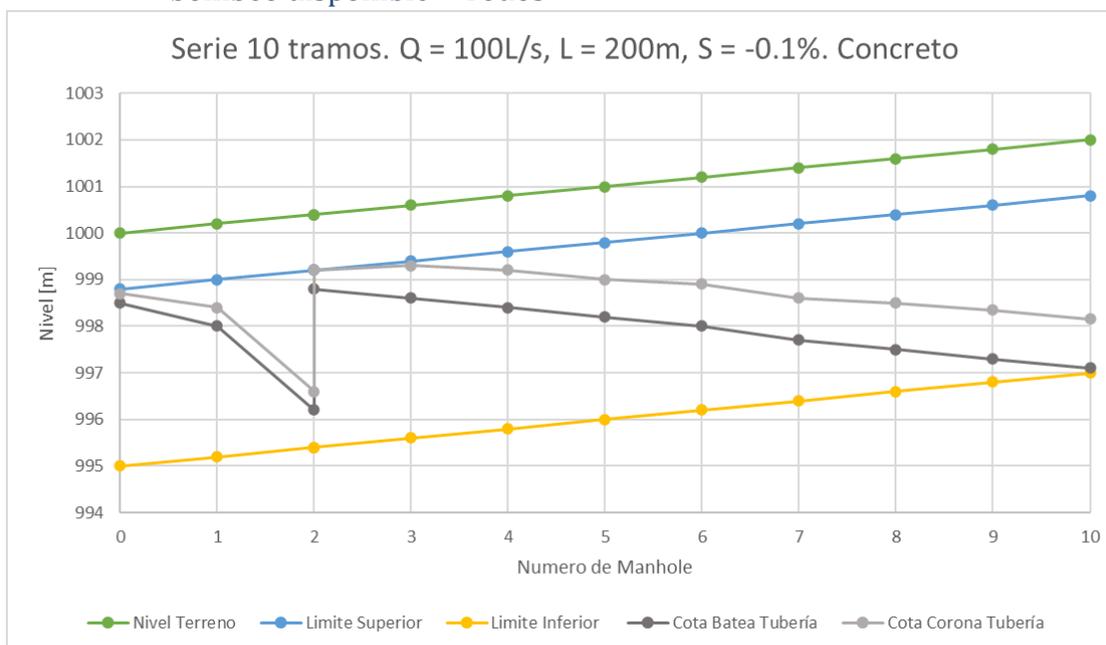


Figura 23. Figura de Serie de L = 200m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Tabla 7. Diseño de Serie de L = 200m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo[USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro [m]	yn/d [-]	Velocidad [m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altura bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 138,590.00	998.5	0.250%	0.2	0.673	1.11	2.87	0.72	100	-	-
1	1	\$ 184,760.00	998	0.900%	0.4	0.695	2.15	10.43	1.36	200	-	-
2	3	\$ 2,949,477.50	996.2		0.2		0.00	0.00	0.00	-	2.6	5.101
	1	\$ 205,880.00	998.8	0.100%	0.4	0.726	1.00	2.06	0.46	300	-	-
3	1	\$ 245,200.00	998.6	0.100%	0.7	0.691	1.08	2.31	0.49	400	-	-
4	1	\$ 262,400.00	998.4	0.100%	0.8	0.850	1.10	2.38	0.39	500	-	-
5	1	\$ 303,920.00	998.2	0.100%	0.8	0.747	1.18	2.66	0.47	600	-	-
6	1	\$ 324,260.00	998	0.150%	0.9	0.715	1.44	3.95	0.59	700	-	-
7	1	\$ 370,460.00	997.7	0.100%	0.9	0.755	1.26	2.96	0.47	800	-	-
8	1	\$ 402,625.00	997.5	0.100%	1	0.749	1.29	3.11	0.47	900	-	-
9	1	\$ 422,025.00	997.3	0.100%	1.05	0.830	1.30	3.13	0.42	1000	-	-
10	N/A	\$ -	997.1	0.000%	0	0.000	0.00	0.00	0.00	-	-	-
Total		\$ 5,809,597.50										

