



## III CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2017

Puebla, Pue., del 28 al 30 de noviembre de 2017

### PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA MEJORAR EL DISEÑO DE REDES COLECTIVAS DE RIEGO ENTUBADAS

**Jorge Andrés Castillo González<sup>1\*</sup>; Juan Carlos Herrera Ponce<sup>2</sup>; María Dolores Olvera Salgado<sup>3</sup>; Helene Unland<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup> Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

Correo electrónico: [jorgecas@tlaloc.imta.mx](mailto:jorgecas@tlaloc.imta.mx) – Teléfono: 01 777 3293658 (\*Autor de correspondencia)

#### Resumen

En México y en diversas partes del mundo se utilizan, desde hace años, redes colectivas entubadas de riego, donde cada parcela pertenece a diferentes usuarios, puede tener varios cultivos con fechas de siembra y de riego diferentes, lo que hace su diseño más complejo. En el diseño de una red de riego colectiva entubada la utilización de circuitos cerrados posibilita la disminución de diámetros y el incremento de la disponibilidad de agua por toma, mejorando el servicio de riego, sin embargo, el hacer esto de forma óptima implica la realización de un gran número de cálculos, por lo que se utilizan herramientas computacionales de cálculo y diseño. Es necesario que estos cálculos se hagan de forma ordenada siguiendo un procedimiento metodológico para llegar a un resultado satisfactorio. En este trabajo se describe una propuesta metodológica; la cual, es resultado de la experiencia en el diseño de redes colectivas de riego en algunos proyectos como del IMTA en Michoacán, Chihuahua, Guerrero y Veracruz. El resultado son sistemas de riego que funcionan bajo las condiciones de operación previstas en su diseño, lo que ha resultado en sistemas con muy buena flexibilidad, sin ser 100% a demanda libre.

**Palabras clave:** redes entubadas, sistemas colectivos, circuitos cerrados.



## Introducción

En México se utilizan, desde hace algunos años, sistemas de riego colectivos con el fin de resolver problemáticas de distribución de agua para riego en superficies caracterizadas por la tenencia de la tierra de fraccionada, siendo en su mayoría ejidal y comunal, y una menor porción de pequeña propiedad.

El diseño de sistemas de riego colectivo a diferencia del diseño de un sistema de riego individual requiere de la consideración de la seguridad en el suministro del agua que implica generalmente un sobredimensionamiento de la red, comparada con la red individual. Para resolver esto puede ser conveniente la utilización circuitos de redes cerradas en lugar de redes abiertas como tradicionalmente se ha hecho, generalmente la mejor opción es la combinación de circuitos de tuberías cerradas con algunos secciones abiertas. La cantidad de una y otra de pende del nivel de flexibilidad (confiabilidad en el suministro del agua) que se desee en cada hidrante o punto de entrega, a mayor flexibilidad mayor diámetro de las tuberías, lo cual puede ser compensado cerrando circuitos, la cantidad optima de circuitos cerrados depende en gran medida de la flexibilidad del sistema seleccionada para su diseño.

El proceso de diseño de un sistema de riego colectivo en general puede dividirse en cinco etapas (Patricio Planeéis et al. 2001):

1°.- La primera consiste en la localización de los hidrantes y tuberías en plano procurando minimizar la longitud total de la red.

2°.- La segunda etapa consiste en el cálculo de la descarga por hidrante de acuerdo al tamaño de la parcela que riega,

3°.- En la tercera etapa se calculan los gastos en las tuberías considerando un cierto nivel de seguridad de la demanda.

4°.- En la cuarta etapa se dimensionan la red, es decir, se calculan los diámetros que satisfacen la demanda requerida respetando condiciones de velocidad y pérdida de carga máximas, y que minimice el costo de la red, con esto se tiene la red diseñada.

5°.- La quinta etapa en la que se realiza un análisis del funcionamiento de la red bajo diversas condiciones de operación resulta conveniente para garantizar el funcionamiento del sistema.

Aquí se realiza una ligera modificación considerando la gran cantidad de combinaciones de gasto que puede darse en la operación del sistema, se presenta un ejemplo de cómo se realiza el diseño de una red colectiva de riego siguiendo algunas consideraciones a los pasos antes mencionados y que no son aplicables en todos los casos, sobre todo cuando se utilizan redes cerradas.

El dimensionamiento de una red de tuberías para riego implica diferentes consideraciones para llegar al diseño óptimo, es decir, que minimice el costo tanto de instalación como de operación y al mismo tiempo tenga la capacidad de satisfacer las necesidades de conducción de agua para riego con un alto grado de seguridad. Las redes colectivas de tuberías para riego son relativamente nuevas, aunque los sistemas de



canales para riego en sistemas donde la tenencia de la tierra es fraccionada tiene ya algún tiempo relajándose en los diferentes distritos de riego del país. Debido a las características de los canales a cielo abierto, las metodologías de diseño de éstos no son extrapolables, o por lo menos no es conveniente, al diseño de redes de tuberías para riego en sistemas colectivos.

