

**INTELIGENCIA COMPUTACIONAL APLICADA AL DISEÑO DE UNA RED DE
ALCANTARILLADO PLUVIAL.**

JESUS ALBERTO ALVARADO RUEDA

CHRISTIAN BRIAN FONSECA GÓMEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2015**

**INTELIGENCIA COMPUTACIONAL APLICADA AL DISEÑO DE UNA RED DE
ALCANTARILLADO PLUVIAL.**

**JESUS ALBERTO ALVARADO RUEDA
CHRISTIAN BRIAN FONSECA GÓMEZ**

**Trabajo de Grado para optar el título de
Ingeniero Civil**

**Director
OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO
Ph.D. Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2015**

Quiero dedicar este proyecto de investigación y mis estudios en ingeniería civil, en primera instancia a Dios quien me ha permitido lograrlo, brindándome fuerza para superar los obstáculos del camino.

A mi padre Jesús Alvarado por su confianza e inagotable esfuerzo por verme cumplir mis sueños.

A mi madre Ismenia Rueda por su amor, cariño y comprensión en todo momento, por sus consejos en situaciones difíciles y el apoyo incondicional.

A mi compañero Brian fonseca por su compromiso en el desarrollo de este trabajo.

Mis compañeros y amigos que compartieron conmigo esta etapa tan importante de mi vida.

JESUS ALVARADO RUEDA

En primera instancia le agradezco a Dios por permitirme lograr este sueño, pues sin el nada de esto fuera posible.

A Luis Eduardo Fonseca, que en paz descansa, mi tío, padrino, amigo, ya que él fue un gran apoyo moral en momentos que necesite.

A Nubia Esperanza, mi madre, la cual es mi motor por el cual cada día seguir, perseverar, y nunca desfallecer en todos mis objetivos.

A Ramón Ignacio Fonseca, mi padre, quien con su ejemplo me enseñó que todo esfuerzo tiene su recompensa, junto con Clara Beltrán, su esposa, por sus consejos en los momentos críticos.

A la familia Pulido Fonseca, por ser mi segunda familia, por hacer parte de este sueño, en el cual siempre estuvieron brindando su apoyo.

A Jesús Alvarado, mi compañero de proyecto, por todo el apoyo y esfuerzo compartido, recalcando su compromiso y responsabilidad en todas las fases del proyecto.

A todos mis amigos de la universidad, donde siempre estuvieron presentes en momentos de euforia, momentos que no fueron gratos de los cuales se aprendió y se salió adelante

CHRISTIAN BRIAN FONSECA GOMEZ

AGRADECIMIENTOS.

Un reconocimiento especial a nuestro director el profesor Oscar Begambre por su asesoría y capacidad para tomar decisiones.

Al ingeniero Ricardo Oviedo por su disponibilidad, interés, apoyo y compromiso en el desarrollo de este trabajo de grado.

El aporte del ingeniero electrónico David Abreo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	19
1. JUSTIFICACIÓN.....	21
2. OBJETIVOS.....	22
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	22
2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO.....	22
3. SELECCIÓN ALGORITMO.....	23
4. DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA APLICAR LOS AG.....	29
4.1. DESCRIPCIÓN CASO ESTUDIO.....	29
4.2. DISEÑO HIDRÁULICO.....	30
4.3. DEFINICIÓN Y COMPOSICIÓN DE LOS AG.....	32
4.3.1 Operadores genéticos.....	33
4.3.1.1. Selección.....	33
4.3.1.2. Cruce.....	34
4.3.1.3. Mutación.....	34
4.4. PARAMETROS DE AG.....	36
4.5. CODIFICACIÓN DEL AG.....	36
5. EMPLEO Y PROGRAMACIÓN DE AG.....	37
5.1 ETAPA DE EXPLORACIÓN.....	37
5.2 ETAPA DE EXPLOTACIÓN.....	40
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	45
6.1. RESULTADOS NUMÉRICOS.....	45
6.1.1 Diseño clásico.....	45
6.1.2 Mejor diseño empleando el programa	45
6.1.3 Diseño según afshar 2012.....	45

6.2.	VALIDACIONES.....	46
6.3.	RESULTADOS GRÁFICOS	47
7.	CONCLUSIONES.....	52
8.	RECOMENDACIONES.....	53
	BIBLIOGRAFIA.....	54
	ANEXOS.....	58

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Red de alcantarillado caso estudio.....	29
Figura 2. Estructura o código base de un algoritmo genético simple.....	35
Figura 3. Distribución aleatoria de cotas.....	38
Figura 4. Representación operacional de la fase de exploración.....	39
Figura 5. Ejemplo básico de cruce de un punto	42
Figura 6. Estructura operacional de la fase de explotación	44

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Ensayo con población de 30 aplicando dos generaciones mediante método del torneo.....	47
Gráfico 2. Ensayo con población de 30 aplicando dos generaciones mediante método elitista.....	48
Gráfico 3. Ensayo con población de 50 aplicando dos generaciones mediante método del torneo.....	49
Gráfico 4. Ensayo con población de 50 aplicando dos generaciones mediante método elitista.....	49
Gráfico 5. Ensayo con población de 30 aplicando cinco generaciones mediante método elitista.....	50
Gráfico 6. Ensayo con población de 50 aplicando cinco generaciones mediante método del torneo.....	50

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Desventajas de los primeros métodos aplicados a sistemas de evacuación pluviales	23
Tabla 2. Algoritmos genéticos vs técnicas clásicas de optimización en el ámbito de los alcantarillados.....	25
Tabla 3. Revisión literaria de afirmaciones y/o conclusiones sobre algoritmos genéticos aplicados a sistemas de alcantarillado.....	26
Tabla 4. Información técnica de la red de alcantarillado.....	30
Tabla 5. Diseño tradicional.....	45
Tabla 6. Diseño alcanzado por fase de exploración.....	46
Tabla 7. Diseño según Afshar (2012).....	46
Tabla 8. Resumen costos totales de la red.....	47
Tabla 9. Resumen de los resultados para los distintos ensayos.....	51

ANEXOS

Pág.

Anexo A. Compilación del código completo en el lenguaje MATLAB.....58

GLOSARIO

ALCANTARILLADO PLUVIAL: Sistema integrado que tiene como función evacuar las aguas lluvias.

ALGORITMO: Conjunto ordenado de operaciones sistemáticas que permite realizar un cálculo y hallar la solución de un tipo de problema.

CAUDAL: Es la relación entre el volumen de agua por unidad de tiempo.

CODIFICACIÓN: Es la forma de representar en lenguaje computacional los genes de cada individuo.

CRUCE: Operador genético encargado de intercambiar los genes de los individuos con el objetivo de explorar la mayor cantidad de soluciones factibles del problema.

ESCORRENTÍA: Parte del agua precipitada que no se infiltra en el suelo.

FLUJO LIBRE: Cuando la línea piezométrica es la altura de la lámina de agua.

FUNCIÓN FITNESS: Es la encargada de evaluar la adaptabilidad de cada individuo para los algoritmos genéticos.

GENERACIÓN: Es el resultado de aplicar los operadores genéticos de selección, cruce y mutación.

GENES: Son las variables que caracterizan cada individuo y la magnitud de estas permiten diferenciar las distintas soluciones del problema planteado.

INDIVIDUO: Representa una posible solución al problema planteado.

MUTACIÓN: Operador secundario que tiene la función de complementar la estrategia de cruce al realizar una variación mínima en los genes de los individuos.

OPTIMIZAR: En computación es la determinación de las variables que intervienen en un proceso o sistema para que el resultado sea el mejor posible.

PENDIENTE: Es la relación entre la diferencia en altura y la longitud horizontal o vista en planta, puede expresarse en grados o porcentaje.

PRECIPITACIÓN: Agua generada por los eventos de lluvia que cae a la superficie por consecuencia del ciclo hidrológico.

RESUMEN

TÍTULO: INTELIGENCIA COMPUTACIONAL APLICADA AL DISEÑO DE UNA RED DE ALCANTARILLADO PLUVIAL

AUTORES: JESUS ALBERTO ALVARADO RUEDA

CHRISTIAN BRIAN FONSECA GÓMEZ

PALABRAS

CLAVE: optimización, redes, alcantarillado, heurística, población, genético.

DESCRIPCIÓN

La falta de sistemas de evacuación pluvial en algunas partes del país, a razón de los extremados costos, propició la investigación sobre algún posible modelo que redujera los precios en la fase del diseño, pero sin alterar el funcionamiento hidráulico. El mundo científico, presenta las técnicas de optimización como punto de partida, aunque, como lo plantea este estudio, debe iniciarse por validar ejemplos específicos de alcantarillados, que hayan sido estudiados y documentados, antes de pasar a la práctica real. La estrategia que aquí se elabora, es empezar por adquirir un conocimiento básico sobre temas de optimización, que permitan obtener los criterios necesarios para relacionar, estructurar, programar y extraer las ideas más relevantes de los resultados, en el contexto de los sistemas de drenaje. Los principales hallazgos de este trabajo fueron, la herramienta computacional base para la aplicación del algoritmo, la cual logro reducir los costos del diseño en un porcentaje 28 %, sin emplear tediosos cálculos manuales, y las ideas que se adquirieron, en busca de acortar la distancia que separa los modelos del entorno práctico. Las recomendaciones para mejorar la investigación, se resumen en la ejecución el programa usando la computación en paralelo y la inclusión de los parámetros hidráulicos que no se tuvieron en cuenta en el diseño.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

ABSTRACT:

TITLE: COMPUTATIONAL INTELLIGENCE APPLIED TO THE DESIGN OF A STORM SEWER NETWORK *

AUTHORS: JESUS ALBERTO ALVARADO RUEDA

CHRISTIAN BRIAN FONSECA GÓMEZ **

KEYWORDS: optimization, sewer networks, heuristics, population, genetic.

DESCRIPTION

The lack of storm water drainage systems in some parts of the country, because of the extreme cost, led to research on a model possible that would reduce prices in the design phase, but without altering the hydraulic operation. The scientific world, presents optimization techniques as a starting point, though, as suggested by this study should be initiated by validate specific examples of sewers, which have been studied and documented, before moving to actual practice. The strategy which is here made, is to start by acquiring a basic knowledge on topics of optimization, which will allow the necessary criteria for relate, organize, schedule and extract the most relevant ideas of the results, in the context of drainage systems. The main findings of this study were, the computational tool for the implementation of the algorithm, which managed to reduce design costs in a percentage 28%, without using tedious manual calculations, and the ideas that were acquired, in search of shortening the distance between the models and the environment practical. The recommendations to improve the investigation, summarize in the execution the program using the computation in parallel and the incorporation of the hydraulic parameters that were not born in mind in the design. Recommendations to improve the research are summarized in the ejecution of the program using parallel computing and the inclusion of hydraulic parameters that were not taken into account in the design.