5.1.7. Serie de L = 100m, S = -0.5%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

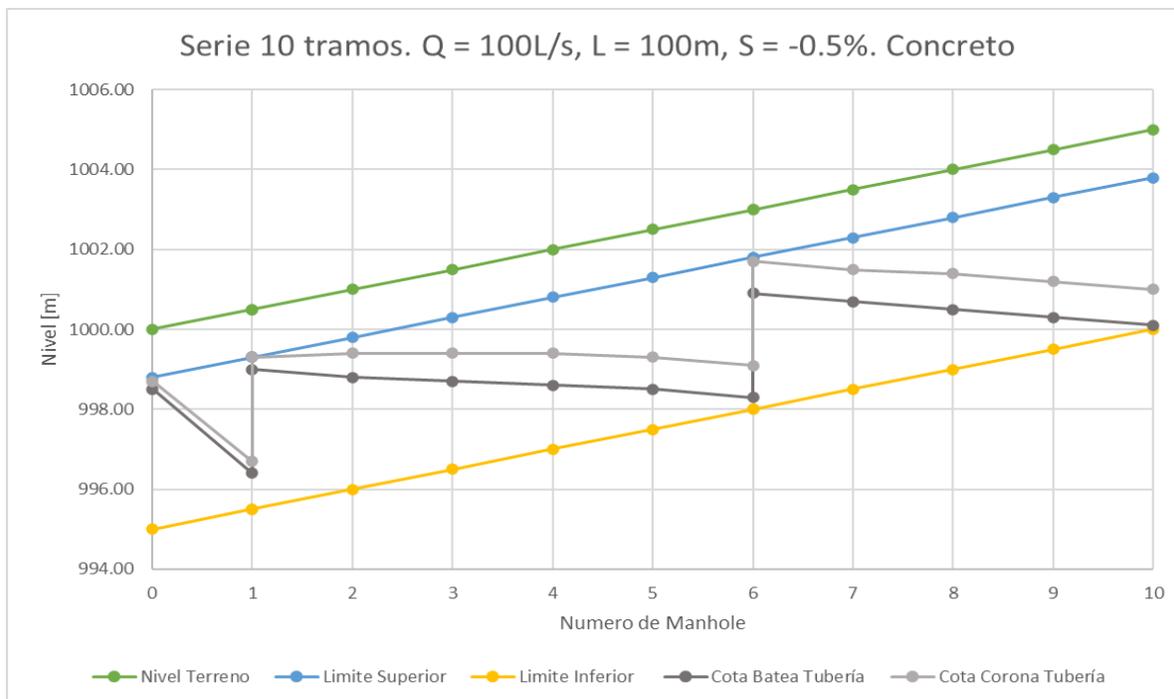


Figura 24. Figura de Serie de L = 100m, S = -0.5%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Tabla 8. Diseño de Serie de L = 100m, S = -0.5%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo[USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro [m]	yn/d [-]	Velocidad [m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altura bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 72,500.00	998.5	2.100%	0.2	0.542	2.56	16.23	2.26	100	-	-
1	3	\$ 1,515,774.59	996.4	-	-	-	-	-	-	-	2.6	2.551
	1	\$ 92,625.00	999	0.200%	0.3	0.565	1.21	3.17	0.74	201	-	-
2	1	\$ 117,220.00	998.8	0.100%	0.6	0.726	1.00	2.06	0.46	300	-	-
3	1	\$ 141,950.00	998.7	0.100%	0.7	0.691	1.08	2.31	0.49	400	-	-
4	1	\$ 154,850.00	998.6	0.100%	0.8	0.850	1.10	2.38	0.39	500	-	-
5	1	\$ 168,825.00	998.5	0.200%	0.8	0.720	1.55	4.69	0.67	600	-	-
6	3	\$ 8,589,935.32	998.3	-	-	-	-	-	-	-	2.6	15.304
	1	\$ 127,975.00	1000.9	0.200%	0.8	0.832	1.57	4.77	0.58	800	-	-
7	1	\$ 155,350.00	1000.7	0.200%	0.8	0.708	1.66	5.25	0.69	900	-	-
8	1	\$ 171,170.00	1000.5	0.200%	0.9	0.784	1.68	5.36	0.63	1000	-	-
9	1	\$ 200,635.00	1000.3	0.200%	0.9	0.680	1.76	5.76	0.72	-	-	-

10	N/A	\$ -	1000.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		\$ 11,508,809.90										

5.1.8. Serie de L = 400m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 300L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