El diseño de redes colectivas de tuberías para riego en un principio no consideró el concepto de garantía de suministro ni flexibilidad, diseñándose para regar mediante tandeos rigurosos, sin ninguna flexibilidad, obligando a los usuarios a sujetarse a la programación del riego en un estricto orden que no considera las necesidades particulares de cada cultivo dentro del sistema. Esta forma de diseño y operación funciona relativamente bien cuando se tienen cultivos resistentes y de poco valor comercial como maíz o sorgo, donde el retraso o adelanto del riego no afecta significativamente la producción (rendimiento), además, la poca pérdida de producción debida a riegos inoportunos no justifica sistemas de riego más costosos.

Las necesidades actuales de riego para cultivos de mayor valor comercial como las hortalizas y las nuevas generaciones de granos más productivos, pero al mismo tiempo más sensibles a la sequía, hacen que los sistemas de riego tengan que garantizar un mejor suministro con el objetivo de dar riegos oportunos.

En México los sistemas de riego entubados colectivos se han diseñado en forma muy similar a los sistemas de canales, por lo que en muchos casos se ha tenido que aplicar el tandeo riguroso, por lo menos en la época de máxima demanda evapotranspirativa. En el presente trabajo se presenta un ejemplo de diseño considerando la flexibilidad y la utilización de circuitos cerrados. Aquí se aplica una metodología de diseño propuesta, el objetivo de esta es contar con una herramienta de diseño en la que se puedan aplicar diferentes criterios de flexibilidad, optimizando el diseño con el uso de redes cerradas combinadas con abiertas, ya que las metodologías actuales son básicamente para redes abiertas, de esta manera aprovechar las ventajas que ofrecen las redes cerradas en un diseño optimizado.

## **Materiales y métodos**

Para explicar la metodología primero se dan los pasos a seguir y enseguida se muestra un diseño realizado con esta metodología en el cálculo de una red colectiva de riego por aspersión para caña de azúcar en una superficie aproximada de 570 hectáreas en Juan Díaz Covarrubias, Veracruz, dentro del área del Ingenio Cuatotolapam.

Para el diseño de un sistema colectivo de riego entubado, el primer paso es el trazo de la red, la colocación de los hidrantes y su conexión mediante tuberías, este trazo debe hacerse considerando la mejor ubicación de los hidrantes y la menor longitud de tubería con el fin de minimizar el costo del sistema. La ubicación de los hidrantes depende de la topología de las parcelas, su forma, distribución y tamaño, el gasto modular de un hidrante generalmente varía de 20 a 60 l/s por lo que éste debe cubrir una superficie variable de 2 a 6 ha, generalmente es recomendable la instalación de un hidrante en la parte más alta de la parcela del usuario, si estas es mayor a la superficie máxima que



puede cubrir cada hidrante se tendrán que colocar más de un hidrante. En superficies demasiado pequeñas, menores de una hectárea generalmente es posible colocar hidrantes compartidos.

Para el trazo de la red de tuberías existen algunos algoritmos de optimización (minimización) de la longitud. Sin embargo, generalmente no es conveniente meter tubería por el centro de las parcelas, por lo regular la tubería debe ponerse en los linderos debido a que esto facilita su instalación. Debido esto generalmente el trazo mínimo obtenido mediante algún algoritmo puede servir de guía pero no de trazo definitivo. El uso de estos algoritmos no se tratará en este trabajo.

Una vez que se tiene el trazo de la red es necesario proponer la reglas de operación del sistema para lo cual se requiere dividir la zona del proyecto en secciones de riego dentro de las cuales los usuarios tendrán que organizarse para el riego, ya sea para la rotación de tuberías o para abrir y cerrar válvulas en líneas regantes.

Considerando la capacidad máxima del sistema de riego, el gasto se divide entre el número de secciones de riego considerando la operación en máxima demanda, este gasto queda disponible de manera libre dentro de cada sección de riego, en este caso el gasto por sección puede ser de uno, dos o más gastos modulares, de tal manera que el número de hidrantes que puede abrirse en cada sección de riego es el número de gastos modulares que le corresponde. Generalmente cada sección se diseña para que se puedan abrir los hidrantes correspondientes en cualquier orden y en la cantidad máxima permitida por sección.

