



Terra Latinoamericana

ISSN: 0187-5779

ISSN: 2395-8030

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

Galván-Cano, Osvaldo; Exebio-García, Adolfo
Rediseño óptimo de la red presurizada de la sección 01, del
distrito de riego 001 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes
Terra Latinoamericana, vol. 38, núm. 2, 2020, Abril-Junio, pp. 323-331
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.645>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57363391009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Rediseño óptimo de la red presurizada de la sección 01, del distrito de riego 001 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes

Optimal redesign of the pressurized network of section 01 of 001 irrigation district Pabellon de Arteaga, Aguascalientes

Osvaldo Galván-Cano^{1*}  y Adolfo Exebio-García¹ 

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.
Autor para correspondencia (galvan.osvaldo@colpos.mx)

RESUMEN

El recurso agua es cada día más limitado, siendo la agricultura el sector que mayor demanda tiene, por lo que es necesario contar con infraestructura de riego capaz de optimizar y suministrar el agua que recibe la planta. El presente trabajo tuvo como objetivo rediseñar y optimizar la sección 01 del distrito de riego 001 (DR 001) Pabellón de Arteaga, Aguascalientes para que la red pueda satisfacer los requerimientos de agua de los cultivos con el sistema de suministro del riego a la demanda. Se aplicó la primera fórmula de Clément para la capacidad hidráulica de los tramos de la red y programación lineal para el determinar los diámetros óptimos de la red presurizada, minimizando el costo de la tubería que es uno de los componentes de mayor presupuesto en un sistema de riego, se utilizó como restricciones la velocidad mínima y máxima, longitud de cada tramo, presión mínima en los nodos y un caudal mínimo a circular de 20 L s^{-1} . Los resultados sugieren modificaciones importantes con respecto a lo instalado, actualmente los tramos de la red son clase 5 y el rediseño asignó en su mayoría clase 7 y 10, un 61% de los tramos incrementaron su diámetro, con un costo total mínimo de \$ 6 968 266 en cuanto a tubería de policloruro de vinilo (PVC), también se eliminó la restricción de las 4 válvulas reguladoras de presión (VRP) existentes dentro de la sección 01 para que opere con la totalidad de la presión que recibe a la entrada de la sección.

Palabras clave: diseño hidráulico, optimización, primera fórmula Clément, riego a la demanda.

SUMMARY

Water as resource is increasingly more restricted, agriculture is the sector with the highest water demand, thus, irrigation infrastructure that is able to optimize and supply water to the crops is needed. The purpose of our study was to redesign and optimize section 01 of the 001 (DR 001) irrigation district, Pabellon de Arteaga, Aguascalientes, for the network to fulfill the water requirements of crops with demand-based irrigation supply. The first Clément formula was applied for the hydraulic capacity of the network sections and linear programming to determine the optimal diameters of the pressurized network, minimizing the cost of the pipeline, which is one of the components with the highest budget in an irrigation system. The minimum and maximum speed, length of each section, minimum pressure at the nodes and a minimum flow rate of 20 L s^{-1} were employed as restrictions. The results suggest important modifications with respect to the installation, currently, the sections of the network belong to class 5, and the redesign mostly assigned class 7. In addition, 10, 61% of the sections increased their diameter, with a minimum total cost of \$ 6 968 266 in terms of polyvinyl chloride (PVC) pipe. Moreover, the restriction of the 4 pressure regulating valves (PRV) within section 01 was also removed for it to operate with the whole pressure of the entrance of the section.

Index words: hydraulic design, optimization, first Clément formula, irrigation demand.

Cita Recomendada:

Galván-Cano, O. y A. Exebio-García. 2020. Rediseño óptimo de la red presurizada de la sección 01, del distrito de riego 001 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. Terra Latinoamericana 38: 323-331.
DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.645>

Recibido: 03 de octubre de 2019.
Aceptado: 19 de noviembre 2019.
Publicado como Nota de Investigación en
Terra Latinoamericana 38: 323-331.