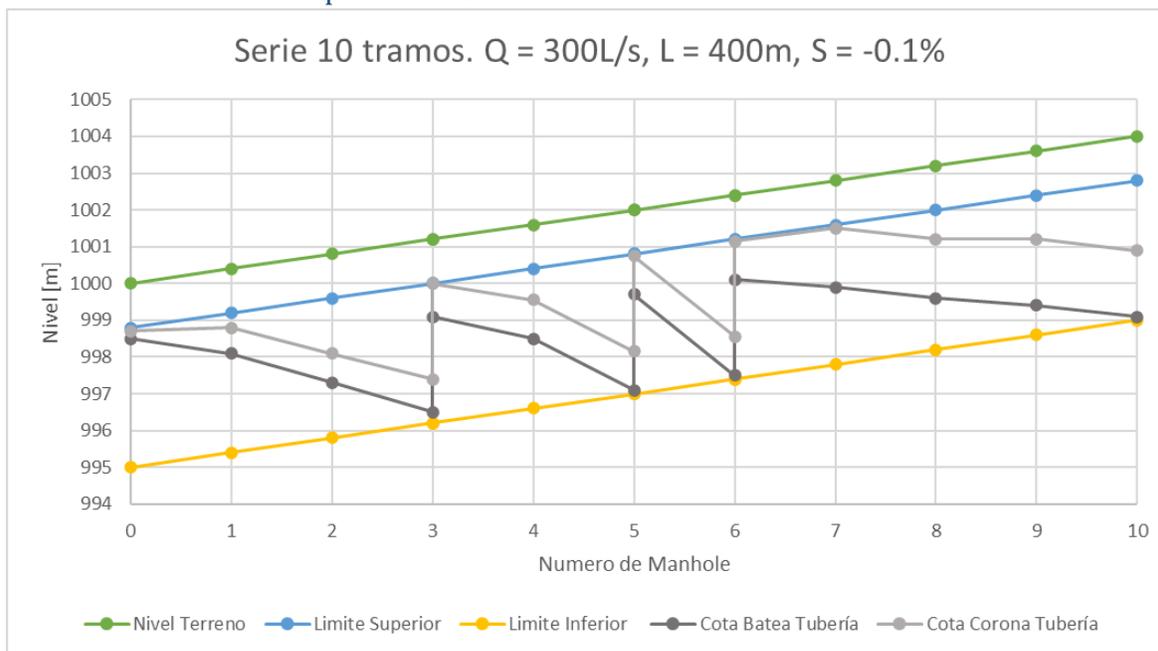


Figura 25. Figura de Serie de L = 400m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 300L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Tabla 9. Diseño de Serie de L = 400m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 300L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo[USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro[m]	yn/d [%]	Velocidad[m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altura bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 419,920.00	998.5	0.100%	0.2	0.726	1.00	2.06	0.46	300	-	-
1	1	\$ 550,600.00	998.1	0.200%	0.7	0.720	1.55	4.69	0.67	600	-	-
2	1	\$ 707,280.00	997.3	0.200%	0.8	0.784	1.68	5.36	0.63	900	-	-
3	3	\$ 12,785,134.71	996.5	-	-	-	-	-	-	-	2.6	22.955
	1	\$ 640,350.00	999.1	0.150%	0.9	0.808	1.60	4.70	0.54	1200	-	-
4	1	\$ 776,150.00	998.5	0.350%	1.05	0.678	2.40	10.56	0.96	1500	-	-
5	3	\$ 21,139,279.14	997.1	-	-	-	-	-	-	-	2.6	38.259
	1	\$ 737,350.00	999.7	0.550%	1.05	0.655	2.99	16.38	1.23	1800	-	-
6	3	\$ 25,305,596.75	997.5	-	-	-	-	-	-	-	2.6	45.911
	1	\$ 875,200.00	1000.1	0.050%	1.05	0.825	1.18	2.39	0.31	2100	-	-
7	1	\$ 953,980.00	999.9	0.075%	1.6	0.767	1.45	3.57	0.42	2400	-	-
8	1	\$ 1,123,000.00	999.6	0.050%	1.6	0.779	1.27	2.68	0.34	2700	-	-

9	1	\$ 1,207,500.00	999.4	0.075%	1.8	0.714	1.54	3.95	0.45	3000	-	-
10	N/A	\$ -	999.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		\$ 66,013,840.60										

5.1.9. Serie de L = 400m, S = 0, Caudal por pozo = 100 L/s, Pozos con bombeo disponible = 7,8,9,10

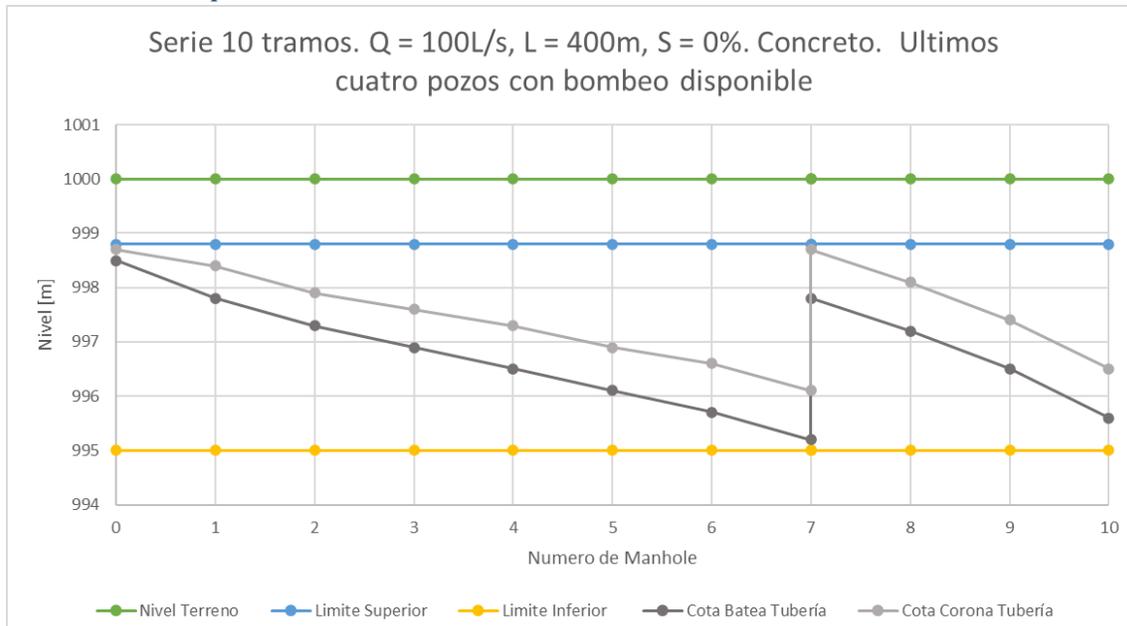


Figura 26. Figura de Serie de L = 400m, S = 0, Caudal por pozo = 100 L/s, Pozos con bombeo disponible = 7,8,9,10

Tabla 10. Diseño de Serie de L = 400m, S = 0, Caudal por pozo = 100 L/s, Pozos con bombeo disponible = 7,8,9,10

