

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**DISEÑO DE SUBMÓDULOS DE RIEGO POR GRAVEDAD USANDO SUPERFICIE ÓPTIMA  
DE GRADIENTE HIDRÁULICO**

*David A. Hernández<sup>2</sup>, Nataly Bermúdez<sup>2</sup>, Juan Saldarriaga<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Director, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia*

<sup>2</sup> *Investigador, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia*

*<da.hernandez39@uniandes.edu.co>, <n.bermudez87@uniandes.edu.co>, <jsaldarr@uniandes.edu.co>*

**RESUMEN:**

El presente trabajo se desarrolló teniendo en cuenta la importancia y el alto crecimiento en proyectos de riego que se viene dando actualmente en Colombia. El artículo presenta los resultados obtenidos para diferentes diseños de submódulos de sistemas de riego localizado de alta frecuencia (RLAF) haciendo uso de la metodología de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico (SOGH) planteada en sus inicios para el obtener diseños de mínimo costo en Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP). Los diseños realizados se hicieron mediante la metodología SOGH variando el valor de la flecha que compone la línea de gradiente hidráulico objetivo. Para esto, primero se determinó el valor máximo de la flecha de diseño y se procedió a determinar el comportamiento de los costos de diferentes submódulos respecto a la flecha. Se encontró que el uso de la metodología SOGH en el diseño de submódulos de sistemas de riego permite encontrar diseños de mínimo costo y adicionalmente cumplir con los requisitos establecidos por el diseño agrónomo. Finalmente se determinó que la flecha de mínimo costo para el diseño con diámetros continuos corresponde a una flecha intermedia entre la flecha máxima y la mínima; y que el mejor criterio para el redondeo de diámetros corresponde al redondeo al diámetro comercial más cercano.

**ABSTRACT:**

This work was developed taking into account the importance and high growth in irrigation projects that has been going on actually in Colombia. The article presents the results for different designs of submodules of Localized Irrigation Systems of High Frequency (RLAF) using the methodology of Optimal Surface Hydraulic Gradient (OSHG) made for Water Distribution Systems design. The designs were done using the OSHG methodology by varying the arrow that makes up the target hydraulic grade line. For this, we first determined the maximum value of the arrow design and the behavior of the submodules different costs with respect to the arrow. It was found that the use of the OSHG methodology in the design of irrigation submodules allows to find the least-cost and additionally meet the agricultural design requirements. Finally it was determined that the minimum cost arrow for designs with continuous diameters corresponds to an intermediate arrow between the maximum and minimum arrow, and the best approach to obtain the discrete diameters is the rounding to nearest.

**PALABRAS CLAVES:** Sistemas de riego localizado, Submódulos de riego, diseño óptimo, presión de entrada al submódulo.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, según estudios del Departamento Nacional de Planeación, en 1999 existían en Colombia 3'759,174 hectáreas de cultivos; años después, en el 2008, éste número se había incrementado en 152,594 hectáreas. Estos valores implican una alta inversión en rehabilitación de redes existentes y en inversión para construcción de nuevos sistemas de riego; además, si se tiene presente que los sistemas de abastecimiento de agua presentan una vida útil de alrededor de 30 años, será necesario hacer inversiones de renovación de redes de riego existentes. En un informe presentado por Manuel Ramírez (Asesor de la Unidad de Desarrollo Agraria, 1998), se estima que en Colombia, de acuerdo con los recursos asignados en el Presupuesto General de la Nación para proyectos que se van a ejecutar y sobre los cuales existe certeza de construcción, la parte que financia el Estado por hectárea oscila alrededor de los 6,500 dólares. Para reducir éste presupuesto y hacer un mejor uso de los recursos públicos, se debe procurar concebir sistemas de Riego Localizado a Alta Frecuencia (RLAF) que sean económicos.

Actualmente el diseño de los sistemas de RLAF se hace mediante las metodologías clásicas basadas en la comprobación de diseño. Esto último quiere decir que se prueban diferentes diámetros de tuberías para cada uno de los tubos que conforman el sistema y se escoge alguna de las múltiples soluciones que cumplen con los requisitos hidráulicos (Saldarriaga, 2007). Algunos ejemplos de estas formas de diseño se pueden encontrar en los trabajos de Goldemberg (1976), Rodríguez (1982) y Pizarro (1987). Muchas veces la escogencia del conjunto de diámetros de las tuberías se basa en la experiencia del diseñador, y por lo tanto no existe ningún proceso exhaustivo como heurísticas de “Colonia de Hormigas” (Ostfled & Tubaltzev, 2008) o metodologías de diseño basadas en la hidráulica (Ochoa & Saldarriaga, 2009) que permitan llegar a un diseño óptimo. Éste trabajo busca hacer uso de las metodologías como Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico (SOGH) (Ochoa & Saldarriaga, 2009), planteadas para redes de distribución de agua potable, a fin de utilizar sus bases teóricas para obtener diseños de sistemas de riego de mínimo costo.