INTRODUCCIÓN

El recurso de agua para riego de acuerdo a Planells *et al.* (1999) es cada vez más limitado por lo cual es necesario contar con instalaciones (a nivel parcela y de red general de distribución) idóneas que permitan gestionar el recurso con estrategias más adecuadas a cada situación. En la actualidad en grandes extensiones y pequeños sistemas de riego el agua se conduce hasta las parcelas mediante canales (revestidos o de tierra) a cielo abierto, donde las pérdidas por evaporación e infiltración son considerables, y es entregada a los usuarios por turnos; que no es lo más adecuado cuando se riegan grandes superficies y con un patrón de cultivos cambiante, debido a que se tiene una variabilidad de cultivos y diferentes fechas de siembra, teniendo distintos requerimientos a lo largo del año agrícola.

Actualmente en México el dimensionamiento de los sistemas de riego presurizados se realiza de manera manual, es decir, que el diseñador va proponiendo los diámetros hasta que cumplen con las presiones requeridas para su correcto funcionamiento. Para sistemas que riegan pequeñas superficies el diseño puede ser rápido, pero cuando se diseñan para grandes superficies el tiempo requerido para su diseño es mayor ya que no solo se busca que el sistema opere de la mejor manera, sino que también el costo sea lo más económico, esto implica una amplia variedad de combinaciones. La programación lineal es una herramienta práctica que junto con los programas computacionales que actualmente existen permiten ahorrar tiempo al momento de diseñar grandes sistemas de riego.

La metodología sistemática que combina dos técnicas de optimización a través de un “método híbrido” propuesta por Lapo y Pérez (2013), en el que se fusionaron la programación lineal, la programación no lineal y los algoritmos genéticos. La formulación global del problema de dimensionado óptimo consistió en minimizar una función objetivo, constituida por los costos asociados a las tuberías que configuran la red.

El DR 001 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes está dividido en 19 secciones, actualmente la operación del sistema de riego presurizado del DR 001 se lleva de manera diferente a la propuesta en el diseño (turnos), donde muchos de los usuarios no respetan su horario asignado abriendo la válvula del hidrante cada que el usuario desea regar, además que prefieren regar durante el día, ocasionando que a varios hidrantes no les llegue la presión mínima (2.5 kg cm^{-2}) requerida

para operar. Asimismo dentro del DR 001 está la alternativa de que un usuario puede vender o transferir su derecho de agua a otro usuario ya sea dentro de la misma sección 01 o en alguna otra sección del DR 001 lo que ocasiona que los usuarios que adquieren el derecho puedan cambiar su hidrante por uno de mayor capacidad incrementando los caudales a circular dentro de la red. El objetivo general fue rediseñar la sección 01 determinando la capacidad hidráulica con la primera fórmula de Clément a una probabilidad de suministro del 95% en toda la red para que pueda operar con riego a la demanda y aplicando programación lineal para determinar los diámetros óptimos en función de los costos de la tubería.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se rediseño y optimizo la sección 01 (Figura 1) presurizada y en operación, del DR 001 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, ubicado a 35 km al norte de la ciudad de Aguascalientes, en los municipios de Pabellón de Arteaga, Rincón de Romos y Tepezalá.



Figura 1. Localización de la sección 01 del DR 001, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes.

Figure 1. Location of section 01 from DR 001, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes.

La sección 01 actualmente opera con 126 hidrantes (puntos rojos en la Figura 2) con caudales nominales de 10/20 L s⁻¹, una superficie de riego de 317.25 ha, y 4 VRP (puntos azules en la Figura 2) calibradas a diferentes presiones.