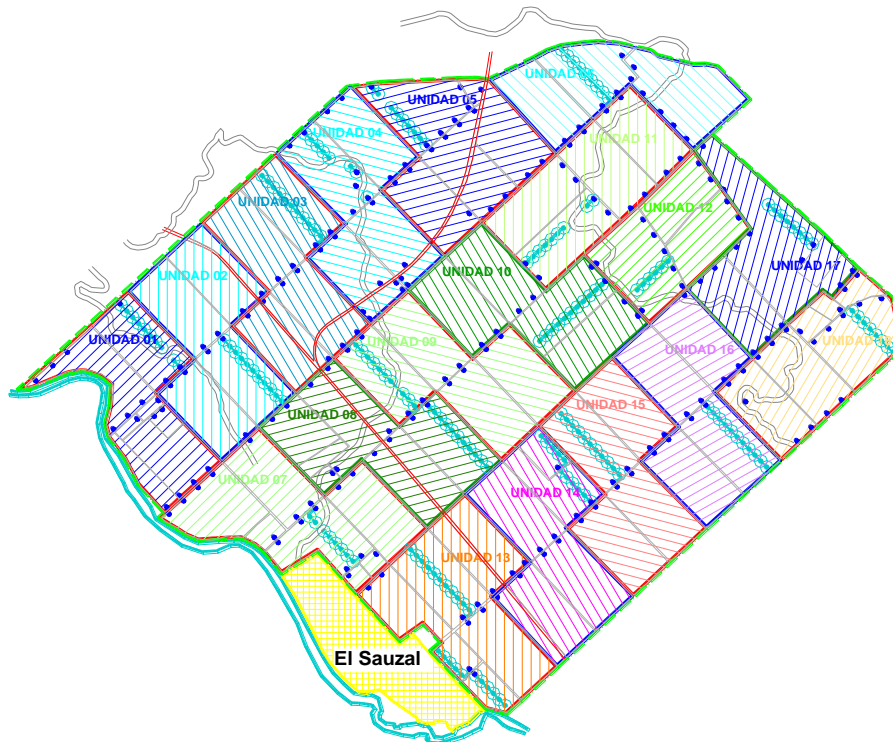
Teniendo las secciones sobre el plano con los trazos de tuberías y las posibles combinaciones de hidrantes trabajando simultáneamente se procede al cálculo de los diámetros de las tuberías mediante un proceso iterativo en el cual se proponen diámetros y se calculan las condiciones hidráulicas como son: gasto, velocidad y pérdida de carga, este cálculo se repite para cada combinación de hidrante abierto o por lo menos para una cantidad representativa de las posibles combinaciones, de tal manera que se tienen las variables hidráulicas máximas y mínimas para cada tramo; en base a los resultados de anteriores la red se redimensiona y se calculan nuevamente las variables hidráulicas extremas (máximas y mínimas). Este proceso se repite hasta que se llegue a un resultado satisfactorio, el redimensionamiento puede ser un proceso tedioso, o puede converger rápidamente a la solución deseada dependiendo en gran medida de la experiencia del diseñador y en el conocimiento de la red que está diseñando.

El cálculo puede realizarse mediante un programa como el EPANET 2, el cual es de distribución gratuita, fue elaborado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y puede obtenerse en la página de la misma (<http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/epanet.html>). También puede encontrarse una traducción al español en la página de la Universidad Politécnica de Valencia. El EPANET 2 resuelve redes cerradas y también tiene la capacidad de hacer simulaciones de diferentes condiciones de flujo además de concentraciones de contaminantes. El programa cuenta también con un “toolkit” que permite llamar funciones de EPANET desde programas compilados en Delphi, C++, Visual Basic, etcétera.

## Desarrollo

Para describir la metodología propuesta, se utilizó el cálculo de una red colectiva de riego por aspersión para caña de azúcar en una superficie aproximada de 570 hectáreas; la fuente de abastecimiento es agua de un río en el extremo sur de la superficie de riego. Las parcelas tienen en promedio 8 hectáreas y en su mayoría tienen una forma regular de 200 metros de ancho por 400 metros de largo. El sistema de riego seleccionado fue aspersión portátil manual con líneas de riego de 378 metros de largo con once cañones espaciados 36 metros, el espaciamiento de la líneas regantes es de 42, la tubería de la línea regante es de 6 pulgadas de aluminio con acoplamientos rápidos, el gasto de la línea regante es de 26 l/s (cada cañón de 2.36 l/s), la presión de operación de la línea regante es de 3 Kg./cm<sup>2</sup>, la superficie de cada sección se divide en promedio en 20 posiciones de riego.

La superficie se dividió en dieciocho secciones de riego, como se muestra en la figura 1. En este seccionamiento se procuró que las superficies de todas las secciones fueran de la misma superficie con fines operativos, la planta de bombeo se localiza sobre el río más o menos al centro de la línea de frontera de la zona de riego con el río.