*Work Degree

** Faculty of Physical - mechanics Engineering. School of Civil Engineering. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

INTRODUCCIÓN

La necesidad de evacuar desechos sólidos y líquidos, además de los grandes volúmenes de agua procedentes de las precipitaciones, dio cabida en la historia al surgimiento de los sistemas de alcantarillado. Graves deterioros en la salud de las personas por causa de epidemias y otro tipo de enfermedades, llevó a la ingeniería a proponer soluciones viables que mitigaran esta problemática; sin embargo, la herramienta se presentaba incompleta, ya que el constante crecimiento de las poblaciones y la rápida influencia urbanística produjo cambios en los efectos de la lluvia. Los altos porcentajes de infiltración sobre poblaciones con pocas construcciones, cambiaron a medida que los pueblos demandaban grandes obras de infraestructura, tales como edificaciones, puentes y vías, donde gran parte del agua precipitada se convertía en escorrentía, lo que también llegaría a generar problemas graves para los habitantes, debido a esto, es que nace la rama de alcantarillados dedicado específicamente a los eventos pluviales.

En Colombia, algunas regiones todavía no cuentan con sistemas adecuados para evacuar las aguas residuales y las generadas por el ciclo hidrológico. Según, Montalvo et al. (2008), en los países tercermundistas, la principal limitante para la construcción de los alcantarillados es el alto costo que se requiere, sumado a esta situación, en el país, se dan malos manejos de los recursos y las empresas constructoras no se preocupan por buscar otros métodos para realizar los proyectos de forma eficiente sin sobrecostos. Si se analiza la etapa del diseño, no se encuentra ninguna diferencia, los ingenieros calculistas solo se centran en plantear soluciones funcionales y validas de acuerdo a las normativas, pero son muy pocos los que cuestionan la pregunta base de esta investigación: ¿Cómo se podría obtener un mejor diseño, en cuanto al costo?

De acuerdo al planteamiento anterior toman gran importancia los modelos o técnicas de optimización, que a través de lenguajes computacionales, evalúan diversas soluciones del problema descrito y orientan la búsqueda hacia los mejores resultados. El concepto de optimización aplicado a sistemas de alcantarillado ha sido estudiado en gran magnitud. La primera propuesta fue realizada a mediados de los años 60 por Deininger y Holland (1966), época en que la ingeniería lograría grandes avances en la computación, desarrollando técnicas como programación lineal (LP), no lineal (PNL), dinámica (PD). En la actualidad las técnicas heurísticas predominan para este y muchos otros problemas de ingeniería, debido a la complejidad de las funciones que se pretenden minimizar o maximizar y los buenos resultados reportados. (Guo, et al.2008).

Esta investigación pretende aplicar un método numérico inteligente, que evalúe múltiples diseños sobre un ejemplo de alcantarillado descrito en la literatura, y presente el mejor resultado obtenido después de su ejecución, logrando definir en primera instancia la técnica de optimización a utilizar en la red, y la forma de afrontar el diseño; consiguiendo asociar los conceptos del modelo seleccionado al ámbito de los alcantarillados, con el fin de estructurar la programación del cálculo hidráulico junto con la vinculación del algoritmo. A partir de los resultados que obtenga la optimización, se podrán extraer conclusiones importantes sobre la aplicación de estas técnicas a la práctica real y en llegado caso, realizar las recomendaciones necesarias para el buen funcionamiento de este tipo de herramientas computacionales.

1. JUSTIFICACIÓN

Mejorar la calidad de vida de las poblaciones es una de las funciones de la ingeniería; basándose en la aplicación del conocimiento científico y el uso de las habilidades cognitivas, se logran realizar obras de infraestructura que benefician a las comunidades, tales como: acueductos, vías, puentes, edificaciones y sistemas de alcantarillado. Sin embargo, en muchas regiones del país las personas todavía no cuentan con estos servicios básicos que les permitan satisfacer sus necesidades debido a que la ejecución de estos proyectos no depende solo de los ingenieros sino que también influyen factores sociales, políticos y económicos. Una de las posibles etapas a intervenir para mitigar la problemática mencionada es la etapa de planeación y diseño, ya que es el proceso previo en la búsqueda de una solución, en el cual se contemplan todos los requerimientos técnicos y por consiguiente las variables que allí intervengan, están directamente relacionadas con los costos del proyecto cuando este alcance la fase constructiva.

La creación de nuevos modelos de optimización, que basados en lógicas de programación creadas por el hombre pero ejecutadas por un computador Afshar, (2009) toman gran relevancia a partir de todos los aspectos mencionados anteriormente, es por eso que el desarrollo del proyecto, gira en torno a la inclusión de estos algoritmos en el cálculo de los sistemas de drenaje; los cuales se conforman por alcantarillado sanitario, pluvial y combinado. Para el caso del proyecto se descarta de entrada el sistema combinado, debido a que todas las investigaciones realizadas en otros países, y actualmente en Colombia, tratan por separado tanto la red sanitaria como la de aguas lluvias.

La función básica de los alcantarillados pluviales es proteger a la ciudadanía de graves daños que pueden ocasionar épocas de altas precipitaciones, para lograr esto un enfoque práctico es aumentar el grado de exigencia en los procesos constructivos y en la calidad de los materiales, sin embargo la estrategia de esta investigación se centra en la planificación y concepción de los criterios de diseño.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Aplicar un algoritmo inteligente en el diseño de una red de alcantarillado pluvial.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elegir el algoritmo idóneo para la optimización de la red de alcantarillado de aguas lluvias.
- Programar el algoritmo computacional y el diseño de la red de alcantarillado pluvial utilizando el lenguaje de Matlab.
- Comparar si el método seleccionado proporciona un mejor rendimiento en cuanto a costos, con respecto a un diseño tradicional.
- Validar los resultados obtenidos del algoritmo aplicado con respecto a otro método iterativo que tenga como base de investigación el mismo modelo simplificado de alcantarillado pluvial.

3. SELECCIÓN DEL ALGORITMO

Se realizó una revisión de la literatura científica, con el fin de seleccionar un método de optimización el cual se adapte de la mejor manera a las redes de alcantarillado; para esto se descarta en primera instancia, métodos tradicionales como programación lineal (Deininger, 1966; Dajani y Hasit, 1974), programación no lineal (Holland, 1966; Price, 1978) dinámica (Mays y Yen, 1975; Walters y Templeman, 1979). Entre otros, debido a que no reportan resultados satisfactorios para este tipo de problemas complejos, en donde se involucran variables discretas y continuas. Las afirmaciones anteriores se muestran en detalle en la tabla 1.

Tabla 1. Desventajas de los primeros métodos aplicados a sistemas de evacuación pluviales.

<p>PROGRAMACIÓN LINEAL (LP) Guo et al (2008).</p>	<ul style="list-style-type: none">➤ Su aplicación requiere, básicamente, que todas las funciones objetivas y las restricciones, sean lineales. Sin embargo, las condiciones hidráulicas son altamente dinámicas y en rara ocasión es posible tener una relación lineal con las variables de decisión, como diámetros y pendientes.➤ LP requiere que cada tubo sea diseñado por separado e implica que cada flujo en la tubería sea independiente de los tramos adyacentes. (Walters, 1992).
---	--

	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Todas las variables de decisión son tratadas como variables continuas. Sus soluciones abarcan a menudo diámetros continuos.
<p>PROGRAMACIÓN NO LINEAL (PNL) Guo et al (2008).</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pueden tratar con funciones no lineales y limitadas, pero implican mayor dificultad computacional debido a que la función objetivo es discontinua y no diferenciable. ➤ Por otra parte, la mayoría de ellos no podría tratar con diámetros discretos. (Price, 1978; Gidley, 1986).
<p>PROGRAMACIÓN DINÁMICA Guo et al (2008).</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Presenta el problema de optimización en forma secuencial y se divide en etapas, este se ajusta al diseño de redes de drenaje: tipo árbol. Según, Argaman, et al (1973) la propuesta de “líneas de drenaje”, que pasen a través de todos los agujeros, siendo la misma cantidad de tubos de salida, pueden dividir una red de alcantarillado en varios niveles. ➤ Flexible, en cuanto a la forma de la función objetivo. Puede tratar con funciones no diferenciables y discontinuas. Además, las restricciones de diseño generalmente no representan un problema para su aplicación. (Gidley, 1986).

Actualmente, los métodos heurísticos tienen la mayor atención por parte de los investigadores, para el tratamiento de redes de drenaje, debido a las grandes ventajas que tienen sobre los modelos tradicionales. A continuación, en la tabla 2 se encuentran algunos de los beneficios que destacan a los algoritmos genéticos.

Tabla 2. *Algoritmos genéticos vs técnicas clásicas de optimización en el ámbito de los alcantarillados.*

ALGORITMO GENÉTICO	ALGORITMO MATEMÁTICO
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Si la función representativa es dinámica, como ocurre en los sistemas de alcantarillado, no se puede realizar la computación por algoritmos matemáticos; en estos casos, los algoritmos genéticos no tienen problema, ya que pueden encontrar un mínimo aceptable, si no es posible encontrar el óptimo. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se utiliza para resolver un problema que requiera como solución minimizar o maximizar una función continua.
ALGORITMO GENÉTICO	MÉTODOS ENUMERATIVOS
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Los algoritmos genéticos usan heurística para la resolución de problemas, lo cual limita y orienta drásticamente, el número de datos a utilizar. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se fundamentan en la posibilidad teórica de encontrar soluciones a problemas de optimización, enumerando las soluciones posibles para todos los casos, y almacenándolas

	en una base de datos, luego se dirigen a la base resultante y según el criterio de búsqueda entregan un resultado.
ALGORITMO GENÉTICO	SISTEMAS EXPERTOS
<p>➤ Los algoritmos genéticos son contemporáneos a los sistemas expertos y se revalorizaron por la siguiente ventaja:</p> <p>En este caso, por la presencia de la función objetivo, se puede orientar los diseños que cumplan restricciones hacia el óptimo.</p>	<p>➤ Encuentra soluciones a problemas del tipo condicional con la siguiente estructura:</p> <p>Si ocurren los hechos A, B, C, D se puede afirmar el suceso E.</p> <p>Sin embargo, en el caso particular de los alcantarillados, el cumplimiento de las restricciones hidráulicas no garantiza que esa solución sea la óptima.</p>

Ya reducido el espacio de búsqueda, en cuanto la gran variedad de procesos de optimización, la atención se centra en las técnicas heurísticas resaltando las de mayor fundamento teórico - práctico como Particle swarm optimization (PSO) Montalvo et al. (2008), Colonia de hormigas (Afshar, 2009), Algoritmos genéticos (Afshar, 2012), Celular automata Rohani et al. (2014); sin embargo, se tuvo que definir cuál de las técnicas mencionadas se ajustaba mejor teniendo en cuenta el siguientes criterio.