Diseño Agronómico

Se utilizó información meteorológica diaria de la estación automática CEPAB de INIFAP, de mayo de 2003 a marzo de 2019, promediando los datos por cada día, para representar los valores del año agrícola promedio. Se estimó la evapotranspiración y se realizaron las respectivas correcciones (climática, localización y salinidad), para los cultivos de: alfalfa, arándano, espárrago, fresa, nogal, vid, calabacita, cebolla, chile, maíz (forrajero), maíz (grano) y pepino. Para estimar la evapotranspiración de referencia se utilizó la fórmula recomendada por la FAO (Allen *et al.*, 2006).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

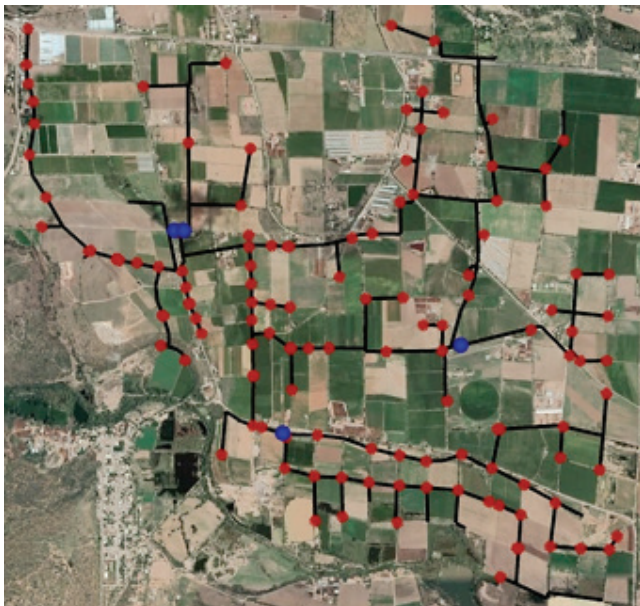


Figura 2. Topología de la red de distribución presurizada de la sección 01.

Figure 2. Topology of the pressurized distribution network in section 01.

donde: ET_o = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹); R_n = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹); R_a = radiación extraterrestre (mm día⁻¹); G = flujo del calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹); T = temperatura media del aire a 2 m de altura (°C); u_2 = velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹); e_s = presión de vapor de saturación (kPa); e_a = presión real de vapor (kPa); Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹); γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

Para la evapotranspiración del cultivo se empleó la ecuación recomendada por la FAO (Allen *et al.*, 2006):

$$ET_c = K_c ET_o \quad (2)$$

donde: ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm día⁻¹); K_c = coeficiente de cultivo deseado (adim.); ET_o = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).

Tres factores de corrección a la ET_c , descritos por Pizarro (1996), el primero corrige el efecto de localización, el más práctico es el que se basa en la fracción de área sombreada por el cultivo (Cuadro 1). Sin embargo como no está claro cuál de ellos es el mejor, por lo que Pizarro (1996) recomienda calcularlo por los cuatro métodos (Cuadro 1), y eliminar los dos valores extremos y sacar la media de los otros dos.

Cuadro 1. Ecuaciones para la corrección por localización.

Table 1. Equations for correction by location.

No.	Ecuación	Autores
3	$FL = 1.34 F_{SOM}$	Aljibury <i>et al.</i> (1974) citado por Pizarro, 1996.
4	$FL = 0.1 + F_{SOM}$	Decroix citado por Pizarro, 1996.
5	$FL = F_{SOM} + 0.5(1 - F_{SOM})$	Hoare <i>et al.</i> (1974) citado por Pizarro, 1996.
6	$FL = F_{SOM} + 0.15(1 - F_{SOM})$	Keller (1978) citado por Pizarro, 1996.

FL = factor de riego localizado (adim.); F_{SOM} = fracción de área sombreada (adim.).

FL = factor of localized irrigation (adim.); F_{SOM} = fraction of shaded area (adim.).

El segundo ajuste es por corrección climática, Pizarro (1996) recomienda adoptar el criterio de Hernández Abreu (1983) de multiplicar la ET_C por un factor de corrección comprendido entre 1.15 y 1.20 ya que la ET_o utiliza para sus cálculos valores promedio donde aproximadamente la mitad de los años el valor calculado será insuficiente; por último está la corrección por advección donde los efectos del clima, tienen un efecto considerable en el microclima del cultivo y depende del tamaño de la zona de riego.