**Figura 1.** Secciones operativas

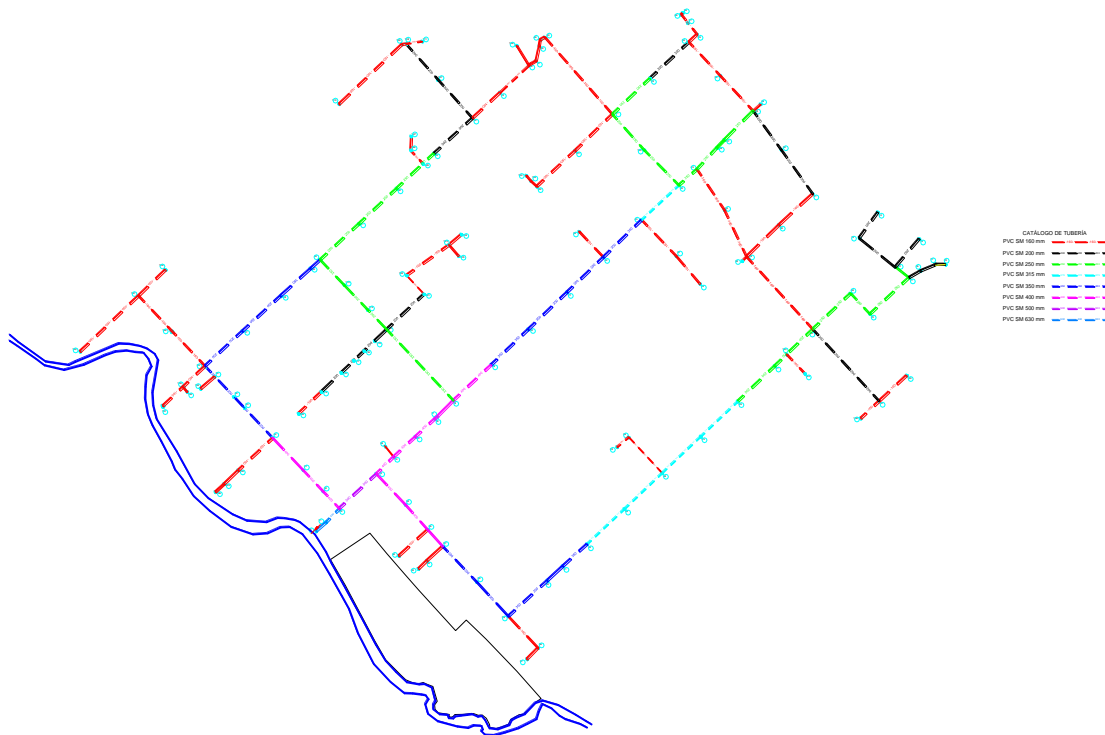
En la figura 1. Pueden verse los hidrantes marcados con puntos, en cada uno de estos hidrantes se conecta una línea portátil de riego, en cada sección solo puede haber una línea de riego trabajando, el tiempo de operación de la unidad operativa (sección) es de

4.44 días y el intervalo de riego es de 5 días, lo que da una flexibilidad en la época crítica de 0.126.

La red de tuberías se trazó por los linderos de las parcelas, tratando de minimizar la longitud de las mismas y cerrando algunos circuitos para poder dar lago de flexibilidad al sistema. Considerando las condiciones de operación y los requerimientos de gasto y presión se realizó el dimensionamiento de la red mediante el procedimiento mencionado.

## Resultados

Los datos del sistema de ejemplo se presentan enseguida, la red de tuberías resultante se muestra en la figura 2, consta de tubería de PVC de 6 hasta 24 pulgadas. Los resultados de los cálculos se muestran en la tabla 1. Para el cálculo de las variables hidráulicas del sistema se utilizaron ocho combinaciones de hidrantes trabajando simultáneamente, en estas combinaciones se trató de abarcar la totalidad de condiciones más críticas con el objetivo de asegurar el óptimo funcionamiento de la red.



**Figura 2.** Distribución de tuberías

La presión máxima en la red es de 50 metros de columna de agua (mca), lo que implica una pérdida de carga de 20 mca con respecto al requerimiento de presión de 30 mca al inicio de la línea regante de cañones. El flujo máximo en la red es de 468 l/s, la velocidad máxima en la red es de 2.1 m/s, sin embargo, la gran mayoría de los tramos no sobrepasa los 1.8 m/s, el tramo con menor velocidad trabajando es de 0.8 m/s, la mayoría de las velocidades fluctúa alrededor de 1.5 m/s. El uso de circuitos cerrados permitió reducir los



diámetros de algunos tramos de tubería ya que el flujo es repartido y no concentrado en una sola tubería.

El procedimiento de diseño aplicado a este trabajo permite llegar a un resultado funcional para regar caña de azúcar mediante aspersión utilizando una línea portátil manual de once cañones (aspersores gigantes). El procedimiento hace factible la utilización de redes cerradas en lugar de usar redes abiertas como tradicionalmente se ha hecho, esto permite aumentar la flexibilidad del sistema sin incrementar demasiado los diámetros del sistema.

La utilización de redes de tuberías cerradas para sistemas de riego colectivos permite incrementar la flexibilidad del sistema permitiendo riegos más oportunos y cultivos de mayor valor ya sea por tener más rendimiento y/o mejor calidad del producto. La flexibilidad del sistema es variable dependiendo de la demanda máxima evapotranspirativa, que es cuando la flexibilidad es la mínima. El nivel mínimo de flexibilidad depende en gran medida de las expectativas de valor del cultivo, en un cultivo de gran valor es recomendable contar con una mayor seguridad del suministro de agua para riego y esta seguridad depende en gran parte de la flexibilidad del sistema.

El procedimiento para calcular la flexibilidad mínima aun es tema de discusión, por lo que este valor es decisión del diseñador y depende en gran parte de experiencia del mismo, tanto en el diseño como en la operación de sistemas de riego colectivos.

