



Quinto
Congreso Nacional
de Riego y Drenaje
COMEII-AURPAES 2019

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



AURPAES, S.C.

Artículo: COMEII-19021

Mazatlán, Sin., del 18 al 20

de septiembre de 2019

DISEÑO DE REDES DE RIEGO MEDIANTE ALGORITMOS DE EVOLUCIÓN DIFERENCIAL Y COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS

Mario Alberto Ponce Pacheco^{1*}; Irineo L. López Cruz²

¹Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 carretera México - Texcoco, Chapingo, Estado de México. C.P. 56230

mappacheco24@gmail.com - 553 218 1197 (*Autor de correspondencia)

²Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 carretera México - Texcoco, Chapingo, Estado de México. C.P. 56230

Resumen

En el riego agrícola comúnmente se utilizan redes hidráulicas abiertas, con la finalidad de abastecer las tomas en las parcelas y así satisfacer la demanda de agua para la producción agrícola. En el diseño óptimo económico de redes de riego se pueden diferenciar dos etapas importantes: el trazo, que consiste proponer una configuración de la red que abastezca a las tomas usando la menor longitud de tubería; y el dimensionamiento, que consiste en determinar el diámetro de cada tramo de tubería que genere el menor costo posible, respetando restricciones de velocidad dentro de la tubería y presión requerida en la toma. Existen técnicas tradicionales para la resolución de estos problemas, como programación lineal en el caso del dimensionamiento y el método de Girette para el trazo.

En el presente trabajo se propone el uso de los métodos heurísticos de búsqueda global Evolución Diferencial (ED) y Colonia Artificial de Abejas (CAA) que son un tipo de algoritmos evolutivos y bio-inspirados respectivamente. ED es un algoritmo basado en el proceso natural de evolución utilizando las operaciones de mutación, cruzamiento y selección. CAA es un algoritmo inspirado en el comportamiento de un enjambre de abejas melíferas para obtener fuentes de alimento. Los resultados mostraron que ambos métodos heurísticos son factibles de usarse para diseñar redes de riego y tienen ventajas potenciales sobre los métodos tradicionales.

Palabras clave: Optimización, algoritmos evolutivos, algoritmos bio-inspirados, optimización combinatoria, redes de tuberías.



Introducción

En México el método de riego mayormente usado es el de gravedad lo que representa grandes pérdidas de agua; sin embargo, el riego presurizado cobra cada vez más importancia debido a sus altas eficiencias de conducción y aplicación. Para hacer un uso más eficiente del agua e incrementar la producción de alimentos necesarios para satisfacer la demanda nacional y mundial, el diseño de sistemas de riego debe hacerse de manera óptima, es decir; utilizar el menor volumen de agua posible a un menor costo. Dentro del diseño de sistemas de riego una parte fundamental son las redes abiertas de tubería para riego.

El dimensionamiento económico de redes de riego consiste fundamentalmente en plantear y resolver un problema de optimización para minimizar el costo total de la red, sujeto a un conjunto de restricciones hidráulicas (Ángeles, 2002). Tradicionalmente, éste se resuelve mediante el método de los multiplicadores de Lagrange, Programación Dinámica, Programación Lineal o el método discontinuo de Labye. No se debe descartar la posibilidad de encontrar una solución óptima bajo los métodos convencionales o con ayuda de la experiencia del proyectista; sin embargo, es importante contar con un método confiable, que facilite el procedimiento y reduzca los tiempos del proyecto. El hecho de alcanzar un óptimo global es un supuesto, ya que debido al aumento de complejidad del problema con el número de variables este se vuelve prácticamente irresoluble, sin embargo, se busca encontrar una solución factible en un tiempo corto.

El objetivo del presente trabajo es evaluar las ventajas de usar métodos de optimización global, como los algoritmos de Evolución Diferencial (Storn y Price, 1995) y Colonia Artificial de Abejas (Karaboga y Basturk, 2007) en el diseño de una red de riego presurizado. Se modeló una función objetivo que describe el costo de un sistema de riego presurizado en función de su trazado y dimensionamiento. Dicha función fue minimizada mediante métodos de optimización clásicos (Programación lineal), y también mediante el uso de algoritmos de evolución diferencial y colonia artificial de abejas, con la finalidad de comprobar el beneficio del uso de algoritmos estocásticos sobre métodos convencionales.