La evapotranspiración para riego localizado, está dado por la siguiente ecuación (Pizarro, 1996):

$$ET_{CAj} = ET_C F_L F_C F_A \quad (7)$$

donde: ET_{CAj} = evapotranspiración del cultivo ajustado (mm día^{-1}); ET_C = evapotranspiración del cultivo (mm día^{-1}); F_L = factor de riego localizado (adim.); F_C = corrección climática (adim.); F_A = corrección por advección (adim.).

El requerimiento de riego neto se calcula con la siguiente ecuación (Fernández *et al.*, 2010):

$$RR_N = ET_{CAj} - P_{ef} \quad (8)$$

donde: RR_N = requerimiento de riego neto (mm día^{-1}); ET_{CAj} = evapotranspiración del cultivo ajustado (mm día^{-1}); P_{ef} = precipitación efectiva (mm día^{-1}).

Cuando se diseña se recomienda no considerar la precipitación efectiva con la finalidad de que el sistema tenga la capacidad de suministrar los requerimientos requeridos por los cultivos en tiempos de sequías, por lo que no se consideró. Doorenbos y Pruitt (1977) propusieron una fórmula para determinar la fracción de lavado de sales (F_{LS}) en riegos de alta frecuencia:

$$F_{LS} = \frac{CE_w}{2 CE_{es, max}} \quad (9)$$

donde: F_{LS} = fracción de lavado de sales (adim.); CE_w = conductividad eléctrica del agua de riego (mmhos cm^{-1}); $CE_{es, max}$ = máxima conductividad del extracto de saturación del suelo deseada (mmhos cm^{-1}).

El valor de CE_w (0.1368 dS m^{-1}) se tomó del estudio de calidad del agua realizado por la Asociación Civil de Usuarios (ACU) del DR 001, y los valores de $CE_{es, max}$ de los valores propuestos en el boletín FAO

29 por (Ayers y Westcot, 1976). Para las necesidades brutas, se considera la fracción de lavado por sales y la uniformidad de emisión de los emisores (Fernández *et al.*, 2010).

$$RR_B = \frac{RR_N}{CU(1 - F_{LS})} \quad \text{o} \quad RR_B = \frac{RR_N}{CU(Ea)} \quad (10)$$

donde: RR_B = requerimiento de riego bruto (mm día^{-1}); RR_N = requerimiento de riego neto (mm día^{-1}); CU = coeficiente de uniformidad (adim.); F_{LS} = fracción de lavado de sales (adim.); Ea = eficiencia de aplicación (adim.).

Se consideró una eficiencia de aplicación para microirrigación del 95% y una eficiencia de conducción y distribución del 95%. Dado que la rotación de cultivos es algo muy común dentro de los distritos de riego se determinó un requerimiento de riego bruto ponderado para el periodo de mayor de manda de agua en un ciclo agrícola promedio.

Capacidad Hidráulica

Clément (1966) propuso para hidrantes heterogéneos con distintas descargas y probabilidades de funcionamiento en un instante dado, conocida como la primera fórmula generalizada de Clément.

$$Q = \sum_{i=1}^n p_i q_i + z \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i (1 - p_i) q_i^2} \quad (11)$$

donde: Q = caudal conducido por el tramo (L s^{-1}), n = número de tomas que abastece el tramo (adim.), p_i = probabilidad de que la toma i esté abierta (adim.), $1 - p_i$ = probabilidad de que la toma i esté cerrado (adim.), q_i = caudal de la toma i (L s^{-1}), z = variable normal estandarizada (adim.).

Se estableció la restricción para el caudal a circular en los tramos, que el caudal mínimo fuera de 20 L s^{-1} , con la finalidad de evitar pérdidas de presión en las extremidades de los ramales de la red, ante la opción que tienen los usuarios de transferir su derecho de agua a otro usuario, lo que ocasiona que los usuarios que adquieren el derecho puedan cambiar su hidrante de 10 a 20 L s^{-1} incrementando las pérdidas por fricción. El caudal a suministrar por los hidrantes se determinó

a partir del requerimiento de riego bruto ponderado, flujo de emisor de (0.9 L h⁻¹), separación entre emisores (0.30 m) y separación entre laterales (0.75 m). En la actualidad los usuarios prefieren regar sólo durante el día, por lo que se consideró un tiempo de operación de 12 h diarias.