## UNIFORMIDAD DE RIEGO

La uniformidad del riego es característica esencial de un sistema de riego localizado de alta frecuencia, que va a estar dada por el diseño agronómico e influenciará directamente los resultados sobre el diseño de las tuberías que componen este tipo de sistemas. De esta manera, el diseñador debe buscar que el sistema de tuberías sea tal que el diseño sea económico y que todas las plantas reciban la misma cantidad de agua y nutrientes necesarios para alcanzar su correcto desarrollo y producción.

Este tipo de sistemas utilizan emisores como nudos de consumo. El uso de emisores implica que el caudal que recibe cada una de las plantas va a depender de la presión en el punto de llegada y por esta razón se establece el criterio de uniformidad. La uniformidad del riego se caracteriza mediante el coeficiente de uniformidad (CU) que se define como se muestra en la Ecuación 1:

$$CU = \left[ 1 - \frac{1.27 \cdot CV}{\sqrt{n_e}} \right] \frac{Q_{mp}}{Q_m} \quad [1]$$

donde:

- CU: Coeficiente de uniformidad del riego; éste es un dato de entrada y es suministrado por el diseño agronómico
- $n_e$ : Número de emisores por planta.
- $Q_{mp}$ : Caudal del emisor sometido a la mínima presión. Este caudal será uno de los datos de entrada para el proceso de diseño.

- $Q_m$ : Caudal medio por planta. Este dato es dado por el diseño agronómico y corresponde al caudal que se espera que cada planta reciba.
- CV: Coeficiente de variación por fabricación de los emisores finales.
- $\bar{q}$  corresponde al caudal promedio de la muestra de emisores.

Como se puede observar el coeficiente de uniformidad (CU) depende tanto de factores constructivos como de factores hidráulicos. Los factores constructivos se incluyen en el coeficiente de variación (CV) y tienen en cuenta las diferencias que causan los procesos de fabricación y los materiales utilizados en los caudales finales. Por su parte, los factores hidráulicos tienen en cuenta las pérdidas de energía (altura) ocurridas a lo largo de todas las tuberías que conforman el sistema de riego y la topografía del terreno. Además de los factores hidráulicos y constructivos, que afectan la uniformidad del riego, existen otros factores como el envejecimiento del sistema, las obturaciones que ocurran en los emisores y las diferencias de temperatura que se presentan en los diferentes laterales del sistema. Estos últimos factores no se tienen en cuenta en el proceso de diseño debido a la alta incertidumbre que existe con relación a estos.

## CÁLCULO DE LA TOLERANCIA DE CAUDALES

Con el objetivo de cumplir con el coeficiente de uniformidad impuesto por el diseño agronómico, es necesario que los caudales que entrega cada uno de los emisores, no resulten muy diferentes entre ellos. Para esto es necesario asegurarse que el rango de caudales se encuentre entre un máximo y un mínimo. Para determinar el caudal de mínima presión que puede presentarse en un submódulo de riego se parte de la Ecuación 1 y de esta manera, resolviendo para el caudal de mínima presión se obtiene:

$$Q_{mp} = \left[ \frac{CU}{1 - \frac{1.27 \cdot CV}{\sqrt{n_e}}} \right] \cdot Q_m \quad [2]$$

Una vez obtenido el caudal de mínima presión que se puede presentar en un submódulo de riego, se establece la tolerancia de caudales como la relación entre el caudal de mínima presión y el caudal medio.

## CÁLCULO DE LA TOLERANCIA DE PRESIONES

Para poder cumplir con la tolerancia de caudales, es necesario establecer la presión correspondiente para que se cumpla con el requerimiento de uniformidad. De esta manera, es lógico establecer una presión mínima que puede presentarse en un submódulo de riego y la presión máxima. Para poder determinar la presión mínima, se hace uso de la ecuación del emisor tal como se muestra a continuación:

$$h_{mp} = \left( \frac{Q_{mp}}{k} \right)^{1/x} \quad [3]$$

donde  $h_{mp}$  es la presión mínima y  $Q_{mp}$  es el caudal correspondiente a la presión mínima. Una vez conocidas la presión media y la presión mínima, se puede determinar la tolerancia de presiones ( $\Delta H$ ).

$$\Delta H = M(h_m - h_{mp}) \quad [4]$$

donde  $h_m$  es la presión media,  $h_{mp}$  a la presión mínima y M es un factor empírico que depende del número de diámetros que se vayan a emplear en una misma tubería, ya sea un múltiple

o un lateral. El problema para determinar M, es que durante esta etapa no se han definido el número de diámetros que tendrá un lateral, por esta razón para realizar los diseños se recomienda un valor de  $M=2.5$  (Saldarriaga, 2007).