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo[USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro[m]	yn/d [-]	Velocidad [m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altua bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 300,840.00	998.5	0.175%	0.2	0.616	0.97	2.17	0.64	100	-	-
1	1	\$ 416,820.00	997.8	0.125%	0.45	0.665	1.00	2.14	0.54	199	-	-
2	1	\$ 501,520.00	997.3	0.100%	0.6	0.726	1.00	2.06	0.46	200	-	-
3	1	\$ 585,000.00	996.9	0.100%	0.7	0.691	1.08	2.31	0.49	300	-	-
4	1	\$ 619,400.00	996.5	0.100%	0.8	0.850	1.10	2.38	0.39	499	-	-
5	1	\$ 707,280.00	996.1	0.100%	0.8	0.747	1.18	2.66	0.47	500	-	-
6	1	\$ 747,960.00	995.7	0.125%	0.9	0.775	1.32	3.35	0.50	699	-	-
7	3	\$ 9,990,346.56	995.2	-	-	-	-	-	-	-	2.6	17.854
	1	\$ 562,640.00	997.8	0.150%	0.9	0.806	1.46	4.03	0.53	800	-	-

8	1	\$ 621,400.00	997.2	0.175%	0.9	0.844	1.57	4.69	0.54	900	-	-
9	1	\$ 693,720.00	996.5	0.225%	0.9	0.822	1.79	6.04	0.63	1000	-	-
10	-	-	995.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		\$ 15,746,926.56										

5.1.10. Serie de L = 200m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = 7,8,9,10

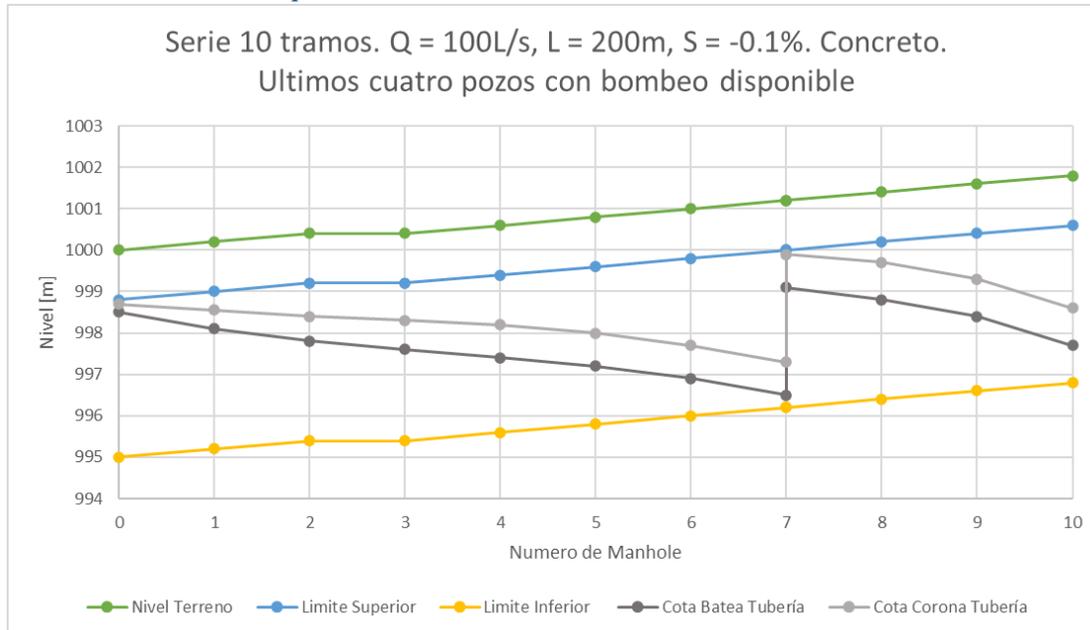


Figura 27. Figura de Serie de L = 200m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = 7,8,9,10

Tabla 11. Diseño de Serie de L = 200m, S = -0.1%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = 7,8,9,10

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo[USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro[m]	yn/d [-]	Velocidad[m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altura bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 148,655.00	998.5	0.200%	0.2	0.588	1.03	2.43	0.70	100	-	-
1	1	\$ 204,550.00	998.1	0.150%	0.45	0.622	1.08	2.50	0.61	200	-	-
2	1	\$ 246,680.00	997.8	0.100%	0.6	0.726	1.00	2.06	0.46	201	-	-
3	1	\$ 288,200.00	997.6	0.100%	0.7	0.691	1.08	2.31	0.49	300	-	-
4	1	\$ 305,400.00	997.4	0.100%	0.8	0.850	1.10	2.38	0.39	400	-	-
5	1	\$ 324,750.00	997.2	0.150%	0.8	0.825	1.35	3.58	0.51	500	-	-
6	1	\$ 348,400.00	996.9	0.200%	0.8	0.832	1.57	4.77	0.58	600	-	-
7	3	\$ 9,990,346.56	996.5	-	-	-	-	-	-	-	2.6	17.8542
7	1	\$ 283,580.00	999.1	0.150%	0.8	0.806	1.46	4.03	0.53	800	-	-
8	1	\$ 308,440.00	998.8	0.200%	0.9	0.784	1.68	5.36	0.63	900	-	-
9	1	\$ 342,340.00	998.4	0.350%	0.9	0.676	2.18	9.04	0.95	1000	-	-