Dimensionamiento de la Red

Pérdidas por Fricción

Para las pérdidas por fricción se ocupó la ecuación de Chezy-Manning (Rossman, 2000).

$$hf = 10.294 \frac{n^2 Q^2 L}{D^{5.33}} \quad (12)$$

donde: hf = pérdida de carga por fricción en el tramo (m); Q = caudal del tramo (m³ s⁻¹); L = longitud del tramo (m); D = diámetro del tramo (m); n = coeficiente de Manning (adim).

Pérdidas Localizadas

$$h_k = k \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

donde: h_k = pérdida de carga localizada (m); k = coeficiente de accesorio (adim.); v = velocidad media del tramo (m s⁻¹); g = gravedad 9.81 (m s⁻²).

Diámetros Admisibles por Tramo

En la norma mexicana: NMX-O-177-SCFI-2011, se establecen las velocidades mínimas y máximas permisibles recomendadas para el diseño hidráulico en sistemas de conducción. Los valores adecuados están comprendidos entre 0.5 y 2.5 m s⁻¹, por debajo de 0.50 m s⁻¹ los diámetros resultantes son excesivos y la tubería se encarece, a velocidades superiores a 2.5 m s⁻¹ las pérdidas de carga adquieren valores muy elevados. Se estableció como restricción velocidades entre 0.5 y 2 m s⁻¹. A partir de la velocidad mínima y máxima establecidas se determina el rango entre el cual se van a encontrar los diámetros comerciales admisibles por cada tramo de la red.

$$D_{MÍN} = \sqrt{\frac{4Q}{v_{MÁX} \pi}} \quad (14)$$

$$D_{MÁX} = \sqrt{\frac{4Q}{v_{MÍN} \pi}} \quad (15)$$

donde: D_{MÍN} = diámetro mínimo (m); Q = caudal del tramo (m³ s⁻¹); v_{MÁX} = velocidad máxima (m s⁻¹); D_{MÁX} = diámetro máximo (m); v_{MÍN} = velocidad mínima (m s⁻¹).

Modelo de Optimización con Programación Lineal

El método consiste en dividir cada tramo de la red en secciones como diámetros comerciales se dispongan, buscando el valor mínimo de la función objetivo cumpliendo las restricciones.

Función Objetivo del Costo Global de la Red (f en Ec.20)

$$CT = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^K C_{ij} l_{ij} \right) \quad (16)$$

donde: CT = costo total (\$); C_{ij} = precio por metro lineal del segmento del tramo i con diámetro D_j (\$ m⁻¹); l_{ij} = longitud del diámetro D_j en el tramo i (m); es decir un segmento del tramo i con diámetro D_j; N = número de tramos de la red; K = número de diámetros admisibles en cada tramo y puede ser o no constante según el criterio de selección de diámetros.

Restricción de Longitud (Aeq y beq en Ec.20)

La suma de las longitudes parciales del tramo i deben ser igual a la longitud total del tramo i.

$$L_i = \sum_{j=1}^K l_{ij} \quad (17)$$

donde: L_i = longitud total del tramo i (m); l_{ij} = longitud cubierta por el diámetro D_j en el tramo i.

Restricción de Presión Mínima (A y b en Ec.20)

La presión en el nodo i debe ser mayor a la presión mínima requerida del nodo, es decir, la pérdida de carga del trayecto desde la fuente de abastecimiento hasta el nodo debe ser menor a la carga disponible desde la fuente al nodo.

$$h_0 - \sum_{i=1}^{N'} \left(\sum_{j=1}^K h f_{ij} l_{ij} \right) \geq h_{i \min} \quad (18)$$

donde: h_0 = cota piezométrica de la fuente de abastecimiento (m); N' = número de tramos que conforman el trayecto hidrante o nodos i a la fuente de abastecimiento; $h f_{ij}$ = pérdida de carga unitaria en el diámetro D_j en un segmento del tramo i (m); l_{ij} = longitud del diámetro D_j en el tramo i (m); $h_{i \min}$ = cota piezométrica mínima requerida en el hidrante o nodo i (m).