- Afirmaciones validas realizadas por los diversos autores en las distintas publicaciones y conclusiones sustentadas por expertos en sus respectivas investigaciones. En resumen, estos resultados se pueden observar de manera específica en la tabla 3.

Los documentos, a los cuales se les aplicó el criterio de búsqueda mencionado, no solo hablan de alcantarillados pluviales, sino que involucran temas de los recursos hídricos y otras variantes de drenaje.

Tabla 3. *Revisión literaria de afirmaciones y/o conclusiones sobre algoritmos genéticos aplicados a sistemas de alcantarillado.*

AUTOR (es)	AFIRMACIÓN O CONCLUSIÓN
Goldberg , 1994	<p>El algoritmo genético puede enfrentar con éxito una amplia gama de problemas en diferentes áreas, las razones de éxito se deben a que:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ El algoritmo genético puede resolver problemas difíciles con rapidez y fiabilidad. ➤ Los AG´s son fáciles de interactuar con simulaciones y modelos existentes ➤ son extensibles y fáciles de hibridar. ➤ Los AG´s son más poderosos en entornos difíciles donde el espacio de búsqueda por lo general es grande, discontinuo, complejo y poco conocido. Estos, no garantizan encontrar la solución óptima global, pero generalmente son eficientes en

	la búsqueda de soluciones aceptables para problemas de la vida real.
Simpson, et al. 1994	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Los AG's requieren solo un número relativamente pequeño de evaluaciones para encontrar la solución óptima (< 0.3 % del espacio total de la búsqueda de cada serie). ➤ La técnica de los AG's es ideal para problemas discretos, tales como selección de diámetros de tubería según disponibilidad comercial. ➤ Los resultados presentados en este trabajo muestran que las técnicas de algoritmos genéticos (AG's) son muy eficaces en la búsqueda de soluciones óptimas o casi óptimas, para una red caso estudio en evaluaciones relativamente pequeñas.
Reca, et al. 2006	<ul style="list-style-type: none"> ➤ El modelo demostró resultados satisfactorios, cuando se aplicó a redes de referencia conocidas, igualando los mejores resultados obtenidos en trabajos anteriores con un tiempo computacional razonable.
Weng, 2005	<ul style="list-style-type: none"> ➤ En los últimos años se ha adoptado los AG's para resolver problemas de optimización de diseño de sistemas de red con una tendencia creciente. ➤ Los AG's da buenos resultados para muchos problemas prácticos con cualquiera de sus tres operadores básicos: reproducción, cruce y mutación ➤ Este estudio utiliza una modificación progresiva de AG's para la optimización en el diseño del sistema de alcantarillado

	<p>donde se demostró su eficacia para resolver problemas complejos.</p>
<p>Guo, et al. 2007</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ El diseño óptimo de redes de alcantarillado, es de gran importancia para las grandes industrias hídricas, debido a las grandes inversiones de capital. ➤ Desde la década de los noventa, los AG prevalecen como los más explorados entre las técnicas meta-heurísticas.
<p>Guo, et al. 2008</p>	<p>En los sistemas de alcantarillados, los AG's presentan las siguientes ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Son independientes de los objetivos de diseño, logrando, generalmente, manejar cualquier tipo de sistema sin necesidad de especiales simplificaciones en la representación del mismo; como por ejemplo, el caso de los alcantarillados en donde el algoritmo no se afecta por la inclusión de pérdidas de energía, tipo de flujo y las inundaciones. ➤ La red de alcantarillado es simulada y evaluada en su conjunto. ➤ El diseño debe considerar el rendimiento del sistema a nivel global, esto puede realizarse fácilmente por el AG's.
<p>Reca, et al. 2008</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Este estudio analiza el rendimiento de varios métodos para el diseño óptimo de sistemas de distribución de agua, con fines prácticos. Integra diferentes modelos de búsqueda como AG's, simulated annealing, y búsqueda tabú. En la red de Hanoi, el mejor resultado se obtiene por el algoritmo genético,

	y está cerca de los mejores resultados obtenidos por los otros métodos heurísticos.
Nicklow, et al. 2010	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Los algoritmos genéticos han sido el algoritmo evolutivo (EA) más común aplicado en la literatura de gestión y planificación de recursos hídricos. ➤ En el diseño óptimo de una red de alcantarillado se tiene como objetivo minimizar los costos de construcción, garantizando el funcionamiento del sistema, bajo criterios específicos. Desde 1987, se hizo un intento de optimizar los alcantarillados, mediante AG's, los cuales, han sido los modelos de optimización más populares y exitosos en esta tarea.

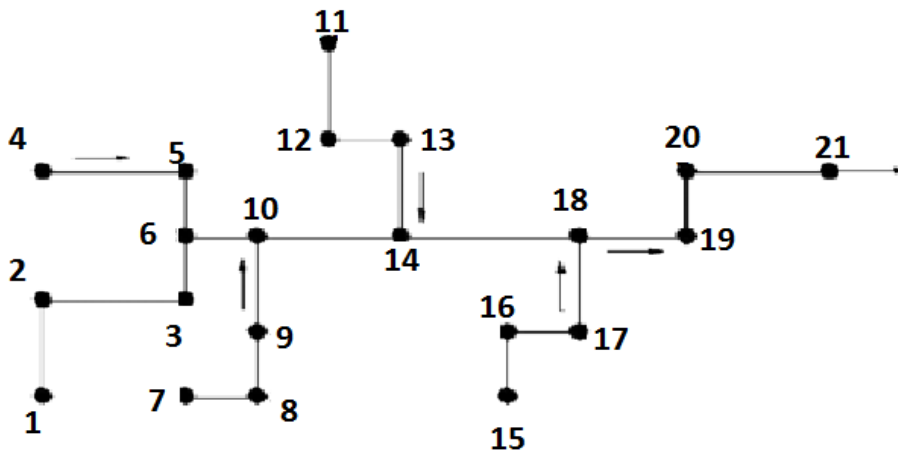
Luego de toda la revisión literaria realizada para determinar el método a utilizar en el diseño del alcantarillado, se obtiene como resultado que los algoritmos genéticos son técnicas superiores a los todos los modelos de optimización descritos en este documento en cuanto a los sistemas de evacuación pluvial.

4. DEFINICIÓN DE CRITERIOS NECESARIOS PARA APLICAR LOS ALGORITMOS GENÉTICOS

4.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO ESTUDIO

De acuerdo a la revisión bibliográfica, entre en las principales investigaciones sobre técnicas de optimización aplicadas a sistemas de drenaje pluvial. Se encuentran las de Afshar (2012), Afshar (2006), Afshar (2009), Afshar (2011). Como punto de partida, se estudió el mismo alcantarillado. Es por esto, que la red mostrada en la figura 1, se seleccionó como base para la aplicación del algoritmo genético usado en este trabajo.

Figura 1 Red de alcantarillado



Fuente. Afshar, (2012)

Una de estas investigaciones es la presentada en el artículo Afshar (2012) donde se aplica un algoritmo genético con el fin de optimizar la red en estudio. De este documento se tomaron los datos de topografía, caudal y distribución espacial de la red, necesarios para la realización de este estudio.

Tabla 4. Información técnica de la red de alcantarillado

Tramo	Cota inicial (m)	Cota final (m)	Longitud (m)	Caudal de diseño (m³/s)
1-2	152.4	150.88	106.68	0.1132
2-3	150.88	148.49	121.92	0.1982
3-6	148.49	146.3	106.68	0.2548
4-5	149.35	147.83	121.92	0.1132
5-6	147.83	146.3	131.08	0.2265
6-10	146.3	143.26	167.68	0.6229
7-8	149.35	147.83	147.64	0.2265
8-9	147.83	144.78	137.16	0.3398
9-10	144.78	143.26	106.68	0.453
10-14	143.26	141.73	152.4	1.2459
11-12	147.83	144.78	152.4	0.2548
12-13	144.78	143.26	106.68	0.453
13-14	143.26	141.73	106.68	0.5663
14-18	141.73	138.65	172.21	2.0104
15-16	142.75	141.43	121.92	0.1132
16-17	141.43	140.21	91.44	0.1699
17-18	140.21	138.65	105.23	0.2548
18-19	138.65	137.46	121.92	2.4635
19-20	137.46	136.55	152.4	2.5201
20-21	136.55	135.64	186.54	2.6617

4.2 DISEÑO HIDRÁULICO

Para la forma tradicional y la aplicación del algoritmo genético, se diseñó la red de acuerdo a la formulación simplificada descrita en el artículo Afshar (2012), debido a que generalmente los alcantarillados se diseñan bajo la hipótesis de flujo permanente y se modelan con cálculos hidráulicos simples, en donde la mayoría de programas comerciales, solo brindan herramientas para revisión mas no para diseñar Hernández et al (2014). En Afshar (2012) no se incluyen criterios adicionales intervinientes en el cálculo de un alcantarillado por gravedad. Por referir algunos se tienen las caídas en las cámaras o pérdidas en los pozos, el tipo de flujo con el que llega el agua al punto de enlace y el comportamiento auto limpiante de la tubería o cálculo del esfuerzo cortante medio.

El diseño por el método simplificado se rige al cumplimiento de las siguientes restricciones Afshar (2011,2012):

$$R1= E \geq 2.4 \text{ (m)} \quad (1)$$

$$R2= 0.6 \leq V \leq 4.5 \left(\frac{m}{s} \right) \quad (2)$$

$$R3= \frac{Y}{D} \leq 0.85 \quad (3)$$

$$R4= S > 0 \quad (4)$$

$$R5 = Q \geq q \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad (5)$$

Dónde:

q= Es el caudal de Diseño para cada tramo.

Q=Es el caudal a flujo lleno en cada tramo.

V= Velocidad real en cada tramo de la tubería.

Y/D=Relación entre la altura de la lámina de agua en el tramo y el diámetro del mismo.

E=Cobertura mínima de cada nodo o profundidad mínima de cada pozo.

S=Pendiente de la tubería en cada tramo.