10	N/A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		\$ 12,791,341.56										

5.2. Series de 20 tramos

5.2.1. Serie de L = 300m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

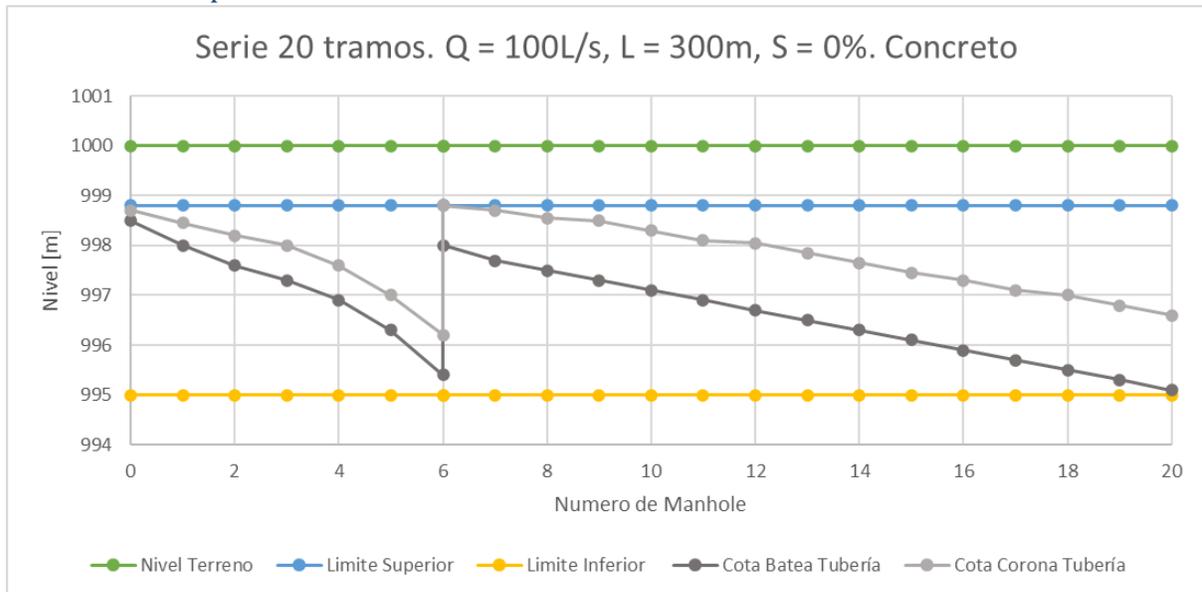


Figura 28. Figura de Serie de L = 300m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Tabla 12. Diseño de Serie de L = 300m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo[USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro [m]	yn/d [%]	Velocidad [m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altura bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 220,335.00	998.5	0.167%	0.2	0.626	0.95	2.09	0.62	100	-	-
1	1	\$ 298,140.00	998	0.133%	0.45	0.649	1.03	2.26	0.56	200	-	-
2	1	\$ 354,720.00	997.6	0.100%	0.6	0.726	1.00	2.06	0.46	300	-	-
3	1	\$ 376,140.00	997.3	0.133%	0.7	0.829	1.17	2.78	0.47	400	-	-
4	1	\$ 406,740.00	996.9	0.200%	0.7	0.846	1.44	4.17	0.55	500	-	-
5	1	\$ 493,575.00	996.3	0.300%	0.7	0.619	1.84	6.64	0.90	600	-	-
6	3	\$ 8,589,935.32	995.4	-	-	-	-	-	-	-	2.6	15.304
6	1	\$ 431,265.00	998	0.100%	0.8	0.678	1.23	2.87	0.51	700	-	-
7	1	\$ 465,712.50	997.7	0.067%	1	0.815	1.06	2.09	0.35	800	-	-
8	1	\$ 530,280.00	997.5	0.067%	1.05	0.669	1.12	2.29	0.42	900	-	-
9	1	\$ 545,820.00	997.3	0.067%	1.2	0.725	1.14	2.35	0.40	1000	-	-

10	1	\$ 561,360.00	997.1	0.067%	1.2	0.789	1.15	2.39	0.37	1100	-	-
11	1	\$ 628,402.50	996.9	0.067%	1.2	0.659	1.20	2.56	0.43	1200	-	-
12	1	\$ 644,932.50	996.7	0.067%	1.35	0.700	1.22	2.62	0.42	1300	-	-
13	1	\$ 661,462.50	996.5	0.067%	1.35	0.743	1.23	2.66	0.40	1400	-	-
14	1	\$ 677,992.50	996.3	0.067%	1.35	0.791	1.23	2.69	0.37	1500	-	-
15	1	\$ 712,680.00	996.1	0.067%	1.35	0.769	1.26	2.78	0.39	1600	-	-
16	1	\$ 729,540.00	995.9	0.067%	1.4	0.816	1.26	2.79	0.36	1700	-	-
17	1	\$ 783,540.00	995.7	0.067%	1.4	0.728	1.31	2.94	0.41	1800	-	-
18	1	\$ 801,060.00	995.5	0.067%	1.5	0.763	1.31	2.97	0.39	1900	-	-
19	1	\$ 818,580.00	995.3	0.067%	1.5	0.801	1.32	2.99	0.37	2000	-	-
20	N/A	\$ -	995.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		\$ 12,712,662.82										