Materiales y Métodos

El problema de diseño de redes hidráulicas para riego

El proceso total de diseño de las redes de distribución de agua consiste en tres partes: trazo, diseño y operación. A pesar de que cada fase es dependiente de las otras, éstas pueden ser formuladas y resueltas como problemas independientes. Entonces el proceso completo de diseño es llevado a cabo por iteraciones de estas tres fases (Eiger et al., 1994).

El problema del trazo se puede abordar suponiendo que se tiene un conjunto de tomas parcelarias que se desea abastecer desde una sola fuente de abastecimiento de agua o planta de bombeo (uno de los supuestos de la presente investigación es solo disponer de un punto de abastecimiento). Además, existe total libertad para poder pasar un tramo de tubería por donde se desee y no solamente respetando los linderos.

Una red abierta de n tomas (tomando en cuenta el punto de bombeo), al no tener ciclos dentro de ella, tiene $n - 1$ tramos de tubería. Entonces debido a que no existe la restricción del trazo por linderos se tiene la libertad de unir cada punto con el que se desee, resultando así una gran variedad de posibles soluciones. La manera como se representaron estas soluciones fue mediante la implementación de un arreglo de abastecimiento o vector “a” cómo se manejó en la investigación. En este arreglo el valor contenido en el i -ésimo elemento de a señala desde que punto es abastecida la i -ésima toma parcelaria. Así se puede entender que para el vector $a = [0,1,2,2,3]$ la toma 2 es abastecida desde la 1, las tomas 3 y 4 desde la 2, y la 5 desde el punto 3. Es importante hacer notar que la toma 1 no es suministrada de ninguna otra toma porque se trata del bombeo (por convención este valor siempre será 0 y se debe ubicar en el primer elemento del arreglo). El inconveniente presente en esta propuesta es que si el i -ésimo elemento contiene el valor i este punto sería teóricamente abastecido por sí mismo, lo que carece de sentido, por lo que en la función de costo se penaliza por el número de tomas que no son abastecidas. Entonces una primera aproximación de la función objetivo es la siguiente:

$$\min f(\pi) = \sum_{i=2}^n d_{i,\pi_i} \cdot (\text{Penalty}_a + 1) \quad (1)$$

$$d(vx, vy, vz)_{i,\pi_i} = \sqrt{(vx_i - vx_{\pi_i})^2 + (vy_i - vy_{\pi_i})^2 + (vz_i - vz_{\pi_i})^2} \quad (2)$$

$$\text{Penalty}_a = \sum_{i=2}^n P_{a_i} \quad (3)$$

$$P_{a_i} = \begin{cases} 1, & \text{si la toma } i \text{ no es abastecida} \\ 0, & \text{si la toma } i \text{ es abastecida} \end{cases} \quad (4)$$

donde d_{i,π_i} es la distancia a la toma i desde la toma que abastece, según la permutación π , y es calculada por la ecuación 2. Penalty_a es la penalización por no abasto de alguna toma descrita en las ecuaciones 3 y 4. Nótese que la penalización es tomada en cuenta en forma de producto en la función objetivo y no como una suma, esto debido a que, el valor se incrementa considerablemente con cada penalización.

Cuando se desean unir tres puntos A, B y C de tal manera que se formen segmentos \overline{AB} y \overline{BC} , y el ángulo ABC sea menor a 120° , la distancia total se puede minimizar a proponer un punto auxiliar P_{aux} de tal manera que formen segmentos $\overline{AP_{aux}}$, $\overline{BP_{aux}}$ y $\overline{CP_{aux}}$, y sus ángulos $\angle AP_{aux}B$, $\angle AP_{aux}C$ y $\angle BP_{aux}C$ sean de 120° . Tomando en consideración lo anterior se propone como incógnita al problema además de la configuración de la red, algunos puntos auxiliares para realizar el trazo a 120° , para ello se modifica la ecuación 1 de la siguiente manera:

$$\min f(x) = \sum_{i=2}^n d_{i,\pi_i} \cdot (Penalty_a + 1) \quad (5)$$

$$x = [\pi, v_{x_{aux}}, v_{y_{aux}}, v_{z_{aux}}] \quad (6)$$

donde $v_{x_{aux}}, v_{y_{aux}}, v_{z_{aux}}$ son las coordenadas de las tomas auxiliares que se proponen. De manera que de no ser necesarios estos puntos las coordenadas resultantes en la optimización coincidirán con las de algún punto existente, por lo que no hay una restricción en cuanto el número de estos puntos, sin embargo, la dimensión del problema crece contablemente con cada punto adicional.