Ecuaciones Hidráulicas Utilizadas en el diseño.

$$\text{Pendiente} = \left(\frac{\text{Difnivel}}{\text{Longitud}} \right) * 100 \quad (6)$$

$$Q = \frac{\pi * \text{Diámetros}^{\frac{8}{3}} * \left(\frac{\text{Pendiente}}{100} \right)^{0.5}}{\text{man} * 4^{\frac{5}{3}}} \quad (7)$$

$$\text{Relación} = \frac{q_{\text{diseño}}}{Q} \quad (8)$$

$$k = 0.3117 * \text{Relación} \quad (9)$$

$$\text{Ángulo}(i) = \text{solve} \left(k(i) = \frac{(\theta - \text{sen}\theta)^{\frac{5}{3}}}{8 * (4 * \theta)^{\frac{2}{3}}} \right) \quad (10)$$

$$\frac{Y}{D} = \frac{1}{2} * \left(1 - \frac{\text{Cos}(\text{Ángulo})}{2} \right) \quad (11)$$

$$\text{Área} = 0.125 * \text{Diámetros}^2 * \left(\text{Ángulo} - \text{sen}(\text{Ángulo}) \right) \quad (12)$$

$$\text{Velocidad} = \frac{q_{\text{diseño}}}{\text{Área}} \quad (13)$$

El proceso común de diseño para obtener los parámetros hidráulicos descritos en (11), (12), (13) es el uso de ábacos o graficas en donde se entra con la relación de caudales u otra variable y se estiman los demás valores. Sin embargo por facilidad para el código se utilizó una expresión matemática que permitiera obtener los mismo resultados y es la ecuación (10) tomada de Torres, (2008).

4.3 DEFINICIÓN Y COMPOSICIÓN DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Con el fin de una buena aplicación de los algoritmos genéticos al sistema de alcantarillado, se hace necesario tener claro la definición y composición de esta técnica evolutiva.

Los algoritmos genéticos son una técnica de optimización heurística que se puede utilizar en problemas reales y se basa en las teorías de la evolución biológica; Están compuestos por individuos, función de aptitud y operadores genéticos. El conjunto de varios individuos conforman lo que se conoce como población y a su vez estos representan una posible solución al problema planteado, la función objetivo o fitness sustituye el medio ambiente y determina que tan apto es un individuo para sobrevivir a un proceso de selección. Por último, los operadores tienen la función de realizar la fase reproductiva o intercambio de material genético, además de crear una pequeña variación en las características de cada individuo. Según Golberg, (1994) no garantizan obtener la solución más óptima, pero estos modelos han demostrado ser eficientes en la búsqueda de buenas soluciones.

4.3.1. Operadores genéticos

Para el paso de una generación a la siguiente, se aplican una serie de operadores genéticos. Los más empleados son los operadores de selección, cruce y mutación, los cuales se describen a continuación.

4.3.1.1 Selección

Según (Carretero, 2010), este operador genético, será el encargado de elegir a los individuos que serán utilizados para la reproducción y cuáles no. En principio la idea más intuitiva sería elegir siempre a los más aptos (es decir, a los que ofrezcan los mejores valores de la función fitness) de entre todos los de la población. Pero eso provocaría que en pocas generaciones la población se volviera homogénea; es decir, los genes de los individuos más aptos acabarían predominando en casi todos los individuos. Así pues, no se debe eliminar del todo la posibilidad de que los individuos menos aptos puedan reproducirse puesto que esto reduciría la diversidad de la población lo que se traduciría en espacios de búsqueda sin explorar.

4.3.1.2 Cruce

Es, junto con la función de mutación, la encargada de hacer evolucionar a la población de soluciones. Al igual que en el mundo real, una vez elegidos a los progenitores llega el momento de la reproducción que puede darse de dos formas diferentes: sexual o asexualmente. El método sexual (utilizado), consistente en combinar de alguna forma el material genético de ambos progenitores para dar lugar a nuevos individuos, diferentes a sus padres, pero con ciertas similitudes. Esto se traduce en una nueva lista de posibles soluciones y de nuevos vectores de

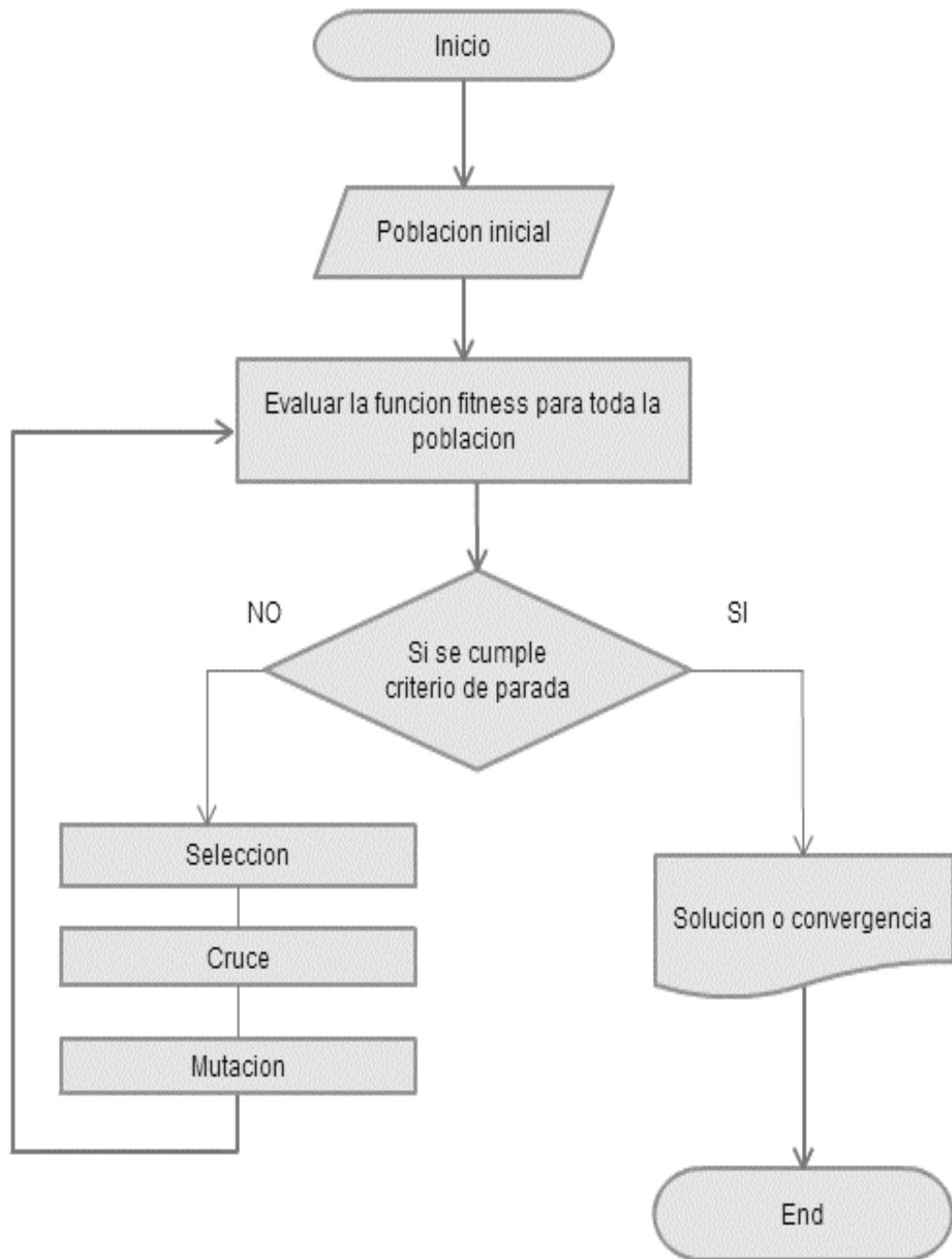
búsqueda que tanto pueden llevar al éxito como al fracaso (Carretero, 2010), así que es importante tener claro que la función de cruce sólo hace evolucionar a la población sin tener en cuenta si esto nos acerca o nos aleja de la solución deseada.

4.3.1.2 Mutación

La función es complementar a la de cruce insertando cambios inesperados en los individuos. La idea es que la función de cruce recorra el espacio de búsqueda en todas direcciones y que la de mutación permita la aparición de individuos diferentes garantizando que ninguna zona del espacio búsqueda tenga una probabilidad cero de ser explorada. El caso más simple de mutación sería el de cambiar un valor del cromosoma, pero existen multitud de métodos diferentes, donde el problema radicaría en seleccionar un valor apropiado para esta probabilidad.

Un valor demasiado alto haría crecer enormemente la diversidad genética dificultando la convergencia final del problema. Por el contrario, un valor demasiado bajo reduciría la diversidad dejando al AG a voluntad del primer óptimo local. (Carretero, 2010)

Figura 2. Estructura de un algoritmo genético simple o básico.



4.4 PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO

Una de las palabras más comunes en la terminología del algoritmo genético es la población definida como el conjunto de individuos o posibles soluciones del problema Rani et al. (2013). Asociar estos temas al caso del alcantarillado es referirse a un individuo como el diseño de la red en el cual se dimensionen todos los tramos y se conozca la totalidad de las cotas en los nodos. Cada diseño del alcantarillado es independiente, así como el ser humano se puede diferenciar por el color de los ojos o el cabello; una solución de la red se distingue por los valores de diámetro y cotas.

4.5 CODIFICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO

La codificación en un algoritmo genético se define como la forma de representar cuantitativamente los genes o características de cada diseño, se emplea el método binario y real. En este trabajo, se optó por realizar una codificación real, con valores verdaderos de diámetros y cotas para facilitar los procesos de cálculo en la programación y tener más claridad en los conceptos genéticos.

5. EMPLEO Y PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO

La mayoría de modelos evolutivos empiezan su proceso con individuos que no cumplen las restricciones de la situación planteada. La idea se soporta en encontrar resultados óptimos realizando la búsqueda, y al mismo tiempo explotando los buenos caminos obtenidos. Otra de forma de afrontar el problema es la que se realizó en este modelo, donde se genera en primer lugar una población que es viable hidráulicamente, es decir, se exploran puntos validos dentro del espacio de soluciones, que luego serán estudiados a fondo por la fase de explotación, lugar donde intervienen todos los conceptos del algoritmo genético.

El funcionamiento global del programa es resolver la fase de exploración en donde se calculan todos los diseños requeridos por el usuario ,que en el caso de los algoritmos genéticos se conoce como población, luego con los resultados de la exploración se da inicio a la fase de explotación encargada de aplicar el AG.

La etapa de exploración puede trabajar de manera independiente y estos resultados son válidos.