Reeditando el procedimiento quedaría:

1°.- La primera consiste en la localización de los hidrantes y tuberías en plano procurando minimizar la longitud total de la red.

2°.- La segunda etapa consiste en el cálculo de la descarga por hidrante de acuerdo al tamaño de la parcela que riega, generalmente los se usan gastos modulares, múltiplos o submúltiplos de un gasto dado dependiendo del tamaño de la parcela, en muchos casos se usa un gasto para todos los hidrantes. Aquí hay un ajuste, debido a que prácticamente todos los hidrantes se utilizaran en algún momento, pero no todos funcionan simultáneamente, entonces se proponen reglas de operación de los hidrantes y con esto se realizan una cantidad "n" de posibles combinaciones de funcionamiento de los hidrantes dependiendo de las reglas de operación, el número de combinaciones suele ser muy grande para realizarlos a la vez incluso con sistemas de cálculo como EPANET, por lo que se utilizó otro software que se apoyó en EPANET para los cálculos hidráulicos.

3°.- En la tercera etapa se comparan las envolventes de gastos, presión, y velocidad en las tuberías, que son los determinantes en el diseño de estas tuberías.

4°.- En la cuarta etapa se re-dimensiona la red, considerando los valores envolventes resultantes del cálculo anterior, generalmente solo los diámetros se modifican pero puede modificarse el trazo si se considera necesario, aquí se puede añadirse el costo como una variable más en el análisis. Esto se hace de forma iterativa hasta que se encuentra un resultado satisfactorio.