5.2.2. Serie de L = 400m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

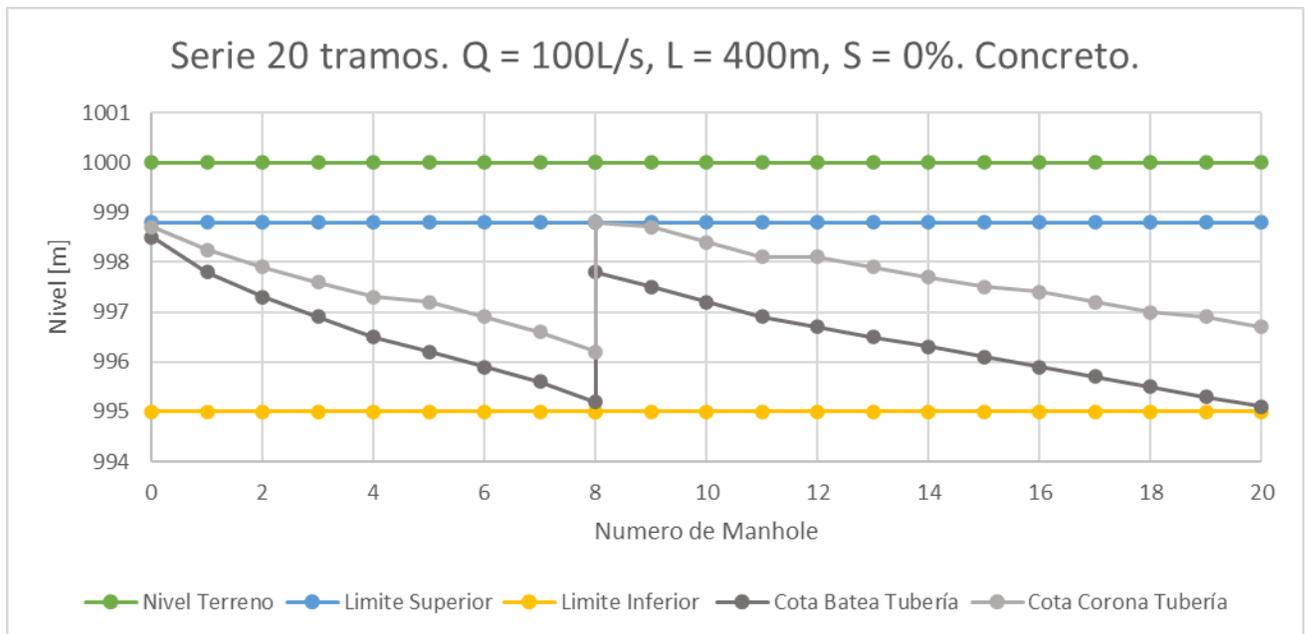


Figura 29. Figura de Serie de L = 400m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Tabla 13. Diseño de Serie de L = 400m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo[USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro [m]	yn/d [%]	Velocidad [m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altura bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 300,840.00	998.5	0.175%	0.2	0.616	0.97	2.17	0.64	100	-	-

1	1	\$ 416,820.00	997.8	0.125%	0.45	0.665	1.00	2.14	0.54	200	-	-
2	1	\$ 501,520.00	997.3	0.100%	0.6	0.726	1.00	2.06	0.46	300	-	-
3	1	\$ 585,000.00	996.9	0.100%	0.7	0.691	1.08	2.31	0.49	400	-	-
4	1	\$ 717,220.00	996.5	0.075%	0.8	0.594	1.03	2.03	0.47	500	-	-
5	1	\$ 745,660.00	996.2	0.075%	1	0.675	1.06	2.15	0.44	600	-	-
6	1	\$ 774,100.00	995.9	0.075%	1	0.764	1.09	2.23	0.40	700	-	-
7	1	\$ 807,280.00	995.6	0.100%	1	0.755	1.26	2.96	0.47	800	-	-
8	3	\$ 11,388,618.65	995.2	-	-	-	-	-	-	-	2.6	20.405
8	1	\$ 681,140.00	997.8	0.075%	1	0.641	1.18	2.53	0.46	900	-	-
9	1	\$ 712,220.00	997.5	0.075%	1.2	0.692	1.20	2.61	0.44	1000	-	-
10	1	\$ 743,300.00	997.2	0.075%	1.2	0.747	1.21	2.66	0.42	1100	-	-
11	1	\$ 860,320.00	996.9	0.050%	1.2	0.685	1.07	2.02	0.37	1200	-	-
12	1	\$ 882,800.00	996.7	0.050%	1.4	0.729	1.08	2.06	0.35	1300	-	-
13	1	\$ 905,280.00	996.5	0.050%	1.4	0.778	1.09	2.08	0.33	1400	-	-
14	1	\$ 927,760.00	996.3	0.050%	1.4	0.837	1.09	2.09	0.30	1500	-	-
15	1	\$ 998,000.00	996.1	0.050%	1.4	0.746	1.13	2.22	0.35	1600	-	-
16	1	\$ 1,021,360.00	995.9	0.050%	1.5	0.789	1.14	2.24	0.33	1700	-	-
17	1	\$ 1,044,720.00	995.7	0.050%	1.5	0.839	1.14	2.24	0.30	1800	-	-
18	1	\$ 1,117,600.00	995.5	0.050%	1.5	0.748	1.18	2.37	0.35	1900	-	-
19	1	\$ 1,141,840.00	995.3	0.050%	1.6	0.784	1.18	2.38	0.33	2000	-	-
20	N/A	\$ -	995.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		\$ 17,630,418.65										