Restricción de no Negatividad (lb en Ec.20)

La longitud parcial de cada tubería en cada tramo de la red debe ser mayor o igual a cero.

$$l_{ij} \geq 0 \quad (19)$$

donde: l_{ij} = longitud cubierta por el diámetro D_j en el tramo i (m).

Resolución del Sistema de Ecuaciones Lineales

Mientras más grande sea la red, las matrices de restricciones y vector de la función objetivo crecen en tamaño, y se complica resolver el sistema de manera manual por el tiempo que conllevaría. Para resolver el sistema de ecuaciones previamente explicado se hizo uso del software MATLAB® el cual incorpora un módulo de optimización, el cual reduce el problema de programación lineal a la Ecuación 20 para aplicar cualquier de los tres algoritmos de optimización (*dual-simplex*, *interior-point-legacy*, *interior-point*). Se usó el algoritmo dual-simplex para resolver el sistema de ecuaciones.

$$\min_x f^T x \text{ such that } \begin{cases} A * x \leq b, \\ A_{eq} * x = b_{eq}, \\ x \geq lb. \end{cases} \quad (20)$$

donde: f = vector coeficiente; A = matriz de restricciones de desigualdad; b = vector de restricciones de desigualdad; A_{eq} = matriz de restricciones de igualdad; b_{eq} = vector de restricciones de igualdad; lb = vector de límites inferiores; x = vector solución.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinó una lámina bruta ponderada de 4.05 mm día⁻¹ para el periodo crítico (Mayo), de los cultivos previamente definidos. Se determinó el caudal que circula al considerar una probabilidad de suministro de 95% ($Z = 1.645$) para toda la red. Ángeles (2013) menciona que aumentar la probabilidad por arriba de 95% la garantía de suministro crecerá muy poco, ya que la función estadística de la garantía crece exponencialmente y tiene un punto de inflexión alrededor del 95%.

La distribución espacial que tienen los hidrantes en el rediseño es la misma que en la Figura 2 pero eliminando las 4 VRP existente. En el Cuadro 2 se muestran los resultados de aplicar la primera fórmula de Clément, los valores corresponden a la lateral margen derecha de la sección 01 y la última fila del Cuadro 2 muestra los valores al inicio de la lateral margen izquierda. Asumiendo que la tubería debe soportar la presión máxima cuando el sistema este sin operar, se tomó la carga que se genera después de las VRP que se ubican en el tramo muerto de la línea principal, con una carga de 5.6 kg cm⁻² en la entrada de la sección 01 para determinar la clase de la tubería, y una carga de 5 kg cm⁻² en la entrada de la sección 01 que es la presión que se presenta cuando el sistema está operando este último valor se tomó para generar el vector de presiones disponibles para cada nodo. Otras restricciones adicionales al modelo fueron una presión mínima de operación de 0.5 kg cm⁻² y de 2.5 kg cm⁻² en los nodos e hidrantes, respectivamente, diámetro mínimo de 100 mm (4") y clase mínima en tubería de PVC métrica de 5 kg cm⁻², límites de presiones a 90% de su resistencia establecida en su ficha técnica con la finalidad de que la tubería resista cuando se presente el golpe de ariete. El vector de la función objetivo y

Cuadro 2. Caudales de la lateral margen derecha de la sección 01.
Table 2. Flows of the lateral right margin of section 01.