Finalmente, conociendo la tolerancia de presiones, se puede determinar la presión de entrada al submódulo de riego ( $h_{max}$ ).

$$h_{max} = \Delta H + h_{mp} \quad [5]$$

Una vez se han definido las características que componen un sistema de RLAF, tales como su esquema, la hidráulica de emisores, clasificación de emisores, uniformidad de riego, tolerancia de caudales y presiones, el siguiente paso consiste en realizar diseños haciendo uso de la metodología de SOGH (Saldarriaga y Ochoa, 2009).

## **DISEÑO DE UN SISTEMA RLAF**

El primer paso del diseño consiste en calcular la tolerancia de caudales y presiones; estos cálculos son comunes para toda la instalación de riego. Posteriormente, el cálculo de los diámetros de diseño se desarrolla en forma independiente para cada uno de los submódulos que conforman el cultivo, el cual corresponde a la superficie del cultivo dominado por un regulador de presión.

## **DISEÑO OPTIMIZADO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE CON BASE EN EL CONCEPTO ENERGÉTICO DE SOGH**

La metodología de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico SOGH, nace para darle solución al problema del diseño óptimo de una Red de Distribución de Agua Potable (RDAP). Este es un problema bastante complejo ya que existe una enorme cantidad de configuraciones de diámetros de tuberías que satisfacen las restricciones hidráulicas (i.e. caudales de consumo y presión mínima), pero sólo una de éstas es la más económica.

La metodología SOGH fue elegida para aplicar en el diseño de sistemas de RLAF, por ser una metodología que se basa netamente en la comprensión de la hidráulica y la topología del sistema; esto la diferencia de la mayoría de metodologías de diseño existentes, las cuales se fundamentan en la imitación de otros fenómenos físicos y naturales (e.g. Algoritmos Genéticos (AG), búsqueda de armonía, enjambre de partículas, colonia de hormigas) para explorar el espacio de solución del problema de diseño.

La metodología SOGH comprobó que es posible llegar al diseño de mínimo costo de una red si se conoce previamente la forma de la SOGH del sistema, la cual está conformada por un conjunto de puntos  $(X, Y, LGH_{ideal})$ , donde  $X$  y  $Y$  corresponden a las coordenadas planas de cada nudo de la red y  $LGH_{ideal}$  es la altura piezométrica que debería tener cada nudo para lograr una configuración de mínimo costo. La forma de esta superficie se ajusta a una función cuadrática cuya curvatura depende características hidráulicas, topológicas y comerciales del sistema.

La metodología de SOGH se basa en la determinación de una flecha que describe la forma de la línea de gradiente hidráulico en función de las características anteriormente mencionadas, después establece un procedimiento que estima la forma de la SOGH de cada red de distribución. Con base en esta superficie se obtiene una pre-configuración de la red que cumple con las restricciones hidráulicas del problema del diseño de redes, pero no con las restricciones comerciales, dado que los diámetros de las tuberías de esta pre-configuración son continuos. Para redondear dichos diámetros a valores discretos contenidos dentro del conjunto de diámetros comerciales disponibles, la metodología implementa un procedimiento de Programación por Restricciones (PR) que son de baja complejidad y requieren un número pequeño de simulaciones hidráulicas, lo cual constituye una gran ventaja para el diseño de redes grandes.

Como bien, lo estableció I-pai Wu (1975) y posteriormente Ochoa y Saldarriaga (2009), la red de mínimo costo puede corresponde a aquel diseño que se desarrolla a partir de una línea de gradiente hidráulico parabólica. En el caso del diseño de submódulos de riego, el punto correspondiente a la LGH máxima, será la cota de entrada al submódulo más la presión de entrada (ver Ecuación 6).

[6]

$$LGH_{max} = Cota_{entrada} + PES$$

El punto correspondiente a la línea de gradiente hidráulico mínimo, corresponde al sumidero que presente las condiciones más adversas topográficamente y que se encuentre más alejado de la válvula reguladora de presión. La presión mínima, es la correspondiente al caudal de mínima presión obtenido en el cálculo de tolerancia de caudales. Finalmente, para poder describir una parábola, se requiere de un tercer punto. Este tercer punto, corresponde al lugar donde se presenta la máxima curvatura en la LGH; y se puede determinar mediante la flecha.