**Tabla 1. Diámetros de la red y sus características hidráulicas**

| Tramo | Nodo inicial | Nodo final | Longitud (m) | Diámetro nominal (mm) | Velocidad máxima (m/s) | Gasto máximo (l/s) | Presión min nodo final (m) | Tramo | Nodo inicial | Nodo final | Longitud (m) | Diámetro nominal (mm) | Velocidad máxima (m/s) | Gasto máximo (l/s) | Presión min nodo final (m) |
|-------|--------------|------------|--------------|-----------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|-------|--------------|------------|--------------|-----------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|
| 10    | 10           | 11         | 56.1         | 630                   | 1.66                   | 468.0              | 50.1                       | 80    | 80           | 81         | 188.8        | 160                   | 1.24                   | 22.5               | 39.1                       |
| 11    | 11           | 12         | 78.6         | 630                   | 1.66                   | 468.0              | 50.0                       | 81    | 81           | 82         | 222.7        | 200                   | 0.99                   | 28.0               | 39.4                       |
| 12    | 12           | 13         | 208.7        | 500                   | 1.98                   | 351.4              | 49.0                       | 82    | 79           | 83         | 212.6        | 160                   | 1.24                   | 22.6               | 38.1                       |
| 13    | 13           | 14         | 100.1        | 400                   | 2.01                   | 228.0              | 48.6                       | 83    | 64           | 84         | 201.9        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 37.4                       |
| 14    | 14           | 15         | 122.6        | 400                   | 1.83                   | 207.5              | 47.7                       | 84    | 84           | 85         | 63.9         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 36.6                       |
| 15    | 15           | 16         | 108.7        | 400                   | 1.78                   | 202.0              | 47.4                       | 85    | 59           | 86         | 178.3        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 41.3                       |
| 16    | 16           | 17         | 14.1         | 400                   | 1.78                   | 202.0              | 47.4                       | 86    | 86           | 87         | 66.2         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 40.4                       |
| 17    | 17           | 18         | 93.5         | 400                   | 1.78                   | 202.0              | 46.5                       | 87    | 57           | 88         | 88.2         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 46.4                       |
| 18    | 18           | 19         | 213.4        | 400                   | 1.54                   | 174.4              | 45.5                       | 88    | 88           | 89         | 47.8         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 45.3                       |
| 19    | 19           | 20         | 211.5        | 355                   | 1.91                   | 170.0              | 44.7                       | 89    | 56           | 90         | 160.0        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 45.4                       |
| 20    | 20           | 21         | 222.7        | 355                   | 1.89                   | 168.4              | 44.2                       | 90    | 23           | 91         | 205.8        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 39.8                       |
| 21    | 21           | 22         | 206.9        | 355                   | 1.61                   | 144.0              | 44.2                       | 91    | 91           | 92         | 150.7        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 37.2                       |
| 22    | 22           | 23         | 220.7        | 355                   | 1.60                   | 142.4              | 43.2                       | 92    | 22           | 93         | 145.7        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 42.2                       |
| 23    | 23           | 24         | 209.7        | 315                   | 1.66                   | 116.4              | 42.3                       | 93    | 14           | 94         | 51.5         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 48.0                       |
| 24    | 24           | 25         | 99.6         | 250                   | 1.44                   | 63.8               | 42.1                       | 94    | 79           | 95         | 26.3         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 36.5                       |
| 25    | 25           | 26         | 120.5        | 250                   | 1.02                   | 45.0               | 40.7                       | 95    | 53           | 96         | 46.8         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 38.7                       |
| 26    | 26           | 27         | 44.4         | 250                   | 1.02                   | 45.0               | 40.6                       | 96    | 96           | 97         | 60.8         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 38.1                       |
| 27    | 27           | 28         | 168.6        | 250                   | 1.02                   | 45.0               | 39.5                       | 97    | 97           | 98         | 43.5         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 37.5                       |
| 28    | 28           | 29         | 41.6         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 38.7                       | 98    | 98           | 99         | 7.4          | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 37.5                       |
| 29    | 12           | 30         | 100.1        | 400                   | 1.23                   | 139.5              | 50.2                       | 99    | 51           | 52         | 214.3        | 250                   | 0.87                   | 38.4               | 39.9                       |
| 30    | 30           | 31         | 119.9        | 400                   | 1.23                   | 139.5              | 50.2                       | 100   | 51           | 101        | 214.2        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 36.6                       |
| 31    | 31           | 32         | 183.0        | 400                   | 1.23                   | 139.5              | 50.2                       | 101   | 101          | 102        | 216.3        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 33.5                       |
| 32    | 32           | 33         | 168.5        | 355                   | 1.56                   | 139.5              | 49.4                       | 102   | 102          | 103        | 33.0         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 33.1                       |
| 33    | 33           | 34         | 63.5         | 355                   | 1.56                   | 139.5              | 49.2                       | 103   | 103          | 104        | 29.0         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 32.7                       |
| 34    | 34           | 35         | 114.7        | 355                   | 1.56                   | 139.5              | 48.9                       | 104   | 51           | 105        | 197.6        | 250                   | 1.02                   | 45.1               | 40.9                       |
| 35    | 35           | 36         | 56.4         | 355                   | 1.56                   | 139.5              | 48.7                       | 105   | 46           | 106        | 97.3         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 37.6                       |
| 36    | 36           | 37         | 213.8        | 355                   | 1.14                   | 101.8              | 48.7                       | 106   | 44           | 107        | 211.4        | 200                   | 1.84                   | 52.0               | 40.1                       |
| 37    | 37           | 38         | 214.1        | 355                   | 1.14                   | 101.8              | 48.5                       | 107   | 107          | 108        | 199.5        | 200                   | 1.84                   | 52.0               | 37.0                       |
| 38    | 38           | 39         | 167.6        | 355                   | 1.10                   | 97.9               | 47.9                       | 108   | 108          | 109        | 16.8         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 36.8                       |
| 39    | 39           | 40         | 53.7         | 355                   | 0.85                   | 75.8               | 48.0                       | 109   | 109          | 110        | 358.2        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 32.3                       |
| 40    | 40           | 41         | 217.5        | 250                   | 1.53                   | 67.5               | 46.6                       | 110   | 108          | 111        | 67.4         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 36.2                       |
| 41    | 41           | 42         | 213.1        | 250                   | 1.53                   | 67.5               | 44.4                       | 111   | 40           | 112        | 143.1        | 250                   | 0.80                   | 35.3               | 47.8                       |
| 42    | 43           | 145        | 61.4         | 250                   | 1.18                   | 52.3               | 42.9                       | 112   | 112          | 113        | 140.3        | 250                   | 0.80                   | 35.3               | 46.9                       |
| 43    | 43           | 44         | 215.8        | 200                   | 1.75                   | 49.6               | 40.9                       | 113   | 113          | 114        | 113.1        | 250                   | 0.80                   | 35.3               | 46.5                       |