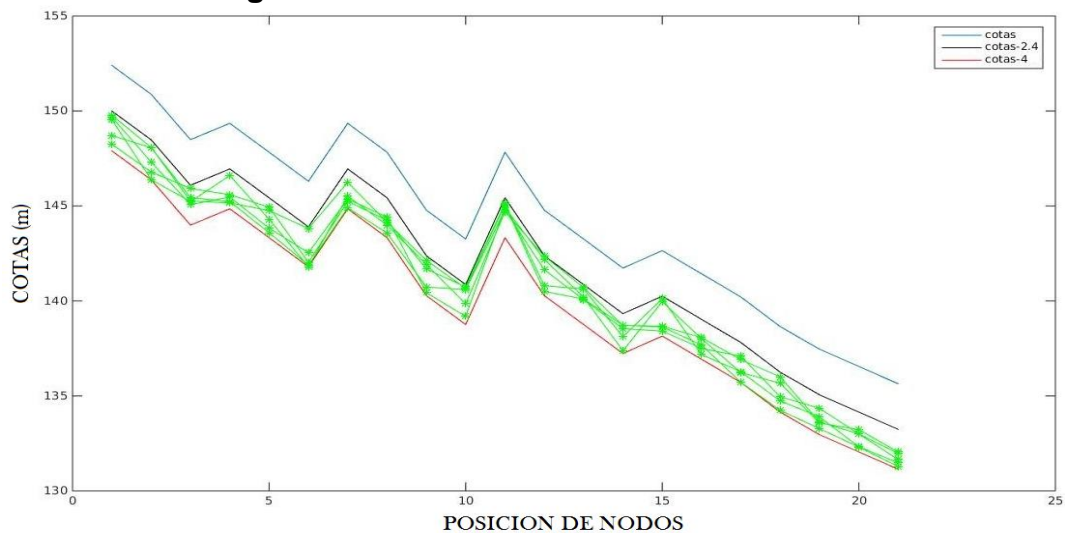
5.1 ETAPA DE EXPLORACIÓN

A continuación se describen todos los criterios que se tuvieron en cuenta al programar en Matlab la población inicial que complementan la estructura operacional de la exploración. (Ver figura 4)

1- Los datos de entrada como lo son: longitud, cotas y caudal de diseño se tomaron de la tabla (1) Afshar (2012). El tamaño de la población n se define por el usuario y tanto los diámetros comerciales disponibles para programar como el coeficiente de manning fueron los descritos en Afshar (2012).

2- La asignación de las cotas se hizo de manera aleatoria, como lo muestra la figura 3, las líneas verdes representan distintas distribuciones de cotas pero se restringen al cumplimiento de la pendiente mínima, respetando el sentido de flujo. Además, se planteó la condición, en donde todos los nodos, solo toman valores entre el rango definido por las líneas negra y roja. Esto para garantizar la profundidad mínima y máxima de cada pozo. La elección de la profundidad máxima no está restringida por Afshar (2012) y se estableció un valor de 4 metros, argumentando que si el programa logra encontrar soluciones validas en menores profundidades, el costo se disminuye siendo esto el objetivo de la investigación.

Figura 3. Distribución aleatoria de las cotas



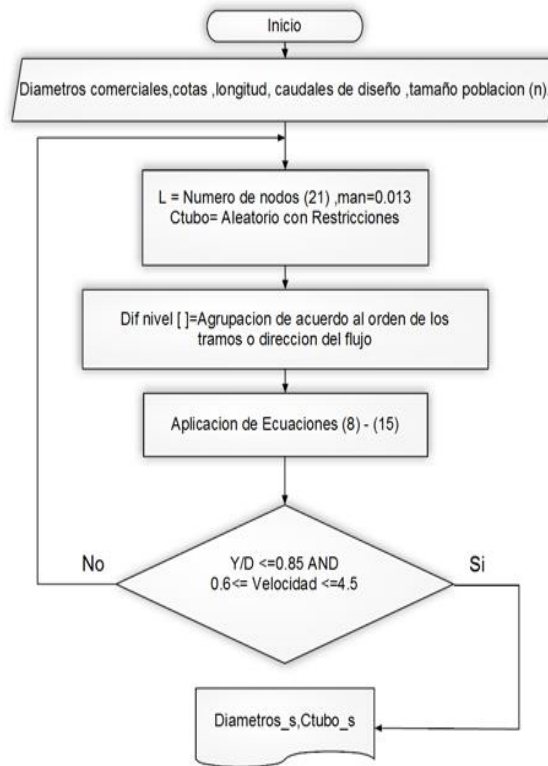
3-Las cotas asignadas en el paso anterior estaban distribuidas numéricamente del 1 al 21, sin embargo en este orden alguno nodos consecutivos no conformaban tramos de la red, citando un ejemplo los puntos (3,4) de la figura 1. Por lo que se decidió aprovechar la estructura ramificada del alcantarillado y agrupar las cotas de acuerdo a las ramas y al eje. De esta manera se permitió el cálculo de la diferencia de altura en cada tramo y con la respectiva longitud se hallaron las pendientes. Para cada configuración de cotas se calculó el diámetro requerido para transportar el caudal despejándolo de (7) y se aproximó al valor comercial.

4-En este punto se cuenta con las variables necesarias para realizar los cálculos hidráulicos de la red, por consiguiente se estimó el caudal a flujo lleno (Ecuación 7), la relación entre caudales (Ecuación 8), Ángulo según la lámina de agua (Ecuación 10), Relación entre la altura del flujo y el diámetro de la tubería (Ecuación 11), Área mojada (Ecuación 12) y velocidad real (Ecuación 13).

5-Con los resultados de los parámetros hidráulicos se planteó la condición para que el programa evalué si se cumplen los límites de velocidad y relación y/d.

6- Todo el proceso que se muestra en la figura 4 se repite para todos los diseños hidráulicos que solicite el usuario al ejecutar el programa.

Figura 4. Representación operacional de la fase de exploración



5.2 ETAPA DE EXPLOTACIÓN

Esta fase analiza y comenta todo lo relacionado a la aplicación del algoritmo genético, además de sustentar las decisiones tomadas de acuerdo a la vinculación con el sistema de alcantarillado

La evaluación de los individuos en la función de costo es el criterio que se tiene en cuenta para seleccionar los diseños más aptos y se realizó mediante la siguiente expresión. (Afshar, 2012):

$$C_p(d, H) = \begin{cases} 10.98 * d + 0.8 * H - 5.98, & d \leq 3ft, H < 10ft \\ 5.94 * d + 1.166 * H + 0.504 * H * d - 9.64, & d \leq 3ft, H \geq 10ft \\ 30 * d + 4.9 * h - 105.9 * d, & d > 3ft \end{cases}$$

(14)

$$C_m = 250 + h^2$$

Dónde:

C_p = Costo de instalación de la tubería en dólares por pie lineal.

C_m = Costo de instalación de cada pozo en dólares.

Establecer de manera adecuada esta función es un aspecto esencial para el buen desempeño del algoritmo genético, al referirse al ámbito de los sistemas de drenaje lo más común es encontrar expresiones que modelen la variable costo Afshar (2012), Montalvo et al. (2008).

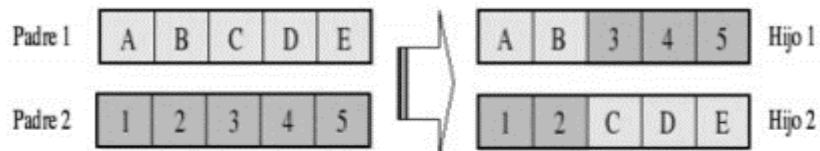
Con el fin de dar continuidad a estas líneas de investigación durante el desarrollo del método numérico, se seleccionó la suma en dinero de la red como el parámetro para medir la aptitud de los diseños. Sin embargo deducir una expresión que involucre todos los factores que inciden en el precio, no es tarea del alcance del proyecto. Por esta razón se asumió la función descrita en Afshar (2012), que ofrece 2 grandes ventajas para la programación: la primera es que sumado a la red caso estudio se tiene otro parámetro extraído del mismo documento, haciendo válida la

comparación de los resultados, la segunda es que su estructura se basa en darle mayor costo a soluciones con diámetros y profundidades grandes, aspecto que debe ser compartido por cualquier función más elaborada sobre alcantarillados pluviales.

7. Para el caso del algoritmo se establecieron 2 estrategias de selección, La primera es de tipo elitista donde se organizaron las soluciones de menor a mayor costo y se eligió la primera mitad de este listado, la segunda es el método del torneo, definido como una competencia entre parejas de soluciones. El criterio asumido para la creación de las parejas fue enfrentar los individuos más aptos con los menos favorecidos y de acuerdo a un umbral definido en 0.8 se lanzó un vector aleatorio entre 0 y 1, si el resultado estaba entre 0 - 0.8 se seleccionaba el mejor individuo de la pareja, de lo contrario el ganador sería el de mayor costo de los dos. Después del filtro se obtiene el 50% de la población.

8. Debido a que la población inicial con la que empieza el algoritmo genético cumple con todas las restricciones hidráulicas, no es recomendable realizar grandes cambios en los genes de los individuos, por este motivo se decidió trabajar el cruce de un punto y aplicarlo en las últimas posiciones de los vectores diámetros y cotas, garantizando que los hijos conserven de los padres la mayor cantidad de genes que vienen cumpliendo hidráulicamente. Ver figura 5.

Figura 5. Esquema básico de cruce de un punto. (Carretero, 2010)



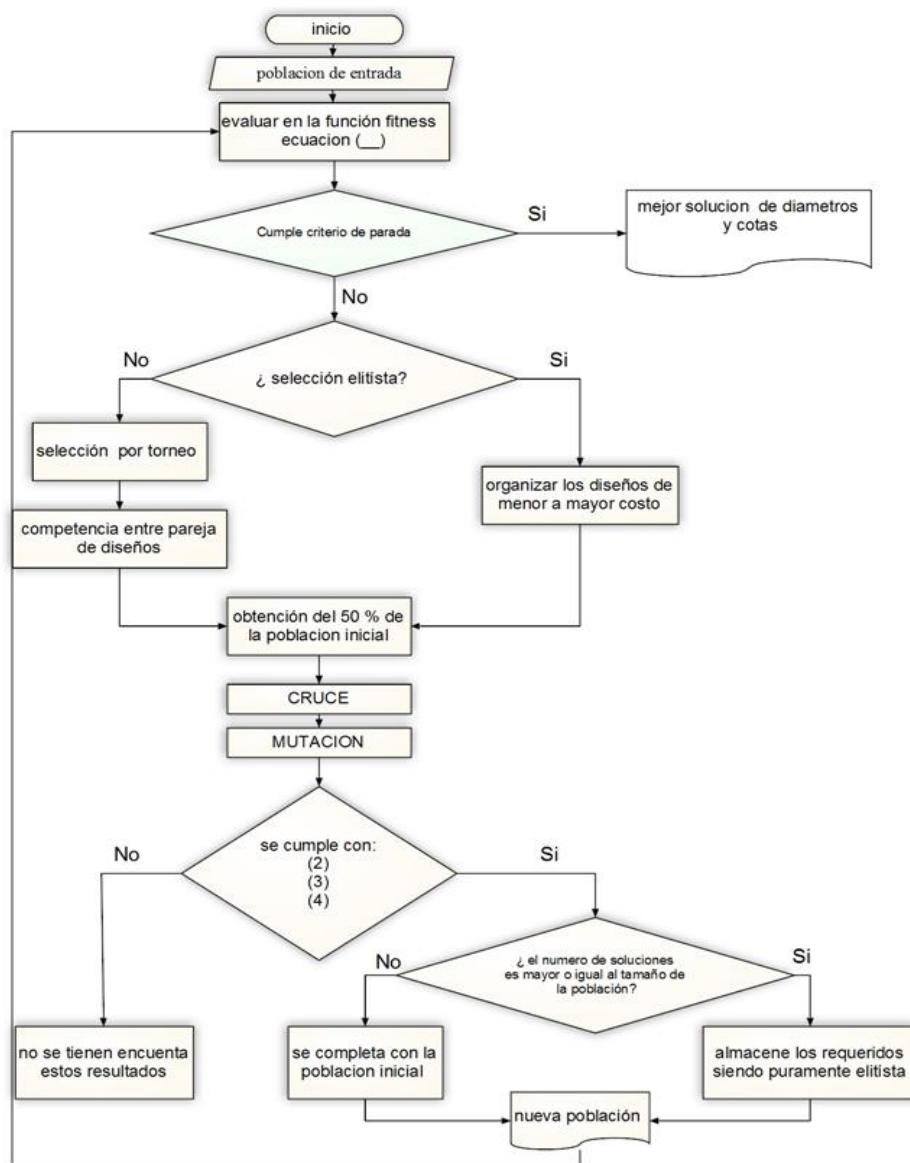
9. El siguiente operador genético se define como mutación y tiene la tarea de agregar cierta variabilidad al espacio de búsqueda, sin alterar sustancialmente los buenos resultados que produce el cruce, por tal razón el porcentaje estipulado en esta investigación fue del 5 % y solo se aplicó a la variable diámetros. La forma de realizarlo fue seleccionar al azar una posición y cambiar este valor por el anterior diámetro comercial.