Pérez et al. (2006) señalan que el diseño económico de redes de distribución de agua está muy relacionado con la Programación Matemática, debido a que se puede encontrar infinitas soluciones funcionalmente válidas, y el criterio de minimizar los costos del sistema nos permite seleccionar una opción concreta de entre las infinitas posibilidades. También indican que el modelo de Programación Lineal es una de las opciones más destacadas, debido a que la oferta de software estándar es muy amplia y además, la aplicación del modelo de PL en el diseño no necesita de ninguna aproximación.

El diseño de una Red de Distribución de Agua nueva consiste en determinar los diámetros de cada una de las tuberías que la conforman dados un caudal de consumo en cada uno de los nodos fijado por la demanda de agua potable y una presión mínima en las horas de máximo consumo fijada por una norma local. Para llevar a cabo dicha tarea, desafortunadamente es necesario hacer uso de alguna metodología especial debido a que el número de ecuaciones disponibles es inferior al número de incógnitas (Saldarriaga, 2008).

Valdez (1990) menciona que si la red está alimentada por gravedad el diámetro está completamente definido, sin embargo, si está alimentada por bomba, el problema tiene múltiples soluciones y la “mejor” se decide por condiciones económicas. En efecto, si el diámetro es pequeño, la pérdida de carga es grande y entonces habrá que usar una bomba de carga elevada que logre vencer las pérdidas, siendo por esta razón muy elevado también el costo de la impulsión. Por el contrario, si el diámetro es grande, la pérdida de carga es pequeña y la altura a elevar el agua será menor, lo que significa menor costo de bombeo, pero el costo de la tubería es mayor que en el primer caso.

Para el problema de dimensionamiento se tiene previamente un trazo de la red. Primeramente, el problema del dimensionamiento se abordó como encontrar la combinación de diámetros que minimicen el costo de la red, considerando que cada tramo de tubería solo puede tener un solo diámetro. Además, es importante hacer notar que a cada diámetro le corresponde un costo por metro lineal. Sin embargo, hay que contemplar restricciones de velocidades permisibles dentro de la tubería y verificar la presión que llega a cada toma hidráulica.

$$f(\pi) = \left(\sum_{i=1}^{n-1} C_{\pi(i)} \cdot L_i + C_B \cdot H_B \right) \cdot (Penalty_{vel} + 1) \cdot (Penalty_H + 1) \quad (7)$$

donde L_i es la distancia de la tubería que abastece al punto i , C_B es el coeficiente costo por gasto de bombeo, H_B es la carga de bombeo, C_j es el costo por metro lineal del diámetro j de los m diámetros de diseño. En las ecuaciones 8 y 9 se define la penalización por incumplir la restricción de velocidad, mientras que en las ecuaciones 10 y 11 se muestra como se toman en cuenta la penalización por incumplimiento de la restricción de carga de presión mínima en la toma.

$$Penalty_{vel} = \sum_{i=2}^n P_{v_i} \quad (8)$$

$$P_{vel_i} = \begin{cases} 1, & \text{si la velocidad en la tubería} \\ & i \text{ es mayor o menor que las} \\ & \text{permisibles} \\ 0, & \text{la velocidad esta en rango permisible} \end{cases} \quad (9)$$

$$Penalty_a = \sum_{i=2}^n P_{H_i} \quad (10)$$

$$P_{H_i} = \begin{cases} 1, & \text{si la presión toma } i \text{ es menor a la requerida} \\ 0, & \text{la presión de en la toma } i \text{ es superior a la demandada} \end{cases} \quad (11)$$