| 44    | 44           | 45         | 155.3        | 160                   | 1.45                   | 26.3               | 40.2                       | 114   | 114          | 115        | 65.0         | 200                   | 1.84                   | 52.0               | 46.0                       |
| 45    | 45           | 46         | 162.5        | 160                   | 1.06                   | 19.3               | 38.9                       | 115   | 115          | 116        | 60.8         | 200                   | 1.84                   | 52.0               | 44.8                       |
| 46    | 46           | 47         | 35.4         | 160                   | 1.06                   | 19.3               | 39.0                       | 116   | 116          | 117        | 58.6         | 200                   | 1.84                   | 52.0               | 44.2                       |
| 47    | 47           | 48         | 60.7         | 160                   | 1.06                   | 19.3               | 39.6                       | 117   | 117          | 118        | 72.2         | 200                   | 1.84                   | 52.0               | 43.0                       |
| 48    | 48           | 49         | 31.2         | 160                   | 0.93                   | 16.9               | 39.9                       | 118   | 118          | 119        | 113.6        | 200                   | 1.84                   | 52.0               | 41.3                       |
| 49    | 49           | 50         | 17.7         | 160                   | 0.93                   | 16.9               | 39.9                       | 119   | 119          | 120        | 172.2        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 38.9                       |
| 50    | 50           | 51         | 422.9        | 160                   | 0.93                   | 16.9               | 39.8                       | 120   | 114          | 121        | 214.7        | 200                   | 0.92                   | 26.0               | 45.2                       |
| 52    | 52           | 53         | 219.2        | 200                   | 1.20                   | 33.9               | 38.7                       | 121   | 121          | 122        | 105.3        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 44.2                       |
| 53    | 53           | 54         | 190.1        | 160                   | 0.75                   | 13.6               | 39.3                       | 122   | 122          | 123        | 215.6        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 41.6                       |
| 54    | 13           | 55         | 173.9        | 400                   | 1.35                   | 152.7              | 48.7                       | 123   | 123          | 124        | 67.5         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 41.3                       |
| 55    | 55           | 56         | 138.0        | 400                   | 1.35                   | 152.7              | 48.1                       | 124   | 123          | 125        | 60.6         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 40.8                       |
| 56    | 56           | 57         | 92.7         | 400                   | 1.35                   | 152.7              | 47.5                       | 125   | 36           | 126        | 200.4        | 200                   | 1.84                   | 52.0               | 46.6                       |
| 57    | 57           | 58         | 202.4        | 355                   | 1.71                   | 152.7              | 45.5                       | 126   | 126          | 127        | 200.4        | 200                   | 1.84                   | 52.0               | 44.0                       |
| 58    | 58           | 59         | 192.8        | 355                   | 1.71                   | 152.7              | 43.7                       | 127   | 127          | 128        | 154.7        | 200                   | 1.84                   | 52.0               | 41.6                       |
| 59    | 59           | 60         | 217.4        | 355                   | 1.71                   | 152.7              | 41.7                       | 128   | 127          | 129        | 334.1        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 42.8                       |
| 60    | 60           | 61         | 87.3         | 355                   | 1.53                   | 136.7              | 41.8                       | 129   | 36           | 130        | 119.3        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 46.4                       |
| 61    | 61           | 62         | 135.8        | 355                   | 1.53                   | 136.7              | 41.2                       | 130   | 130          | 131        | 118.8        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 45.1                       |
| 62    | 62           | 63         | 211.7        | 315                   | 1.80                   | 126.7              | 39.9                       | 131   | 130          | 132        | 25.5         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 46.0                       |
| 63    | 63           | 64         | 214.8        | 315                   | 1.80                   | 126.7              | 38.9                       | 132   | 35           | 133        | 76.2         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 48.6                       |
| 64    | 64           | 65         | 218.2        | 315                   | 1.43                   | 100.7              | 38.3                       | 133   | 32           | 134        | 195.1        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 47.5                       |
| 65    | 65           | 66         | 210.4        | 315                   | 1.43                   | 100.5              | 37.2                       | 134   | 134          | 135        | 80.6         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 45.9                       |
| 66    | 66           | 67         | 211.3        | 250                   | 1.68                   | 74.5               | 35.9                       | 135   | 135          | 136        | 49.5         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 45.0                       |
| 67    | 68           | 143        | 149.3        | 250                   | 1.68                   | 74.5               | 35.3                       | 136   | 68           | 137        | 401.4        | 200                   | 0.92                   | 26.0               | 33.8                       |
| 68    | 68           | 69         | 213.5        | 250                   | 1.17                   | 52.0               | 34.7                       | 137   | 137          | 138        | 146.1        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 32.0                       |
| 69    | 69           | 70         | 118.2        | 250                   | 1.17                   | 52.0               | 34.2                       | 138   | 137          | 139        | 156.7        | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 33.8                       |
| 70    | 70           | 71         | 220.3        | 250                   | 1.17                   | 52.0               | 33.1                       | 142   | 67           | 143        | 68.7         | 250                   | 1.68                   | 74.5               | 35.3                       |
| 71    | 71           | 72         | 71.4         | 250                   | 1.17                   | 52.0               | 33.0                       | 143   | 143          | 144        | 89.6         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 34.1                       |
| 72    | 72           | 73         | 190.9        | 200                   | 0.92                   | 26.0               | 32.2                       | 144   | 42           | 145        | 150.0        | 250                   | 1.53                   | 67.5               | 42.9                       |
| 73    | 73           | 74         | 132.0        | 200                   | 0.92                   | 26.0               | 31.6                       | 145   | 145          | 146        | 58.3         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 42.2                       |
| 74    | 72           | 75         | 152.3        | 200                   | 1.84                   | 52.0               | 32.0                       | 146   | 146          | 147        | 58.7         | 160                   | 1.43                   | 26.0               | 41.5                       |
| 75    | 71           | 76         | 55.2         | 200                   | 0.92                   | 26.0               | 32.9                       | 601   | 28           | 54         | 198.0        | 160                   | 1.00                   | 18.1               | 39.3                       |
| 76    | 76           | 77         | 68.2         | 200                   | 0.92                   | 26.0               | 32.6                       | 602   | 28           | 82         | 197.0        | 200                   | 0.99                   | 28.0               | 39.4                       |
| 77    | 77           | 78         | 42.7         | 200                   | 0.92                   | 26.0               | 32.4                       | 603   | 25           | 83         | 201.6        | 160                   | 2.05                   | 37.2               | 38.1                       |
| 78    | 68           | 79         | 404.4        | 160                   | 1.06                   | 19.3               | 36.9                       | 604   | 24           | 105        | 203.2        | 250                   | 1.06                   | 46.8               | 40.9                       |
| 79    | 79           | 80         | 187.8        | 160                   | 1.24                   | 22.5               | 38.1                       | 605   | 18           | 114        | 401.6        | 250                   | 1.05                   | 46.4               | 46.5                       |