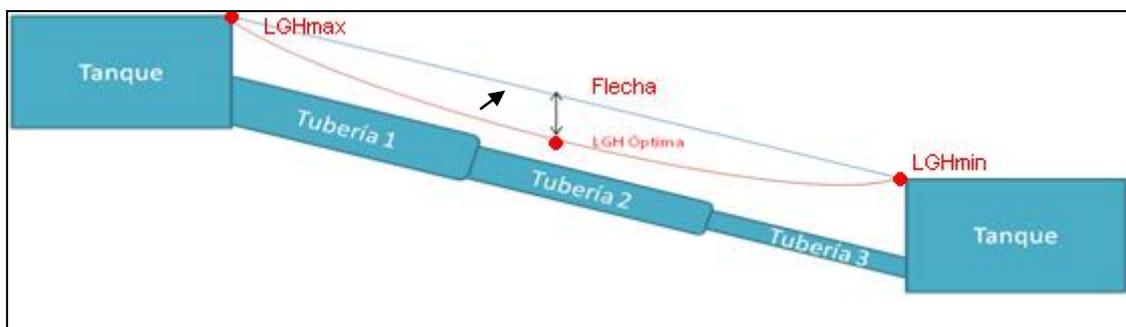


Figura 1.- LGH objetivo, basada en tres puntos conocidos.

La Figura 1, muestra un esquema de los tres puntos requeridos para determinar la LGH objetivo a la hora de diseñar un sistema de tuberías. A partir de esta figura, se puede establecer la ecuación propuesta por la metodología SOGH para la línea de gradiente hidráulico.

[7]

$$LGH(x) = \alpha d^2 + \beta d + \gamma$$

donde:

$$\alpha = 4F \frac{(LGH_{m\acute{a}x} - LGH_{m\acute{i}n})}{d_{Topol\acute{o}gica\ i}^2}$$

$$\beta = -(1 + 4F) \frac{(LGH_{m\acute{a}x} - LGH_{m\acute{i}n})}{d_{Topol\acute{o}gica\ i}}$$

$$\gamma = LGH_{m\acute{a}x}$$

donde  $\alpha, \beta$ , y  $\gamma$  son parámetros de la ecuación cuadrática que define la superficie de gradiente hidráulico objetivo,  $LGH_{max}$  es la altura piezométrica a la entrada del submódulo de riego,  $LGH_{min}$  es la altura piezométrica correspondiente a la suma de la presión mínima y la altura topográfica en el punto en que ésta ocurre,  $F$  es la flecha que define la curva cuadrática de la línea de gradiente hidráulico y  $d$  es la distancia topológica desde la fuente de abastecimiento a cada uno de los puntos que componen el sistema.

Como puede observarse, claramente la línea de gradiente hidráulico en cada uno de los puntos del sistema de tuberías, depende de la flecha seleccionada y de su distancia topológica al punto de alimentación del sistema. Vale la pena decir que un diseño óptimo nunca va a corresponder a flechas entre -0.5 y 0; esto debido a que este tipo de flechas conlleva a un menor gasto de energía

objetivo por tubería e implicarían mayores costos. De esta manera, el estudio se concentra en flechas entre 0 y 0.5. Dicho esto, y después de observar las líneas de gradiente hidráulico para flechas altas (por ejemplo la flecha 0.45), se observó que existía un punto (nudo de mínima LGH) a partir del cual, el sistema estaría creando energía. Si se tiene en cuenta que para producir unas pérdidas objetivo de cero, en un tramo de tubería, se requiere de un diámetro infinito, no tendría ningún sentido físico hablar de diseñar un sistema de tuberías en el cual se requiere la creación de energía a partir de cierto punto.

De esta manera, teniendo en cuenta la Ecuación 7 y la Figura 1 surgió la pregunta, sobre cuál es el rango en que tiene una validez física la flecha de diseño y no se presentan zonas del sistema en donde se requiere una creación de energía. Después de realizar el proceso matemático correspondiente sobre la Ecuación 7, se encontró que la flecha máxima de diseño es de 0.25.

Con la flecha de 0.25, ocurrirá que en el último punto del sistema se requieran unas pérdidas objetivo de cero. Si se hace uso de flechas mayores a esta, se estaría pidiendo realizar un diseño en el cual se cree energía en ciertos puntos. Ahora bien, este resultado de una flecha máxima de 0.25 corresponde al caso en que la última tubería del sistema es de longitud infinitesimal, cosa que no sucede nunca. Por esta razón resultaba de interés determinar cuál es la flecha máxima en los casos en que la última tubería del sistema tenía una longitud considerable. La ecuación que responde esta pregunta corresponde a la Ecuación 8:

$$F = \frac{L_{Tot}}{4(L_{tot}-l_{fin})} \quad [8]$$

donde  $L_{Tot}$  es la longitud total del sistema,  $l_{fin}$  es la longitud de la última tubería y  $F$  es la flecha máxima.

## EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA METODOLOGÍA SOGH APLICADO AL DISEÑO DE UN SUBMÓDULO DE RLAF

Una vez se había establecido la flecha máxima de diseño, el siguiente paso consistió en realizar múltiples diseños para diferentes submódulos de riego. Para lo anterior, se realizó el diseño óptimo de diferentes submódulos mediante la metodología de SOGH implementada en el programa REDES (software de cálculo hidráulico creado en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA)). A cada uno de los submódulos se le variaba la flecha óptima de diseño y finalmente se verificaba que los requisitos de caudal mínimo, uniformidad del riego y mínimo costo se cumplieran. Los submódulos de análisis utilizados son los que se muestran a continuación:

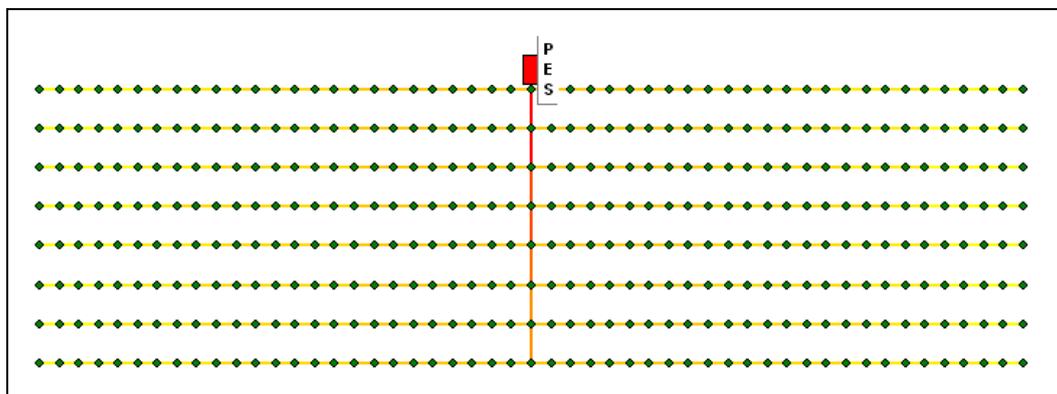
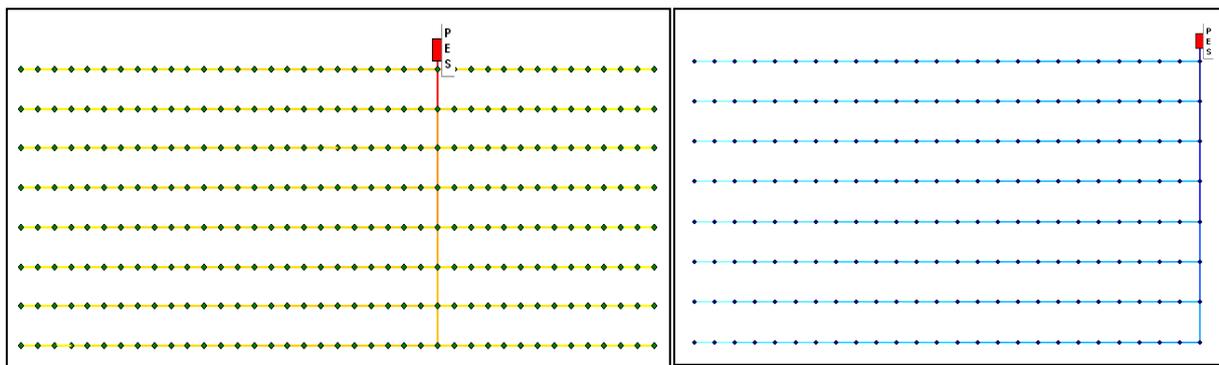


Figura 2.- Submódulo Simétrico. Modelo de REDES.



**Figura 3.-** Submódulos Asimétricos 1 y 2. Modelo de REDES.

Para cada uno de estos submódulos de riego se realizaron diferentes diseños usando la metodología SOGH y variando las ecuaciones de los emisores que conformaban sus laterales de riego. Los datos de entrada del diseño agronómico que se utilizaron para obtener los resultados finales fueron los que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1.-** Datos de entrada para el diseño de los submódulos de estudio.

Uniformidad del Riego		
Coefficiente de Uniformidad (CU)	0.8	
Coefficiente de Variación (CV)	0.04	
Número de Emisores por Planta ( $n_e$ )	2	Emisores
Temperatura	15	°C
Características del Emisor		
Caudal Promedio del Emisor ( $Q_m$ )	120	Litros/hora
Presión Media de Operación ( $H_m$ )	18	mca

De esta manera y después de hacer uso del programa REDES para realizar los diferentes diseños se obtuvieron resultados similares para cada una de las configuraciones de submódulos presentadas anteriormente.