En una segunda función muy similar a la ecuación 7 se abordó el problema desde otro punto de vista, esta vez no se quiso obtener la combinación de diámetros que minimizaran el costo de la red, sino los valores que lo hacen, convirtiéndose en un problema de variable continua. Para esto se debe considerar al costo por metro lineal como una función del diámetro cuya relación es conocida (ecuación 12), donde k_1 y k_2 son coeficientes de ajuste. De esta manera se obtiene la ecuación 13, con el inconveniente que esta función objetivo arroja diámetros que no existen y hay que realizar un ajuste posterior.

$$C(D) = k_1 \cdot D^{k_2} \quad (12)$$

$$f(\pi) = \left(\sum_{i=1}^{n-1} k_1 \cdot D_i^{k_2} \cdot L_i + C_B \cdot H_B \right) \cdot (Penalty_{vel} + 1) \cdot (Penalty_H + 1) \quad (13)$$

Finalmente se planteó una tercera función objetivo (ecuación 14) para el dimensionamiento donde se hace el supuesto de que cada tramo de tubería puede contener o no todos los m diámetros propuestos, pero éstos se encuentran de manera telescopiada, es decir se disponen en un orden de mayor a menor diámetro a favor del flujo del agua. En este caso se plantea encontrar la distancia normalizada ($x_{i,j}$) que ocupa el j -ésimo diámetro dentro del i -ésimo tramo de tubería. De esta manera el problema crece dimensionalmente.

$$f(x) = \left[\sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{j=1}^m C_j \cdot \frac{x_{m \cdot (i-1) + j}}{\sum_{k=1}^m x_{m \cdot (i-1) + k}} \cdot L_i \right) + C_B \cdot H_B \right] \cdot (Penalty_{vel} + 1) \cdot (Penalty_H + 1) \quad (14)$$

Algoritmos de evolución diferencial

El algoritmo de evolución diferencial (ED)(DE, por sus siglas en inglés) es un método de búsqueda estocástico que es originalmente motivado por mecanismos de selección natural. Como otros algoritmos evolutivos, el algoritmo ED es también un algoritmo basado en la manipulación de una población. La población de un ED es sujeto a tres operadores: mutación, cruzamiento y selección (Tang y Guan, 2009).

Karaboga y Akay (2009) señalan que evolución diferencial es un algoritmo basado en población como los algoritmos genéticos usando operadores similares; cruzamiento, mutación y selección. Sin embargo, la diferencia principal en la construcción de mejores soluciones es que los algoritmos genéticos se confían en el cruzamiento mientras que ED lo hace en la mutación. Esta operación principal se basa en las diferencias de los pares aleatoriamente muestreados de la población. El algoritmo utiliza la operación de mutación como un mecanismo de búsqueda y operación de selección para dirigir la búsqueda hacia las regiones las regiones prospectivas en el espacio de búsqueda. El algoritmo ED además utiliza un cruce no uniforme en el que un hijo puede tomar parámetros vectoriales de un padre más a menudo de lo que lo hacen los demás. Mediante el uso de los componentes de los miembros de la población existente para construir vectores prueba, el operador de recombinación (cruzamiento) eficientemente explota información acerca de combinaciones exitosas, permitiendo la búsqueda de un mejor espacio de solución. En la evolución diferencial, una población de vectores solución es creada de forma aleatoria en un inicio. Esta población mejora con éxito mediante la aplicación de los operadores de mutación, cruzamiento y selección. En el algoritmo ED, cada nueva solución producida compite con un vector mutante y el mejor gana la competencia.

Brest et al. (2006) mencionan que los algoritmos de Evolución Diferencial tienen tres parámetros:

F: Factor de mutación.

CR: Probabilidad de cruzamiento.