En la figura 3 puede verse una gráfica de las velocidades en diferentes tramos de tubería y como estas varían desde valores mínimos cercanos al cero o cero a un máximo para cada tramo, aquí se ve que los máximos están alrededor de 1.6 a 1.9 m/s, esto debe de revisarse para cada tramo, asimismo para las presiones como se ve en la gráfica 4.



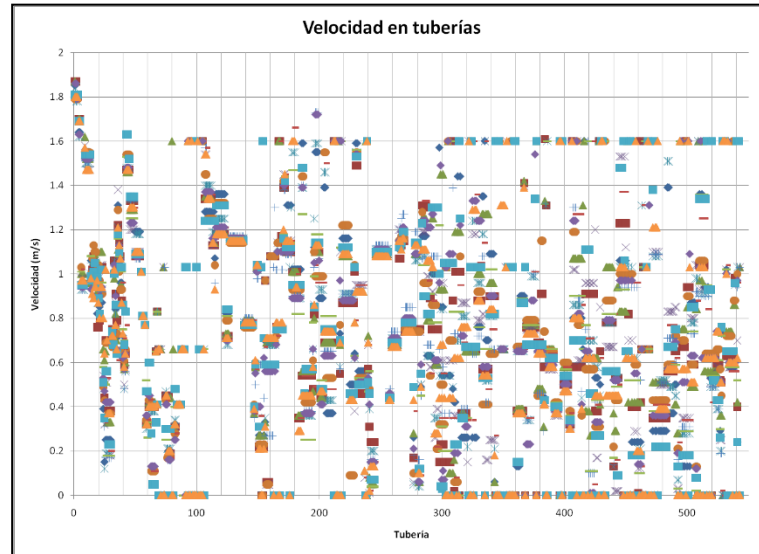


Figura 3. Velocidades en las tuberías de la red

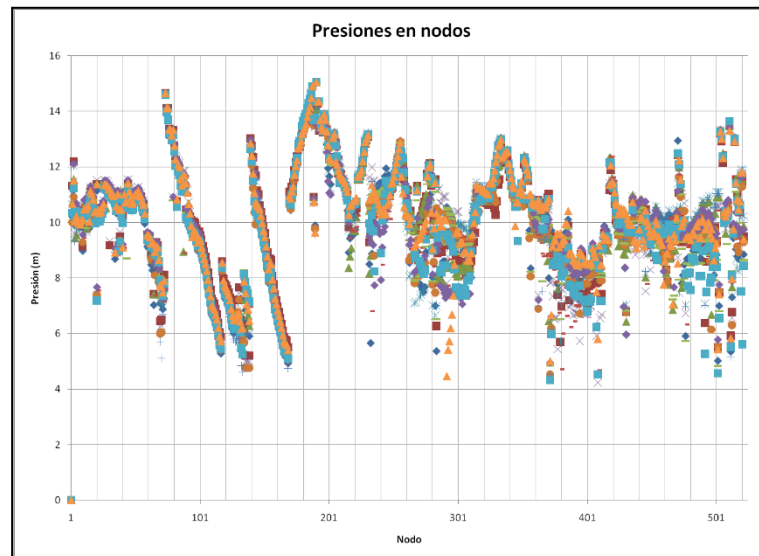


Figura 4. Presiones en los nodos (carga disponible)

## Conclusiones

El diseño de redes de distribución de agua de riego colectivas requiere de procedimientos que permitan aplicar el riego de forma oportuna y suficiente logrando con esto el incremento de la productividad y la calidad del producto. La metodología descrita permite el diseño de sistemas de riego colectivos que garanticen un mínimo de disponibilidad, dependiendo básicamente de las reglas de operación aplicadas en el diseño, las cuales



deben respetarse en la operación del sistema, de lo contrario no puede garantizarse que las suposiciones del diseño se cumplan. La propuesta metodológica ha servido para diseñar diversos sistemas, esta metodología puede complementarse con algún algoritmo de solución para llegar a la solución buscada de forma más rápida y susceptible de automatizarse.

### **Referencias bibliográficas**

Castillo González, Jorge, et al. (2004), *Tecnificación de una zona agrícola en el área de influencia del ingenio Cuatotolapam, Veracruz. Informe Final de Proyecto, IMTA.*

Magaña Sosa, Gustavo y Herrera Ponce, Juan Carlos (1995), *Programa para diseño de sistemas de riego parcelario y redes interparcelarias, Informe final del proyecto RD9504, IMTA.*

Planells Alandi, Patricio, Tarjuelo Martín-Benito, José M., et. al. (2001), *Design of water distribution networks for on-demand irrigation, Irrigation Science 20:189-201.*

Villamil Pérez, Julio Tomas (1999), *Análisis de las características de diseño de redes de conducción de agua de riego, Tesis profesional, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo..*