## RESULTADOS DEL DISEÑO DE SUBMÓDULOS USANDO LA METODOLOGÍA SOGH

Como se mostró en la Figura 2, el Submódulo Asimétrico 1 cuenta con 8 laterales, que se componen cada uno de ellos de 25 puntos de alimentación a plantas (cada punto con 2 emisores de riego). Habiendo establecido la tolerancia de presiones y caudales, se realizaron los diseños para diámetros continuos y discretos, con criterio de aproximación al diámetro comercial más cercano. Lo que se pudo observar para este primer tipo de submódulo es que la flecha de mínimo costo es la misma independientemente de la ecuación del emisor utilizado. En la Figura 4 se observa el costo del submódulo de riego, para diferentes flechas. Este caso corresponde a la Submódulo Asimétrico 1 usando emisores con exponente 0.3. Como se puede observar en la gráfica, al realizar el diseño con diámetros continuos, existe un patrón. Es claro que la flecha de mínimo costo es la flecha de 0.14 y que las flechas de máximo costo son las flechas 0 y de 0.25. Por otro lado, se observa que al discretizar los diámetros al diámetro comercial más cercano, este comportamiento Costo-Flecha se ve totalmente afectado y no existe un patrón claro.

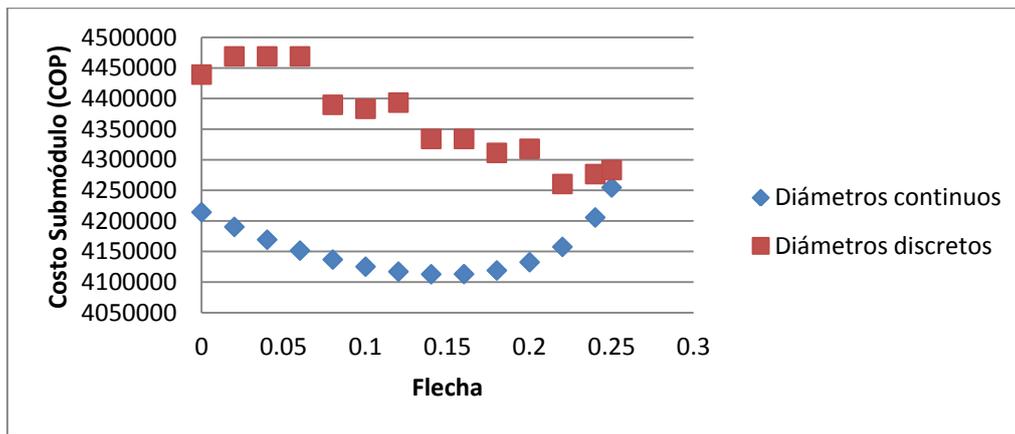


Figura 4.- Costos vs. Flecha, Submódulo Asimétrico 1. Emisores con exponente 0.3.

Por otro lado se observó para cada uno de estos diseños, el valor del Coeficiente de Uniformidad después del diseño y se observó que tanto los diseños con diámetros discretos como los diseños con diámetros continuos cumplían con el coeficiente de uniformidad. En la Figura 5 se puede ver que a medida que aumenta el valor de la flecha de diseño aumenta el valor del Coeficiente de Uniformidad (CU). Adicional a esto se observa que para todas las flechas de diseño, al momento de discretizar los diámetros el CU se reduce.

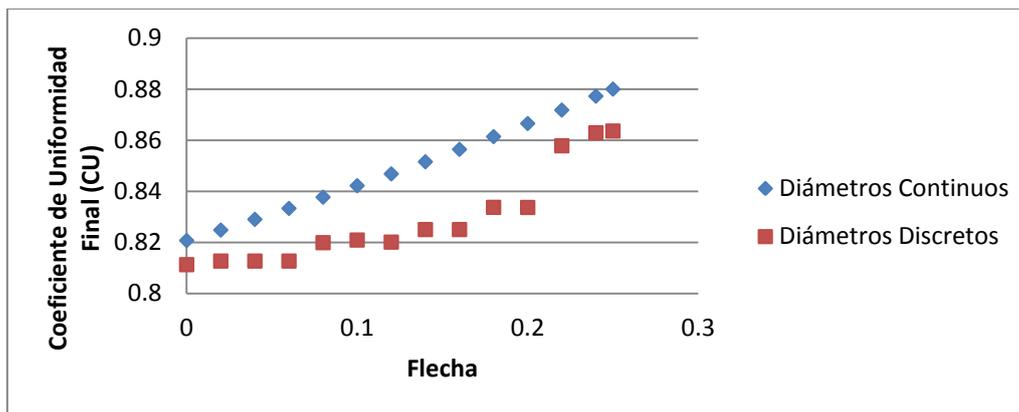


Figura 5.- Flecha vs. Coeficiente de uniformidad resultante. Submódulo Asimétrico 1, exponente del emisor 0.3.