NP: Número de individuos en la población de soluciones (Tamaño de la población)

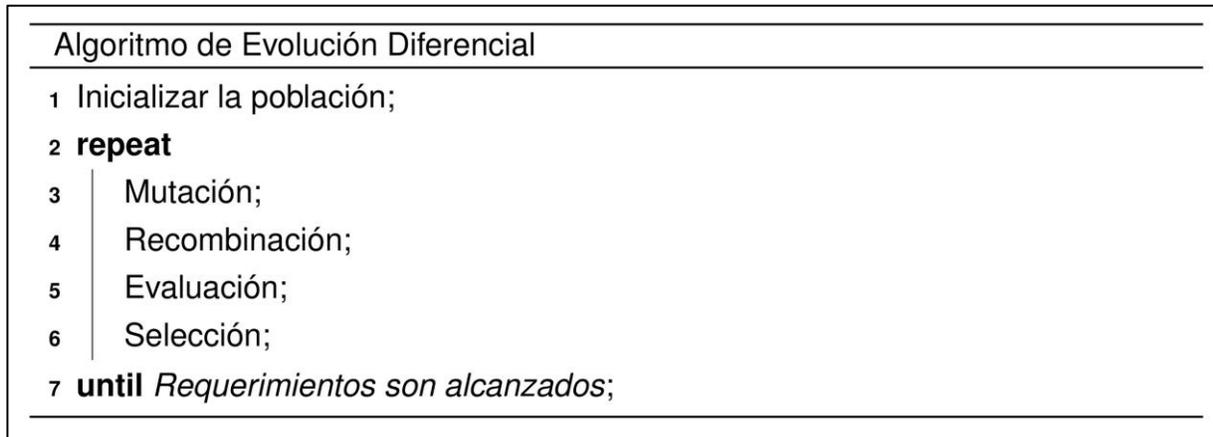


Figura 1. Pseudocódigo del algoritmo de Evolución Diferencial.

Algoritmo colonia artificial de abejas

De acuerdo con Karaboga y Basturk (2007) la inteligencia de enjambre es un área de investigación que modela la población de agentes inteligentes o enjambres que son capaces de auto-organizarse. Los Algoritmos de Colonia Artificial de Abejas (ABC, por sus siglas en inglés) basan su comportamiento en un enjambre de abejas.

De los Cobos et al. (2010) señalan que la inteligencia de enjambre es un tema que ha surgido en los últimos veinticinco años, debido al interés en resolver problemas de manera colectiva sin un control centralizado.

En el algoritmo de colonia artificial de abejas, la posición de una fuente de comida representa una posible solución al problema de optimización y la cantidad de néctar de la fuente de alimento corresponde a la calidad (aptitud) de la solución asociada. El número de abejas empleadas o abejas espectadoras es igual al número de soluciones en la población. En el primer paso, el ABC genera una población inicial distribuida al azar P ($C = 0$) de SN soluciones (posición de fuente de alimento), donde SN denota el tamaño de las abejas empleadas u observadoras. Cada solución x_i , $i = 1, 2, \dots, SN$ es un vector D -dimensional. Donde, D es el número de parámetros para la optimización. Después de la inicialización, la población de las posiciones (soluciones) está sujeto a ciclos repetidos, $C = 1, 2, \dots, MCN$, del proceso de búsqueda de abejas empleadas, observadoras y exploradoras. Una abeja empleada produce una modificación en la posición (solución) en su memoria dependiendo de la información local (información visual) y examina la cantidad de néctar (valor de aptitud) de una nueva fuente (nueva solución). Si la cantidad de néctar de la nueva es más alto que el valor previo, la abeja memoriza la nueva posición y olvida la previa. De lo contrario ella guarda la posición previa en su memoria. Después de que todas las abejas empleadas completan el proceso de búsqueda, ellas comparten la información de néctar de las fuentes de alimento y su información de posición con las abejas observadoras. Una abeja observadora evalúa la información de néctar tomada de todas las abejas empleadas y escoge una fuente de alimento con una probabilidad relacionada con la cantidad de néctar. Como en el caso de la abeja empleada, ella produce una modificación en la posición en su memoria y verifica la cantidad de néctar de la fuente candidata. Si el

néctar es más alto que la anterior, la abeja memoriza la nueva posición y olvida la vieja (Karaboga y Akay, 2009).