10. Como resultado de la aplicación de los operadores genéticos se obtienen una cantidad de descendientes, los cuales no necesariamente cumplen con las restricciones hidráulicas por tal razón se estructura el programa a iterar hasta que obtenga la misma cantidad de soluciones validas que la población inicial, en otras palabras se configuró el modelo de tal forma que el tamaño de la población no varíe.

11. Si se presentará el caso, que después de cada generación no se encontrara el número de descendientes válidos para mantener constante el tamaño de la población, el programa completa con individuos de la generación anterior; si por el contrario sobran las soluciones, se almacenan las necesarias de manera elitista, para el que el número de individuos por generación, no varié.

12. El programa se estructuro de tal forma que el usuario pueda ingresar el número de generaciones genéticas que desea evaluar, es decir que determine el criterio de parada, a su vez se le muestre la gráfica del comportamiento del costo a medida que avanza el algoritmo, teniendo en cuenta que a mayor número de iteraciones más tiempo computacional se requiere.

Figura 6. Estructura operacional de la etapa de explotación.



6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

6.1 RESULTADOS NUMÉRICOS

6.1.1 Diseño clásico

Se elaboró un diseño tradicional de la red modelo cumpliendo las restricciones mencionadas, a la cual se le calculo el costo total con la función (14).

Tabla 5. Diseño tradicional

Tramo	Cotas (m)		Diámetro (in)	Y/D	Velocidad (m/s)
1-2	147.73	146.21	12	0.770	1.877
2-3	146.21	143.82	15	0.660	2.481
3-6	143.82	141.63	15	0.796	2.619
4-5	144.68	143.16	15	0.532	1.838
5-6	143.16	141.63	18	0.619	2.122
6-10	141.63	139.33	30	0.475	2.919
7-8	144.68	143.16	18	0.646	2.018
8-9	143.16	140.11	18	0.656	2.978
9-10	140.11	139.33	30	0.474	2.128
10-14	139.33	138.33	36	0.686	2.596
11-12	143.16	140.11	15	0.806	2.587
12-13	140.11	138.59	21	0.706	2.688
13-14	138.59	138.33	30	0.809	1.433
14-18	138.33	135	36	0.655	4.407

Tramo	Cotas (m)		Diámetro (in)	Y/D	Velocidad (m/s)
15-16	138.08	136.76	15	0.555	1.741
16-17	136.76	136.33	18	0.697	1.390
17-18	136.33	135	18	0.653	2.242
18-19	135	133.92	42	0.755	3.403
19-20	133.92	133.15	48	0.722	2.791
20-21	133.15	131.83	48	0.645	3.216

6.1.2 Mejor diseño empleando el programa

Tabla 6. Diseño alcanzado por fase de exploración.

Tramo	Cotas (m)		Diámetro (in)	Velocidad (m/s)
1-2	149.81	147.84	12	2.934
2-3	147.84	145.18	15	2.589
3-6	145.18	143.7	18	2.328
4-5	146.61	145.25	15	1.762
5-6	145.25	143.7	18	2.132
6-10	143.7	140.56	30	3.274
7-8	145.9	145.32	21	1.400
8-9	145.32	142.1	18	3.044
9-10	142.1	140.56	21	2.703
10-14	140.56	138.57	30	3.309
11-12	144.99	141.38	15	2.797
12-13	141.38	140.82	30	1.880

Tramo	Cotas (m)		Diámetro (in)	Velocidad (m/s)
13-14	140.82	138.57	21	3.284
14-18	138.57	135.58	36	4.218
15-16	139.73	138.24	15	1.824
16-17	138.24	137.29	15	1.853
17-18	137.29	135.58	18	2.478
18-19	135.58	134.8	48	3.064
19-20	134.8	134.11	48	2.660
20-21	134.11	132.09	42	3.753

6.1.3 Mejor diseño según afshar, (2012)

Tabla 7. Diseño según Afshar (2012).

Tramo	Cotas (m)		Diámetro (in)	Velocidad (m/s)
1-2	150	148.48	12	1.877
2.-3	148.48	146.08	15	2.479
3-6	146.08	143.9	15	2.615
4-5	146.95	145.4	12	1.779
5-6	145.4	143.9	18	2.1
6-10	143.9	140.66	21	3.185
7-8	146.95	144.66	15	2.278
8-9	144.66	142.38	18	2.639
9-10	142.38	140.66	21	2.829

Tramo	Cotas (m)		Diámetro (in)	Velocidad (m/s)
10-14	140.66	138.31	30	3.568
11-12	145.43	142.38	15	2.586
12-13	142.38	140.86	21	2.693
13-14	140.86	138.31	21	3.462
14-18	138.31	136.25	36	3.594
15-16	140.25	138.7	12	1.776
16-17	138.7	137.81	15	1.798
17-18	137.81	136.25	18	2.389
18-19	136.25	135.06	42	3.551
19-20	135.06	133.87	42	3.225
20-21	133.87	132.24	42	3.407

6.2 VALIDACIONES

Tabla 8. Resumen costos totales de la red

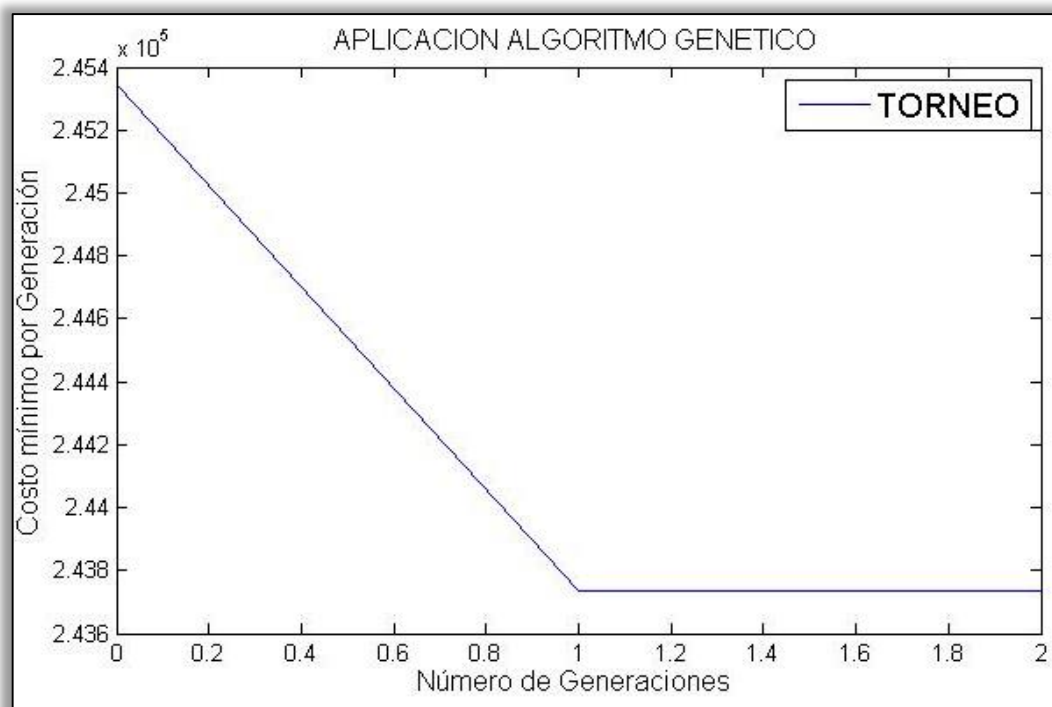
COSTO TRADICIONAL	COSTO ÓPTIMO INVESTIGACIÓN	COSTO ÓPTIMO LITERATURA
328.015 US	236.625 US	241,986 US

- Al realizar la comparación entre en las tablas 5 y 6, se observa que el programa calculó datos coherentes con respecto de las restricciones hidráulicas, generando una reducción del 28 % en el costo total, con respecto, a la forma tradicional.