Estos mismos resultados se observaron para los otros dos sumódulos donde se obtuvo una curva Costo-Flecha con un comportamiento muy similar y una alteración en esta relación al discretizar los diámetros; adicional a esto, los submódulos cumplen con el Coeficiente de Uniformidad establecido en el diseño agronómico para todos los diseños. Obtenidos estos resultados se pudo concluir que la metodología SOGH resulta bastante buena para determinar el diseño de mínimo costo de forma rápida y cumpliendo con los requisitos agronómicos. La pregunta que surgió a partir de los resultados presentados, es por qué la flecha de mínimo costo para el diseño con diámetros continuos, corresponde a una flecha intermedia.

Al observar diferentes líneas de gradiente hidráulico para diferentes flechas se observó, que por ejemplo, la flecha 0 mantiene una pendiente constante y que las líneas de presiones de flechas como la de 0.14 y 0.25 tienen una pendiente variable a lo largo de la curva. Para responder la anterior pregunta y entender este comportamiento, se determinó, a partir de la ecuación de la LGH, la ecuación de la pendiente de fricción en diferentes submódulos y sus correspondientes rutas críticas.

Si se tiene una alta pendiente en la línea de presiones, esto implicará que el sistema está en capacidad de gastar mayor energía y por lo tanto puede hacer uso de diámetros menores. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó el siguiente procedimiento para observar cómo se comportan las pendientes de las líneas de presión a lo largo de la ruta crítica. Para esto se hizo uso de la derivada

de la ecuación de la LGH objetivo para cada una de las flechas que se están analizando (Flechas 0, 0.14 y 0.25).

Graficando los valores de la pendiente de fricción en diferentes abscisas de los sistemas se obtuvieron resultados como el que se muestra a continuación. En la Figura 6 se observa, como era de esperarse, que la relación entre la pendiente de fricción para la flecha 0 y la distancia topológica es una ecuación lineal de pendiente 0. Por otro lado, la relación entre la pendiente de fricción y la distancia topológica de los nodos a la fuente de abastecimiento, en las flechas 0.14 y 0.25 es una ecuación lineal con una pendiente diferente a cero. El valor de la pendiente crecerá a medida que el valor de flecha sea mayor (Ver Figura 6).

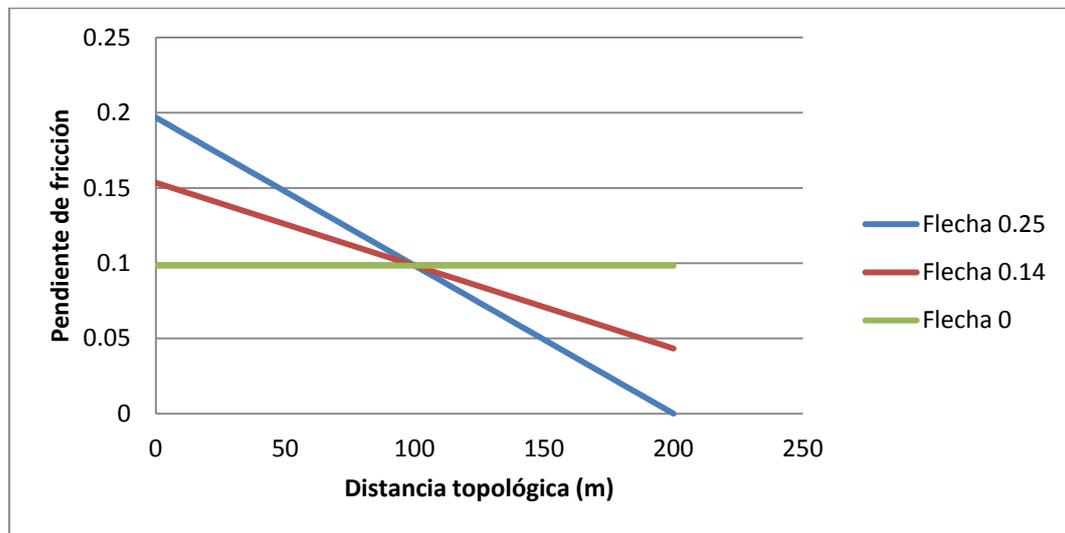


Figura 6.- Pendiente de fricción vs distancia topológica, Submódulo Asimétrico 1, exponente del emisor 0.3.