Algoritmo de Colonia de Abejas Artificial.	
1	Inicializar la población;
2	repeat
3	Colocar las abejas obreras en sus fuentes de alimento (Fase de las abejas obreras);
4	Colocar las abejas observadoras en las fuentes de alimento dependiendo de su cantidad de néctar (Fase de las abejas observadoras);
5	Enviar las abejas exploradoras a buscar a la zona de búsqueda para descubrir nuevas fuentes de alimento (Fase de las abejas exploradoras);
6	Memorizar la mejor fuente de alimento hasta ahora (Fase de Memorización) ;
7	until <i>Requerimientos son alcanzados</i> ;

Figura 2. Pseudocódigo del algoritmo de Colonia Artificial de Abejas.

Implementación de los algoritmos y especificación de sus parámetros

La implementación tanto de las funciones objetivo como de los algoritmos de evolución diferencial y colonia artificial de abejas se realizó en Matlab. Se realizaron 10 ejecuciones de cada algoritmo para cada problema. Para el algoritmo de Evolución Diferencial se utilizaron los siguientes parámetros: $F=0.5$, $CR=0.5$ y $NP=10n$, donde n es el número de variables en el problema a optimizar; por su parte para Colonia Artificial de Abejas se utilizó un límite de abandono igual a 50 y un de manera análoga a ED un tamaño de enjambre de diez veces el número de variables en el problema a optimizar.

Los problemas que se sometieron a la minimización fueron un caso de trazo y un caso de dimensionamiento encontrados resueltos previamente por Ángeles (2002). Posterior a la ejecución de los procesos de optimización se realizó una comparación entre los diseños obtenidos mediante los algoritmos ED y CAA y los métodos utilizados por Ángeles (2002).

Resultados y Discusión

En el Cuadro 1 se puede observar los valores obtenidos mediante las optimizaciones, los cuales se comparan con los valores generados por los diseños hechos y reportados por Ángeles (2002).

En el caso del trazo se alcanzaron valores menores en comparación con el diseño de la bibliografía, tanto ED como CAA generaron diseños aceptables, sin embargo, los

valores de ED son menos variables en comparación con los de CAA, que posiblemente haya generado valores mayores en algunos casos.

En el caso del dimensionamiento no se obtuvieron valores menores al diseño propuesto en la bibliografía. Sin embargo, el algoritmo ED arrojó resultados bastante buenos cercanos al reportado, y su desviación estándar es bastante respetable, por otro lado, CAA no se encuentra en la misma situación debido a que genera valores bastante altos, imposibles de considerar para llevar a cabo su construcción, posiblemente por incumplimiento de restricciones.

En todos los casos se obtuvieron mejores valores con ED en comparación con CAA, además se converge más a una solución lo cual se ve reflejado en los valores de desviación estándar. Todo esto se explica porque el algoritmo CAA se desarrolla enfocado en la explotación de soluciones y se descuida la exploración.

Cuadro 1. Comparación de los valores mínimos obtenidos mediante ED y CAA con los reportados por Ángeles (2002)

Función objetivo	Mínimo valor obtenido (ED)	Mínimo valor obtenido (CAA)	Valor reportado por Ángeles(2002)
Trazo 1	$1946.05 \pm 4.79 \cdot 10^{-13}$	2113.86 ± 50.34	2211
Trazo 2, n=35	1939.99 ± 5.64	2113.14 ± 63.69	2211
Trazo2, n=59	2019.70 ± 49.56	2202.17 ± 103.35	2211
Dimensionamiento 1	$2.12 \cdot 10^5 \pm 3.06 \cdot 10^{-11}$	$4.40 \cdot 10^5 \pm 2.01 \cdot 10^5$	$2.123 \cdot 10^5$
Dimensionamiento 2	$2.32 \cdot 10^5 \pm 4.33$	$3.60 \cdot 10^5 \pm 1.15 \cdot 10^5$	$2.123 \cdot 10^5$
Dimensionamiento3	$2.42 \cdot 10^5 \pm 4.04 \cdot 10^3$	$1.49 \cdot 10^7 \pm 1.67 \cdot 10^6$	$2.123 \cdot 10^5$

El algoritmo ED combina sus mecanismos de exploración y explotación de soluciones para lograr una rápida convergencia a un mínimo global. Sin embargo, es importante hacer notar que es un método muy robusto, y es posible que algunos métodos o heurísticas especialmente diseñados para la solución de problemas den mejores resultados.