Nodo inicial	Nodo final	Superficie acumulada	pi qi acumulado	Hidrant acumulado	$Z \sqrt{(p_i (1-p_i) q_i^2)}$ acumulado	Q
		ha	L s ⁻¹		- - - - - L s ⁻¹ - - - - -	
A1	A2	317.25	297.42	126	78.26	375.68
A2	A3	48.21	45.20	19	31.69	76.89
A3	A4	48.21	45.20	19	31.69	76.89
A4	A5	48.21	45.20	19	31.69	76.89
A5	A6	48.21	45.20	19	31.69	76.89
A6	A21	39.42	36.95	15	29.19	66.14
A21	A23	37.03	34.71	14	28.50	63.21
A23	A25	34.74	32.57	13	27.84	60.41
A25	A26	33.16	31.09	12	27.31	58.40
A26	A27	31.07	29.13	11	26.75	55.88
A27	A28	29.43	27.59	10	26.15	53.74
A28	A33	24.95	23.39	8	24.75	48.14
A33	A35	22.51	21.10	7	23.89	44.99
A35	A36	17.51	16.41	6	19.88	36.30
A36	A37	17.51	16.41	6	19.88	36.30
A37	A38	15.01	14.07	5	18.75	32.82
A38	A39	12.51	11.73	4	17.54	29.26
A39	A40	12.51	11.73	4	17.54	29.26
A40	A41	12.51	11.73	4	17.54	29.26
A41	A42	10.01	9.38	3	16.24	25.62
A42	A43	10.01	9.38	3	16.24	25.62
A43	A44	7.51	7.04	2	14.83	21.87
A44	A45	7.51	7.04	2	14.83	21.87
A45	A46	5.01	4.70	1	13.27	17.96
A2	A47	269.03	252.22	107	71.55	323.77

restricción de no negatividad que se generaron fueron de dimensión 1×704 , las matrices de las restricciones de longitud y presiones fueron de dimensión 255×704 y los vectores de las restricciones de longitud y presiones fueron de dimensión 255×1 . El sistema de ecuaciones se resolvió con el algoritmo de optimización “dual-simplex” con un costo total mínimo de \$ 6 968 266 en cuanto a tubería. La optimización determinó que la clase óptima para resistir la presión cuando el sistema no esté operando en su mayoría debe ser clase 7 y 10.

En el Cuadro 3 se muestra el número de tramos que propuso la optimización por cada diámetro nominal y en el Cuadro 4 sus longitudes correspondientes.

La optimización asignó en su mayoría diámetro de 160 mm (6”) en todas las clases. Otro aspecto es que en el rediseño no se consideraron las VRP que ya existían, con la finalidad de que pudiera operar todo la red de la sección 01 con la presión que llega a la entrada. Se comprobó que los diámetros seleccionados cumplieran con los requerimientos mínimos de presión en los hidrantes, sólo dos hidrantes no cumplieron con la presión mínima requerida de 2.5 kg cm⁻², obteniendo una presión de 2.35 kg cm⁻² ambos. Esto se debió a que al momento de la validación sólo se toma el diámetro cuya longitud sea la mayor de todos los propuesto por cada tramo, lo cual se corrigió revisando

Cuadro 3. Número de tramos por diámetro instalado contra número de tramos de la optimización.**Table 3. Number of sections per installed diameter vs. number of sections of the optimization.**

DN	C-5	Instalado C-7	C-10	C-5	Rediseño C-7	C-10
mm						
100	78	8	-	1	2	13
160	87	-	-	9	53	56
200	22	-	-	3	21	14
250	43	-	-	10	17	15
315	6	-	-	-	10	12
355	5	-	-	-	6	-
400	-	-	-	-	-	-
450	5	-	-	-	7	-
500	-	-	-	-	5	-

DN = diámetro nominal; C-5 = tubería clase 5; C-7 = tubería clase 7; C-10 = tubería clase 10.

DN = nominal diameter; C-5 = class 5 pipe; C-7 = class 7 pipe; C-10 = class 10 pipe.

los tramos que siguen el recorrido del nodo a la fuente de abastecimiento y aumentando el diámetro a los tramos que presentaban mayor pérdida por fricción, las nuevas presiones que se obtuvieron fueron de 2.53 y 2.54 kg cm⁻² en los hidrantes que no cumplían con la carga mínima requerida para operar. Los resultados mostraron, que los diámetros de muchos tramos son insuficientes para poder a operar demanda libre por lo que la optimización incremento en 156 tramos su

diámetro de los 255 tramos existentes en la red, también se eliminaron la restricción de presión que generaban las 4 VRP existentes en la sección 01 debido a que antes de la entrada de la sección en el tramo muerto de la línea principal existen VRP que reducen de manera considerable la presión, esto generó que la clase de la tubería se incrementara a clase 7 y 10 pero se pudo satisfacer la presión mínima requerida para que operen los hidrantes.