Los resultados presentados en la Figura 5 resultan claves para entender el comportamiento de la curva Costo-Flecha. La hipótesis planteada anteriormente hacía referencia a que las redes de mínimo costo corresponderán a las flechas intermedias. Lo que se puede deducir de la Figura 6, es que a medida que la flecha de diseño crece, los diámetros de las tuberías iniciales irán reduciéndose; contrario a esto, las tuberías finales irán aumentando su diámetro. Si se comparan las tres pendientes de fricción de las tres flechas, se observa que entre la abscisa 0 y la abscisa 100, la flecha de 0.25 tiene una mayor pendiente de fricción y por lo tanto conllevará a diámetros menores que las flechas 0 y 0.14. Por el contrario, entre la abscisa 100 y la abscisa 200, la flecha de 0.25 pasa a ser la que tiene una menor pendiente de fricción y por lo tanto será la que lleve a tener mayores diámetros en las tuberías ubicadas entre estas dos últimas abscisas. En la gráfica puede verse que la flecha intermedia (la de 0.14) siempre se encuentra en un punto medio; esto quiere decir que, a diferencia de las flechas de 0 y 0.25, esta flecha no representa los mayores costos en ninguno de los tramos de la ruta crítica. De esta manera, queda demostrado que aunque una flecha extrema como la de 0 o la 0.25 conlleven a tener diámetros menores en ciertos puntos del sistema, solo una flecha intermedia es capaz de llevar a tener los costos globales del sistema en un mínimo. Es posible que la flecha intermedia no sea exactamente el promedio entre la flecha 0 y 0.25, pero si es claro que se encuentra en un rango intermedio.

## CONCLUSIONES

La presente investigación desarrolló una metodología de diseño de sistemas de Riego Localizado de Alta Frecuencia (RLAF), basada en una metodología para el de diseño óptimo de Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP). Esta metodología se denominó “Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico (SOGH)”.

La curva Costo-Flecha obtenida a partir del diseño de diámetros continuos, presenta un patrón donde la flecha de mínimo costo es una flecha intermedia entre la flecha 0 y 0.25. Este patrón se mantiene para un mismo submódulo de riego, independientemente de las características de los emisores que se utilicen.

Es necesario entender por qué la flecha que lleva al mínimo costo con diámetros continuos varía dependiendo de la topología de la red. Para esto es necesario hacer un análisis detallado de las líneas de gradiente hidráulico objetivo de cada una de las rutas que toma el agua y buscar la manera de determinar cómo se puede seleccionar la flecha óptima sin necesidad de probar todas las flechas posibles. Para esto se puede también hacer uso de la pendiente de fricción de las diferentes rutas.

La flecha máxima de diseño para el caso en que la última tubería presenta una longitud infinitesimal, es la flecha de 0.25. En este caso, la pendiente de la línea de gradiente hidráulico presenta una pendiente cero en el último punto y esto significaría hacer uso de una tubería de diámetro infinito a fin de cumplir con las pérdidas objetivo de cero. Por otro lado, este caso es solo un caso teórico, y dado que la última tubería del sistema presentará una longitud no diferencial, el valor de la flecha máxima puede aumentar.

## BIBLIOGRAFÍA

- Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, C. (2008). Programa REDES. Bogotá: Universidad de los Andes.
- De Paco, J. L. (1993). Fundamentos del Cálculo Hidráulico en los Sistema de Riego y de Drenaje. Madrid: Mundi-Prensa.
- IDEAM. (2011). Estudio Nacional del Agua. Bogotá, Colombia.
- Kelle, J., & Karmeli. (1974). Trickle irrigation design. Rainbird Sprinkler Manufacturing Corporation .
- López, J. R. (1992). Riego Localizado. Madrid: Mundi-Prensa.
- Ochoa, S. (2009). Diseño Optimizado de Redes de Distribución de Agua Potable con Base en el Concepto Energético de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico . Bogota: Universidad de los Andes.
- Pizarro, F. (1996). Riegos Localizados de Alta Frecuencia. Goteo, microaspersión, exudación. Madrid: Mundi-Prensa.
- Saldarriaga, J. (2007). Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de Agua, Redes, Riego. Bogotá: Alfaomega.
- Solomon, K. H. (1985). Global uniformity of trickle irrigation system. ASAE , 1151-1158.
- Villalba, G. (2004). Algoritmos de optimización combinatoria aplicados al diseño de redes de distribución de agua potable. Bogotá: Universidad de Los Andes.
- Wu, I. (1975). Design of Drip Irrigation Main Lines. Journal of the Irrigation and Drainage Division , 265 - 278.
- Bermúdez, N. (2011). *Desarrollo de una metodología de diseño hidráulico para submódulos de sistemas de riego localizado de alta frecuencia*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- OECD 2006, *The impacts of Change on the Long-term Future Demand for Water Sector infrastructure*.
- Departamento Nacional de Planeación. (1998). Recuperado el 9 de Junio de 2011, de [http://www.dnp.gov.co/PortalWeb/Portals/0/archivos/documentos/DDRS/Publicaciones\\_Estudios/ProductividadMR.pdf](http://www.dnp.gov.co/PortalWeb/Portals/0/archivos/documentos/DDRS/Publicaciones_Estudios/ProductividadMR.pdf)