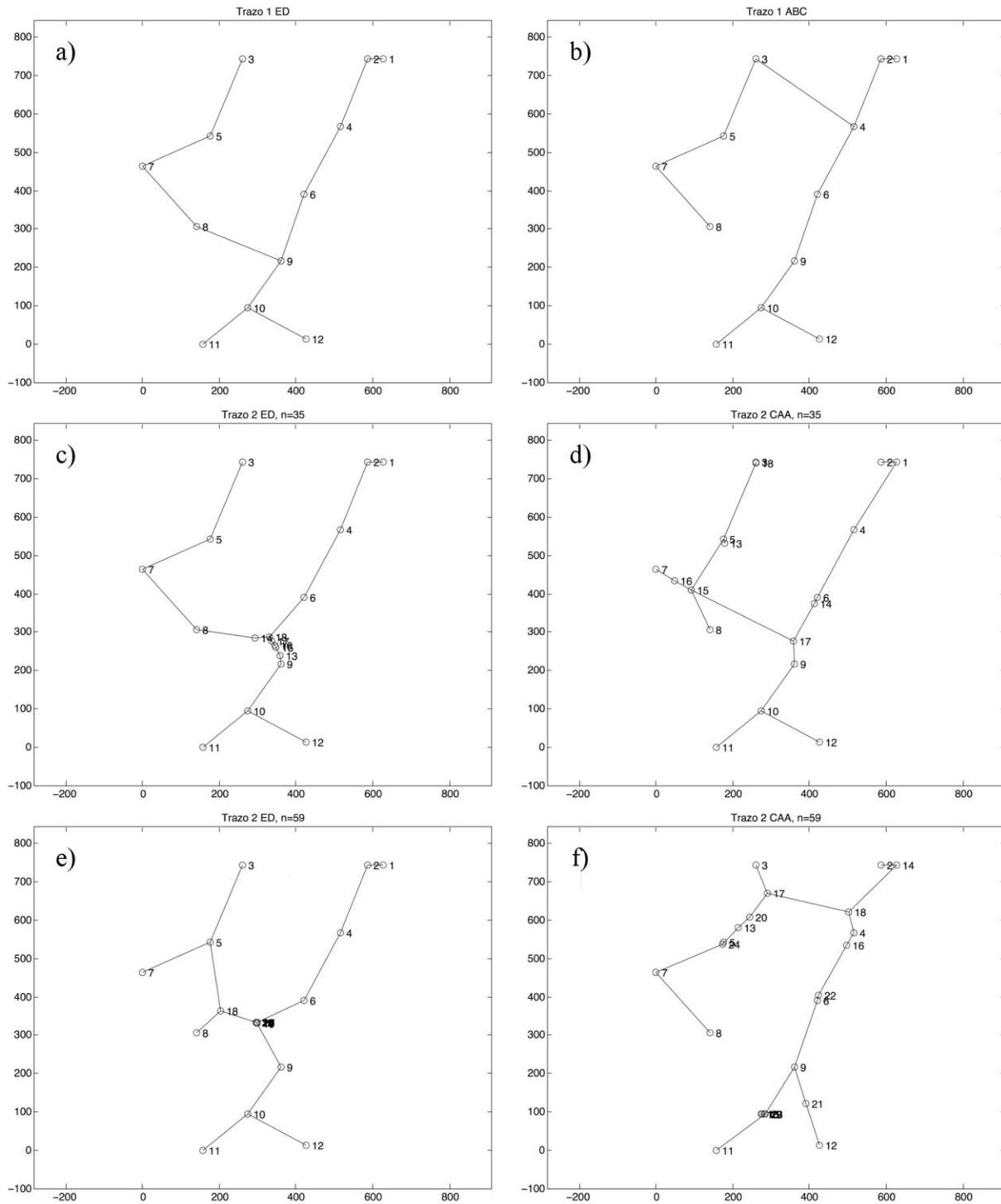


Figura 3. Trazos de la red de costo mínimo obtenidas mediante ED y CAA. a) Función Trazo 1 con ED. b) Función Trazo 1 con CAA. c) Función Trazo 2 con ED para n=35. d) Función Trazo 2 con CAA para n=35. Función Trazo 2 con ED para n=59. Función Trazo 2 con CAA para n=59.