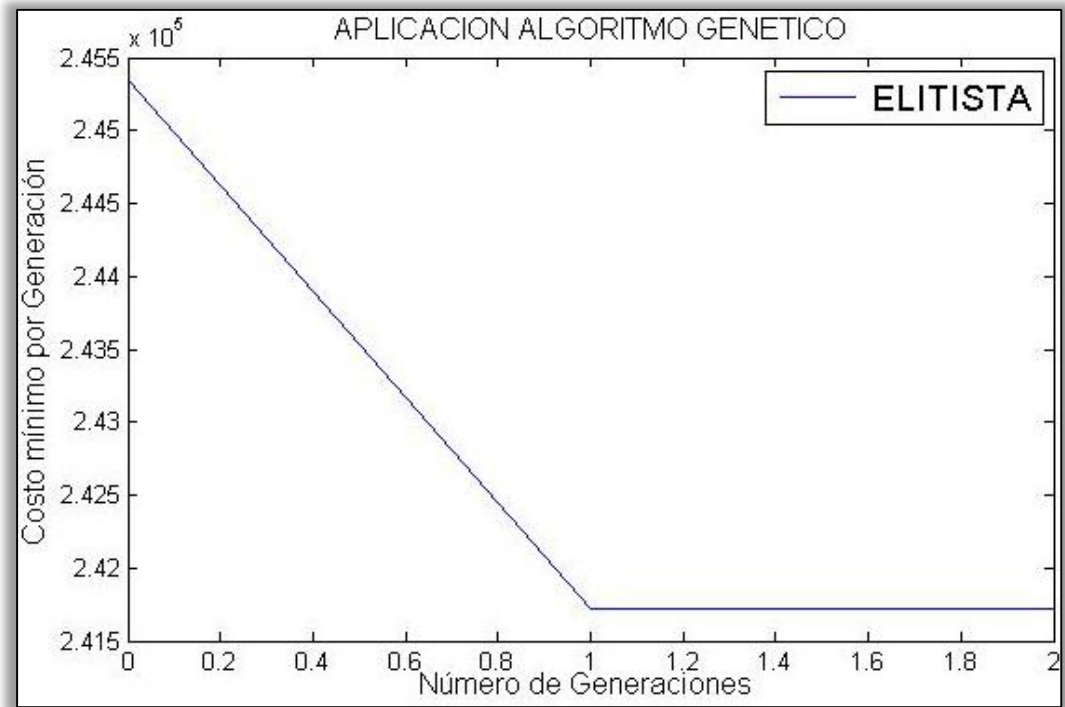
- El mejor diseño obtenido en Afshar (2012) tiene un costo asociado de 241,986 US, si se compara con la solución óptima que propone esta investigación, se puede afirmar que la reducción en los costos es aproximadamente el 3 %; cabe aclarar, que este trabajo manejo un límite de velocidad superior, estimado en 4.5 m/s y no utiliza métodos de penalización para la función objetivo, aspectos que no permiten un 100% de exactitud en los parámetros a comparar.

6.2 RESULTADOS GRÁFICOS

Gráfica 1. Población = 30, 2 generaciones por torneo



Gráfica 2. Población = 30, 2 generaciones por elitista



Los mejores costos de la explotación aplicadas a poblaciones de 30 dieron como resultado 243.730 US y 241.720 US, correspondientes a las gráficas 1 y 2 respectivamente. Cabe aclarar que en los dos casos las iteraciones iniciaron con los mejores valores de la fase de exploración.

Gráfico 3. Población = 50, 2 generaciones por torneo

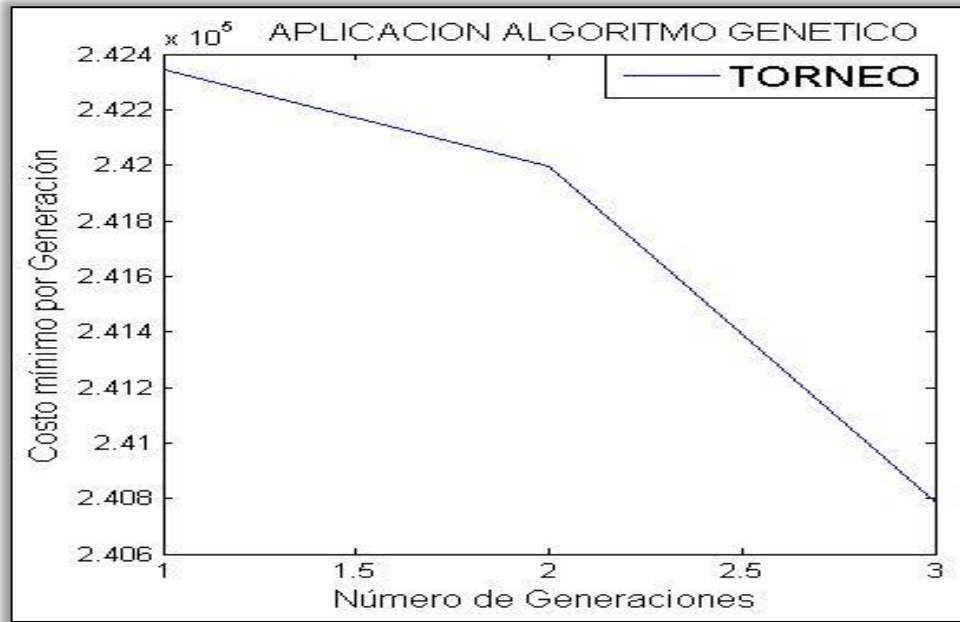
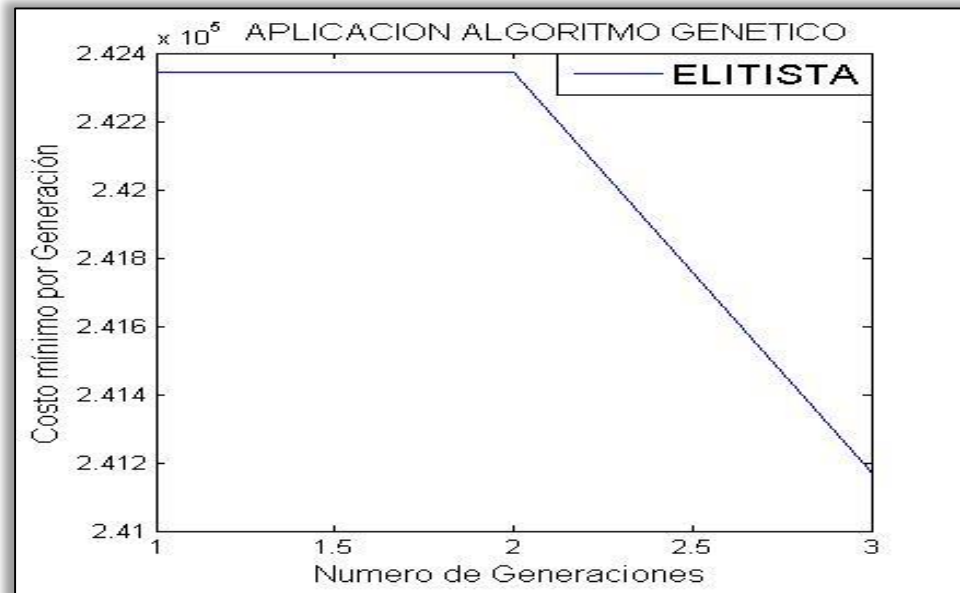
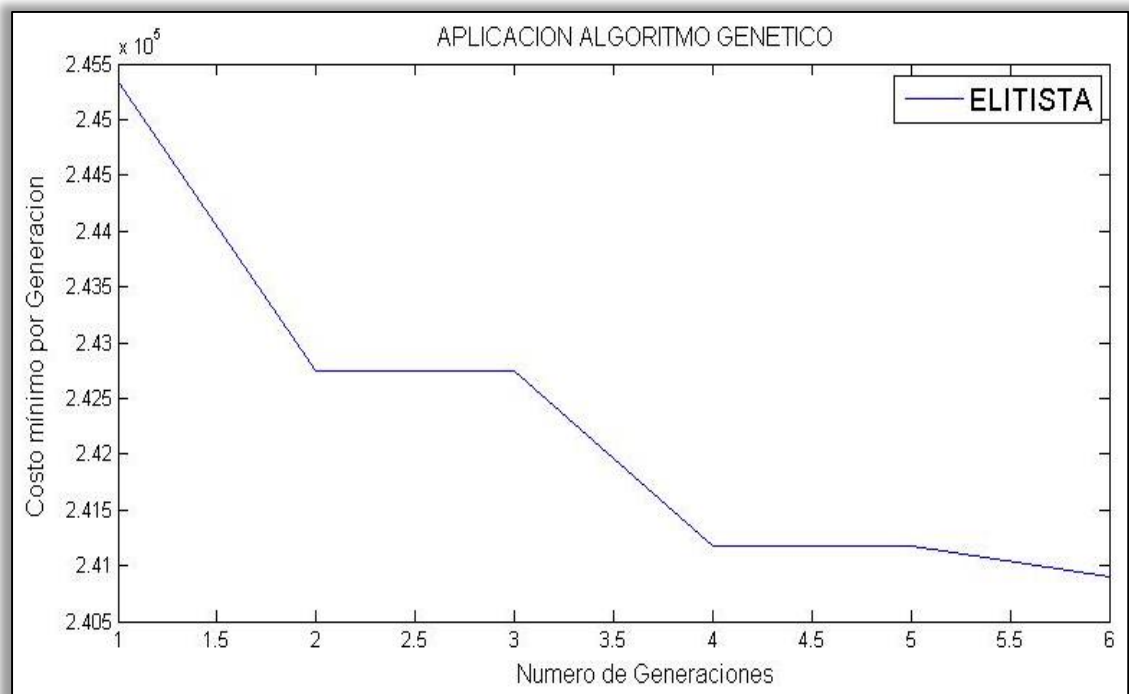


Gráfico 4. Población = 50, 2 generaciones por elitista

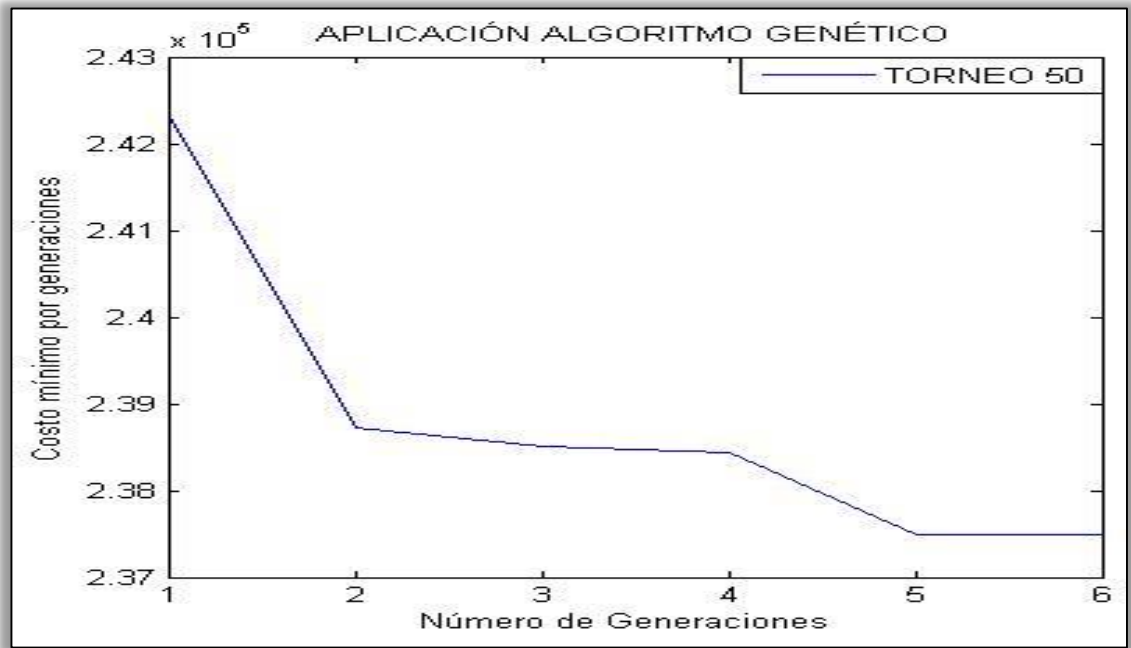


Los mejores costos de la explotación aplicadas a poblaciones de 50 dieron como resultado 240.780 US y 241.170 US, correspondientes a las gráficas 3 y 4 respectivamente. Cabe aclarar que en los dos casos las iteraciones iniciaron con los mejores valores de la fase de exploración.