5.2.3. Serie de L = 500m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

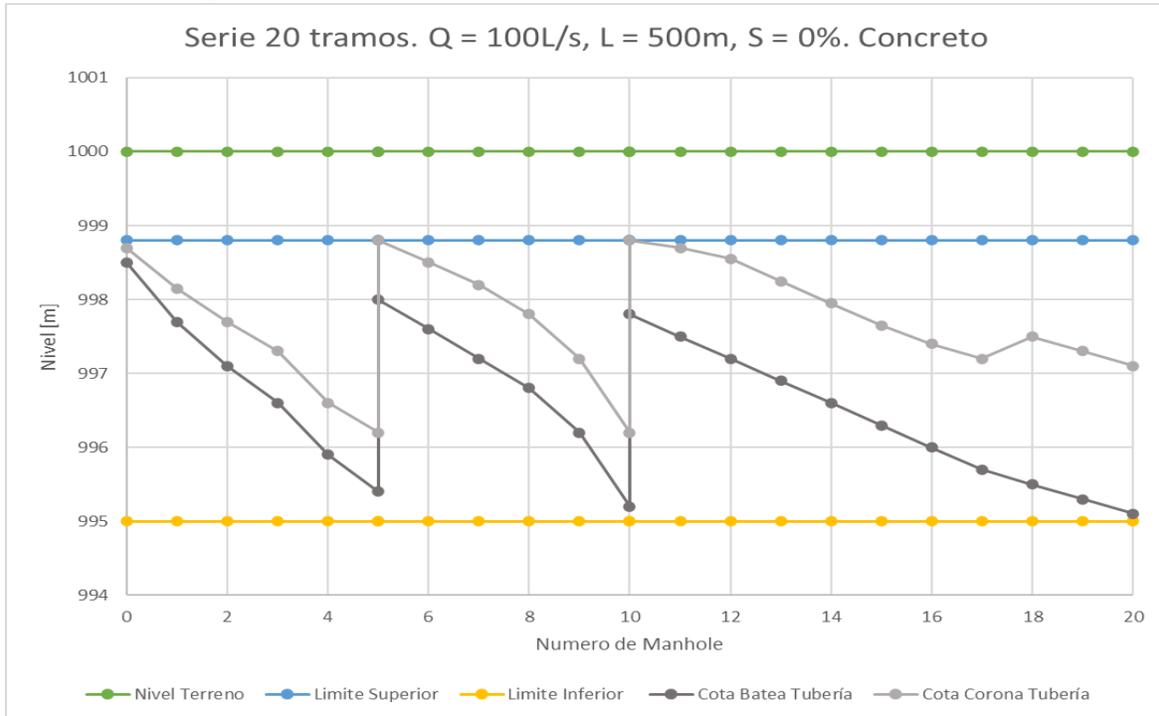


Figura 30. Figura de Serie de L = 500m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Tabla 14. Diseño de Serie de L = 500m, S = 0%, Caudal por pozo = 100L/s, Pozos con bombeo disponible = Todos

Pozo inicial	Tipo arco	Costo por tramo[USD]	Cota Batea [m]	Pendiente [%]	Diámetro [m]	yn/d [%]	Velocidad [m/s]	τ [Pa]	Froude [-]	Caudal [L/s]	Altura bombeo [m]	Potencia [kW]
0	1	\$ 380,462.50	998.5	0.160%	0.2	0.635	0.94	2.02	0.60	100	-	-
1	1	\$ 535,500.00	997.7	0.120%	0.45	0.675	0.99	2.07	0.52	200	-	-
2	1	\$ 652,400.00	997.1	0.100%	0.6	0.726	1.00	2.06	0.46	300	-	-
3	1	\$ 713,600.00	996.6	0.140%	0.7	0.806	1.20	2.93	0.50	400	-	-
4	1	\$ 844,125.00	995.9	0.100%	0.7	0.850	1.10	2.38	0.39	500	-	-
5	3	\$ 7,186,835.98	995.4	-	-	-	-	-	-	-	2.60	12.753
	1	\$ 669,400.00	998	0.080%	0.8	0.837	1.06	2.15	0.36	600	-	-
6	1	\$ 772,100.00	997.6	0.080%	0.9	0.742	1.12	2.36	0.42	700	-	-
7	1	\$ 819,500.00	997.2	0.080%	1	0.849	1.12	2.38	0.36	800	-	-
8	1	\$ 878,750.00	996.8	0.120%	1	0.772	1.38	3.57	0.50	900	-	-
9	1	\$ 973,550.00	996.2	0.200%	1	0.680	1.76	5.76	0.72	1000	-	-
10	3	\$ 14,180,174.90	995.2	-	-	-	-	-	-	-	2.60	25.506