En el caso del trazo se obtuvieron muy buenos resultados para ambos algoritmos, especialmente para la función Trazo 2, donde se puede observar el potencial y eficiencia de los algoritmos ED y CAA. En este caso se requiere un análisis minucioso del problema para así poder proponer puntos que realmente mejoren la solución, pero el número y configuración de los nuevos puntos se desconoce, por lo que depende en gran medida de la experiencia del proyectista, posteriormente se tiene que llevar a cabo la solución analítica del problema. Tanto ED como CAA no dependen de la naturaleza del problema, ya que solamente exploran y explotan el espacio solución, de esta manera el número y configuración de los nuevos puntos se encuentran sin importar la naturaleza del problema. Los puntos auxiliales propuestos en la función "trazo2" cumplen con su cometido al reducir el costo del trazo y en caso de ser innecesarios se agrupan con puntos ya existentes.

Para el caso del dimensionamiento ED arrojó excelentes resultados muy cercanos al mínimo obtenido con Programación Lineal, sin embargo, este método mostro un mejor resultado. Esto se debe a que PL es un método especialmente diseñado para problemas lineales y ED es un método de exploración y explotación del espacio solución que puede trabajar en cualquier problema sin importar su naturaleza. En los resultados se puede observar que ED funciona para este tipo de problemas sin embargo es necesario seguir investigando con diferentes parámetros y nuevas versiones de ED.

Conclusiones

El uso de algoritmos de ED y CAA en el diseño de redes hidráulicas abiertas para riego es satisfactorio, obteniéndose soluciones aceptables, incluso mejores, en comparación con los métodos tradicionales de diseño, utilizados por Ángeles (2002). En el caso del trazo se obtuvieron valores más pequeños que los reportados previamente, cabe aclarar que en las funciones objetivo se hace caso omiso del trazo por linderos. Una ventaja que se presenta al utilizar estos algoritmos es la simplificación en el diseño a 120° ya que no se aborda el problema analíticamente.

ED para el dimensionamiento con la función "dimen3" genera redes satisfactorias, por otro lado, mediante CAA se obtienen redes mucho más costosas.

Finalmente se concluye que el uso del algoritmo de Evolución Diferencial representa una alternativa en el diseño de redes hidráulicas abiertas para riego. Sin embargo, debe de considerarse las dimensiones del problema, así como los costos computacionales de la ejecución de los algoritmos, para evitar un sobre uso de estos.

Referencias Bibliográficas

- Ángeles M.V. 2002. Redes abiertas de tuberías para riego (Trazo, diseño, revisión y análisis). Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 149 p.
- De los Cobos S.S.G.; Goddard C., J.; Gutiérrez A.M.A.; Martínez L.A.E. 2010. Búsqueda y exploración estocástica. Universidad Autónoma Metropolitana, México, DF. 257 p.



- Eiger G.; Shamin U.; Ben-Tal A. 1994. Optimal desing of water distribution networks. *Water Resources Research*, 30(9).
- Karaboga B.; Akay B. 2009. A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence. *Artificial Intelligence Review*, 31(1-4):61–85.
- Karaboga D.; Basturk B. 2007. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (abc) algorithm. *Journal of Global Optimiz- ation*, 39(3):359–471.
- Pérez G.R.; Lara L.B.; Izquierdo S.J.; Martínez S.F.J. 2006. Método de la pendiente económica para el diseño óptimo de redes. In: VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua, João Pessoa, Brasil.
- Saldarriaga J. 2008. Hidráulica de tuberías, abastecimiento de agua, redes, riegos. Alfaomega Colombiana S. A.
- Storn R.; Price K. 1995. Differential evolution - a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. Technical report, International Computer Science Institute, Berkley.
- Tang Y.; Guan X. 2009. Parameter estimation of chaotic system with time-delay: A differential evolution approach. *Chaos, Solitons and Fractals*, 42(5):3132–3139.
- Valdez C.E. 1990. Abastecimiento de agua potable. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. Apuntes.