Actualmente la operación es a demanda libre debido a que el sistema aun no riega toda la superficie del distrito, los agricultores disponen del agua cuando ellos así lo deseen ocasionando que algunos hidrantes (que se encuentran al final de los ramales de cada sección) no les llegue la presión mínima requerida para funcionar. Por ello la necesidad de analizar cada sección para encontrar alternativas a los problemas de operación.

CONCLUSIONES

Los resultados indicaron que con la actual red instalada en la sección 01 hidráulicamente no es posible operar con riego a la demanda, ya que los caudales que se requieren conducir se incrementan, generando pérdidas por fricción mayores a las de diseño y por consiguiente una reducción en la presión en los nodos e hidrantes. Para que la sección 01 riegue a la demanda se deben cambiar los diámetros de las tuberías y no es operativo ni rentable por el costo que conlleva cambiar toda la red, la mejor alternativa es generar un arreglo

Cuadro 4. Longitudes instaladas contra longitudes propuestos por la optimización.**Table 4. Installed lengths vs. proposed lengths for optimization.**

DN	C-5	Instalado C-7	C-10	C-5	Rediseño C-7	C-10
mm						
100	8673.09	257.05	-	51.08	378.44	1625.49
160	10 673.13	-	-	1012.83	4550.53	7709.05
200	2483.46	-	-	334.17	2238.33	1585.85
250	4146.91	-	-	1142.09	1334.21	2049.5
315	581.33	-	-	-	1096.84	1031.27
355	344.49	-	-	-	486.76	-
400	-	-	-	-	-	-
450	573.92	-	-	-	533	-
500	-	-	-	-	573.92	-

óptimo por turnos que permita que a todos los hidrantes les llegue la presión mínima requerida. Dado que existe la alternativa de transferencia de derechos de agua entre usuarios que ya cuentan con hidrantes es recomendable antes de realizar los cambios analizar el comportamiento de la red ya que como se menciona la red no está capacitada para operar con riego a la demanda.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Boletín 56. Estudio FAO Riego y Drenaje. Roma, Italia. ISBN: 92-5-304219-2.
- Ángeles Montiel, V. 2013. Redes abiertas de tuberías para riego (trazo, diseño, revisión y análisis). Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México, México.
- Ayers, R. S. y D. W. Westcot. 1976. Water quality for agriculture. Paper no. 29. FAO Irrigation and Drainage. Rome, Italy. ISBN: 92-5-102263-1.
- Clément, R. 1966. Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande. La Houille Blanche 5: 553-576. doi: <https://doi.org/10.1051/lhb/1966034>.
- Doorenbos, J. and W. Pruitt. 1977. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper no. 24. FAO. Rome, Italy.
- Lapo Pauta, C. M. y R. Pérez García. 2013. Diseño óptimo de sistemas de riego a presión. Aplicación en casos (Ecuador). Rev. Invest. Agr. Amb. 4: 49-64. doi: 10.22490/21456453.980.
- Fernández R., D. S., M. R. Martínez M., C. A. Tavarez E., R. Castillo V. y R. Salas M. 2010. Estimación de las demandas de consumo de agua. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Colegio de Postgraduados. México, D. F.
- Pizarro Cabello, F. 1996. Riegos localizados de alta frecuencia. Mundi-Prensa. Madrid, España. ISBN: 84-7114-171-X.
- Planells, P., J. F. Ortega, M. Valiente, J. Montero y J. M. Tarjuelo. 1999. Criterios para el diseño de redes colectivas de riego. Ing. Agua 6: 27-36. doi: <https://doi.org/10.4995/ia.1999.2773>.
- Rossman, L. A. 2000. EPANET2 User's manual, EPA/600/R-00/057. Water Supply and Water Resources Division, U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, OH, USA.