Gráfica 5. Población = 30, 5 generaciones por elitista



Gráfica 6. Población = 50, 5 generaciones por torneo



Ante la notoria demora computacional presentada en el transcurso de los resultados, se logra obtener las gráficas 5 y 6, donde se ejecutó el programa con 5 iteraciones aplicando el algoritmo, obteniendo un costo de 240.900 US y 237.470 US respectivamente, se presume una mejoría a mayor número de generaciones.

Tabla 9. Resumen de los resultados para los distintos ensayos

MODELO	COSTO (US)
Presentado con la literatura	241.986
Diseño Tradicional	328.015
2- Generaciones población 30	
Elitista	241.720
Torneo	243.730
2- Generaciones población 50	
Elitista	241.170
Torneo	240.780
5- Generaciones población 30	
Elitista	240.900
5- Generaciones población 50	
Torneo	237.470
Fase exploración	
Población 100	236.630

7. CONCLUSIONES

- El método presentado en este trabajo es un algoritmo genético adaptado, el cual se divide en dos etapas, la fase de exploración, encargada de generar las poblaciones, y la fase de explotación dedicada a la realización de iteraciones genéticas, dándoles continuidad a los individuos obtenidos en la fase de exploración.
- La ejecución independiente de la fase de exploración reduce significativamente los costos de la red para tamaños grandes de la población, si se compara con la forma tradicional de diseño, los porcentajes de ahorro son del orden del 28 %, como se evidencia en la sección 6.1, dedicada a las validaciones de resultados numéricos.
- La superioridad de la solución planteada sobre los demás ensayos de menor población, donde si se aplica el algoritmo genético, se debe a la gran demanda computacional que exigen los AG, mostrado en la sección 6.3 - Resultados gráficos, en donde el número de generaciones que se logró evaluar son 2 y 5, aspecto que no permite observar el total desarrollo de esta técnica, pero que da indicios de la tendencia a disminuir del costo con el avance del AG adaptado.
- La parte de la investigación referido a la selección del algoritmo idóneo, se cumplió de manera satisfactoria y los aspectos específicos lo muestran la sección 3 de este documento. Por otro lado según lo descrito en el alcance de este estudio, se elaboró la programación planeada y los soportes de la misma se presentan en la sección 5 con el respectivo anexo 1

8. RECOMENDACIONES

- Enfocar la programación hacia la inclusión del tiempo computacional como parte importante del problema.
- Realizar modelos que no idealicen los sistemas de alcantarillados y elaboren funciones de costo en detalle.
- Algunos de los parámetros del diseño hidráulico que no fueron contemplados en el alcance del proyecto, se pueden configurar en el programa mediante pequeñas adiciones en puntos específicos.
- Aunque no es el enfoque del proyecto, el programa se puede utilizar como una herramienta pedagógica para temas que contemplen los alcantarillados evitando los tediosos cálculos manuales.

BIBLIOGRAFÍA

- AFSHAR, M.H. *Application of a Genetic Algorithm to storm sewer network optimization*. Scientia Iranica, 234-244 (2006).
- AFSHAR M.H., *a parameter free continuous ant colony optimization algorithm for the optimal design of storm sewer networks: constrained and unconstrained approach*, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, 188-195, (2009).
- AFSHAR MH, SHAHIDI M, ROHANIA M, SARGOLZAEI M. *Application of cellular automata to sewer network optimization problems*. Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran Sci. Iran., 1, 304–12, (2011)
- AFSHAR, M., *Rebirthing genetic algorithm for storm sewer network design*. Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran Sci. Iran., 11-19. (2012)
- ARGAMAN, Y., SHAMIR, U., SPIVAK, E. *Design of optimal sewerage systems*. ASCE, 703-716. (1973).
- CARRETERO F. *Optimización global con algoritmos genéticos* [tesis pregrado]. Universidad politécnica de Cataluña, Barcelona. (2010)
- DAJANI, J.S., HASIT, Y. "Capital cost minimization of drainage networks". J. Environ. Eng.-ASCE, 100(2), 325-337. (1974).
- DEININGER, R.A., *Computer aided design of waste collection and treatment systems*. 2nd Annual Conf. of American Water Resources, Chicago, USA, pp. 247-258. (1966).

- I. MONTALVO, J. IZQUIERDO, R. PEREZ, M. TUNG, *Particle Swarm Optimization applied to the design of water supply systems*, Computers and Mathematics with Applications, 769–776. (2008).
- MAYS, L.W., YEN, B.C., *Optimal cost design of branched sewer systems*. Water Resour., 37-47. (1975).
- NICKLOW, J.W., REED, P.M., SAVIC, D., DESSALEGNE, T., HARRELL, L., CHAN-HILTON, A., KARAMOUZ, M., MINSKER, B., OSTFELD, A., SINGH, A., ZECHMAN, E., *State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management*. J. Water Resour. Plan. Manag. ASCE 136 (4), 412-432. (2010).
- PRICE, R.K., *Design of storm water sewers for minimum construction cost*. 1st Int. Conf. On Urban Storm Drainage, Southampton, UK, pp. 636 -647. (1978).
- RANI, D., MOREIRA, M.M., 2010. *Simulation-optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation*. Water Resour. Manage. 24 (6), 1107-1138
- RECA J, MARTÍNEZ J., *Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks*. Water Resour. (2006)
- RECA, J., MARTINEZ C., Baños R., *application of several meta-heuristic techniques to the optimization of real looped water distribution networks*, water resource manage 22: 1367-1379, (2008).

- ROHANI, M., AFSHAR M.H., *sewer networks optimization using cellular automata*, Univer. Of Science and Tech, Tehran, Iran, 1, (2014).
- SIMPSON A. R., DANDY G.C., MURPHY L.J., *Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization*. J Water Resour Planning Manage, ASCE, 423–4. (1994).
- TORRES, Camargo J. C. *Manual didáctico para la asignatura de acueductos y alcantarillados*. [Tesis de grado], Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, (2008)
- WALTERS, G.A., *A review of pipe network optimization techniques*. Pipeline Systems, Manchester, UK, pp. 3-13. (1992).
- WENG H.T., S. LIAW, W HUANG. *Establishing an optimization model for sewer system layout with applied genetic algorithm*, Environ. Inform. Archives 2 781–790. (2005)

ANEXOS

ANEXO A

Programación del algoritmo en matlab.

```
%% Creo la población inicial.
```

```
load Base_datos.mat %Vectores base de datos
```

```
n=input('ingrese tamaño población: ');%numero de soluciones o tamaño de la  
población para el caso de algoritmos genético
```

```
G=input('ingrese cantidad de cruces genéticos: ');%Numero de generaciones  
deseadas
```

```
archivo='Poblacion_50_4.5_0.85.mat';
```

```
% Si vale 1 es elitista, con 0 por torneo
```

```
selec = 1;
```

```
%Población_ini(n,archivo);
```

```
%return
```

```
load(archivo);
```

```
n=size(ctubo_s,1);
```

```
% for i=1:size(ctubo_s,1)
```

```
%   flag=restricciones(ctubo_s(i,:),diámetros_s(i,:));
```

```
%   [i flag]
```

```
% end
```

```
%% Cálculo de los valores costo de cada individuo.
```

```
phi = función_costo(ctubo_s,diámetros_s);
```

```
%Ordeno de menor a mayor costo.
```

```
ctubo_s=sortrows([phi ctubo_s]);
```

```
ctubo_s=(ctubo_s(:,2:end));
```

```
diámetros_s=sortrows([phi diámetros_s]);
```

```
diámetros_s=(diámetros_s(:,2:end));
```

```
%% Iteraciones de generaciones
```

```
% figure(10)
```

```
% plot(0,min(min(phi)),'*r');
```

```
% hold on
```

```
% grid on
```

```
v_phi=zeros(1,G+1);
```

```
ctubo_best=zeros(G+1,21);
```

```
diametro_best=zeros(G+1,20);
```

```
% Guardo el mejor individuo inicial
```

```
ctubo_best(1,:)=ctubo_s(1,:);
```

```
diametro_best(1,:)=diametros_s(1,:);
```

```
v_phi(1)=min(min(phi));
```

```
for ig=1:G
```

```

%función selector por elitista o torneo
[ctubo_sp, diametros_sp] = selector(ctubo_s,diametros_s,selec);

[ctubo_hijo,diametros_hijo]=Alg_genetico(ctubo_sp,diametros_sp);

a=size(ctubo_hijo,1);
if a<n %%Corrección para generaciones de tamañ½o inferior a poblaci½n
inicial
    ctubo_hijo=[ctubo_hijo;ctubo_s(1:(n-a),:)];
    diametros_hijo=[diametros_hijo;diametros_s(1:(n-a),:)];
end

%Evaluación de los costos de los hijos
phi=funcion_costo(ctubo_hijo,diametros_hijo);
phi_mejor_padre = funcion_costo(ctubo_s(1,:),diametros_s(1,:));

if min(phi)>phi_mejor_padre
    ctubo_hijo=[ctubo_hijo;ctubo_s(1,:)];
    diametros_hijo=[diametros_hijo;diametros_s(1,:)];
    phi=funcion_costo(ctubo_hijo,diametros_hijo);
end

ctubo_hijo=sortrows([phi ctubo_hijo]);
ctubo_hijo=(ctubo_hijo(:,2:end));
diametros_hijo=sortrows([phi diametros_hijo]);
diametros_hijo=(diametros_hijo(:,2:end));

%Acoto nuevamente al tamañ±o inicial

```

```

ctubo_s=ctubo_hijo(1:n,:);
diametros_s=diametros_hijo(1:n,:);

phi=funcion_costo(ctubo_s,diametros_s);

fprintf('\nIteracion genetica %d phi minimo %f\n',ig,min(phi));

% figure(10)
% plot(ig,min(min(phi)),'*r');
v_phi(ig+1)=min(min(phi));
ctubo_best(ig+1,:)=ctubo_s(1,:);
diametro_best(ig+1,:)=diametros_s(1,:);
end
% figure(10)
plot(0:G,v_phi);

save('Resultado_5_generaciones_eli_pobl_50_tor.mat','v_phi','ctubo_best','diametr
o_best');

```