10	1	\$ 851,425.00	997.8	0.060%	1	0.837	1.09	2.15	0.33	1100	-	-
11	1	\$ 971,575.00	997.5	0.060%	1.2	0.686	1.15	2.34	0.40	1200	-	-
12	1	\$ 1,012,900.00	997.2	0.060%	1.35	0.731	1.16	2.38	0.38	1300	-	-
13	1	\$ 1,054,225.00	996.9	0.060%	1.35	0.780	1.17	2.41	0.36	1400	-	-
14	1	\$ 1,095,550.00	996.6	0.060%	1.35	0.839	1.17	2.41	0.33	1500	-	-
15	1	\$ 1,166,725.00	996.3	0.060%	1.35	0.811	1.20	2.51	0.35	1600	-	-
16	1	\$ 1,269,400.00	996	0.060%	1.4	0.726	1.24	2.64	0.39	1700	-	-
17	1	\$ 1,598,900.00	995.7	0.040%	1.5	0.520	1.09	2.01	0.38	1800	-	-
18	1	\$ 1,633,600.00	995.5	0.040%	2	0.538	1.10	2.05	0.38	1900	-	-
19	1	\$ 1,668,300.00	995.3	0.040%	2	0.555	1.12	2.09	0.38	2000	-	-
20	N/A	\$ -	995.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		\$ 14,426,223.48										

5.3. Análisis de Resultados

En primera instancia se puede observar como los costos de bombeo son los costos que representan un mayor porcentaje respecto a los costos de los tramos de alcantarillado normales, por ejemplo, en la serie de la 5.1.1 el costo del arco tipo 3 es casi que el 20% del costo total de la serie, y este arco tipo 3 tiene un costo aproximado del doble de un arco tipo 1. Este costo será una mayor proporción del costo total si el arco tipo 3 se ubica en otro pozo de inspección. De igual manera, como el costo de los arcos tipo 3 es tan elevado comparado con los costos de los arcos tipo 1, los arcos tipo 3 solo ocurrirán cuando la serie de tuberías de alcantarillado no tenga un diseño factible dadas sus características y la profundidad máxima que se este manejando para la respectiva serie.

De acuerdo con los resultados presentados anteriormente se puede observar que cuando en todos los pozos puede haber bombeo, el programa intenta colocar el pozo con bombeo lo más aguas arriba posible con la finalidad de disminuir la potencia del bombeo y disminuir los costos de bombeo que tienen mayor magnitud que los costos de los arcos tipo 1.

Otro aspecto que las figuras presentadas anteriormente permiten observar es el hecho de que la profundidad máxima sigue siendo una característica limitante en los pozos de bombeo, pues cuando el diámetro de la tubería aumenta, puede ocurrir que no haya suficiente espacio para que ocurra el diámetro de la tubería y el bombeo mínimo que se le ha indicado al programa. Si no se llega a una solución factible por estas dos características, se puede disminuir el bombeo mínimo disponible a la serie o aumentar la profundidad mínima de manera que haya suficiente espacio para que el diseño de la serie quepa incluyendo la estación de bombeo, dependiendo de su altura de bombeo mínima.

6. Conclusiones y recomendaciones

- La metodología desarrollada por el CIACUA y que ha sido continuada en este trabajo asegura el óptimo global del diseño de series de alcantarillado incluyendo estructuras de caída y estaciones de bombeo
- El problema de la ruta mas corta, que es planteado en el diseño de series de tuberías en sistemas de alcantarillado es resultado por medio del algoritmo de Bellman-Ford
- El algoritmo intentará colocar el bombeo en el primer pozo de inspección posible para disminuir la potencia del bombeo y de esta manera disminuir el costo del bombeo.
- Los costos de las estaciones de bombeo tienen mayor costo que las tuberías y las cámaras de caída en las series de alcantarillado
- Al permitir la creación de estaciones de bombeo se abre la posibilidad de generar mas diseños de series de tuberías en sistemas de alcantarillado, pero también se crean nuevas limitaciones que deben ser tenidas en cuenta

7. Bibliografía

- Bosserman, B. (1999). Pump System Hydraulic Design. En L. Mays, *Hydraulic Design Handbook*. New York: McGraw Hills.
- Butler, D., & Davies, J. (2011). *Urban Drainage*. Nueva York: Spon Press.
- Cabral, M., Loureiro, D., Gomes, M., Oliveira, R., & Covas, D. (2018). Statistical modelling of wastewater pumping stations costs . *1 International WDSA/CCWI 2018 Joint Conference*
- Duque, N. (2013). Metodología para el diseño optimizado de serie de tuberías. *Universidad de los Andes*.
- Duque, N., Duque , D., & Saldarriaga, J. (2015). A new methodology for the optimal design of series fo pipes on sewer systems. *Journal of Hydroinformatics*.
- López Sabogal, D. (2011). *Diseño optimizado de redes de drenaje urbano usando el concepto de potencia unitaria*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Marú, A. (2018). Diseño optimizado de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado incluyendo estructuras de caída. *Universidad de los Andes*.
- Maurer, Scheidegger, & Herlyn. (12 de septiembre de 2012). *Quantifying costs and lengths of urban drainage systems with a simple static sewer*. Dubendorf, Suiza: Taylor & Francis.
- Ministerio de Vivienda. (2016). *RAS - Titulo D*. Bogotá .
- Peinado, C. (2014). Uso del programa CIE-Agua para el diseño optimizado de redes de drenaje urbano. *Redes patron en Colombia . Uniandes*.

Saldarriaga, J. (2020). Sistema Integrado de Drenaje Urbano. Bogotá: Universidad de los Andes.

UPME. (2019). *Precios energía eléctrica - comparación países* . Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/precios-energia-electrica-comparacion-paises.aspx>