

# Modelación hidráulica de la red de distribución de agua potable en una ciudad Mexicana EPANET

Raúl A. Morelos<sup>1</sup> y Jorge Ramírez Hernández<sup>2</sup>

Ingeniería en Software<sup>1</sup>, Instituto de Ingeniería<sup>2</sup>

Universidad Estatal de Sonora<sup>1</sup>, Universidad Autónoma de Baja California<sup>2</sup>

San Luis Río Colorado, Sonora<sup>1</sup>, Mexicali, Baja California.<sup>2</sup>; México

morelosraul@gmail.com<sup>1</sup>, jorger@uabc.edu.mx<sup>2</sup>

**Abstract**— The urban and population growth forces the Water Supply Departments to continuously plan the expansion of the distribution network of drinking water from the demographic, topographic and hydraulic information which become imperative in a semiarid region with a condition of water scarcity and groundwater as unique source of water. This article proposes the analysis and design by computer of a potable water distribution network for an area of San Luis Río Colorado, Sonora Mexico, using EPANET. Results in the design, analysis and hydraulic modeling of the network, indicating that the pressures and flow rates in pipes are adequate to meet demand in the study area is presented.

**Keyword**— EPANET, water demand, nodal demand, water distribution, network design, network analysis.

**Resumen**— El crecimiento urbano y poblacional obliga a los Organismos Operadores de Agua a planificar continuamente la ampliación de la red de distribución de agua potable a partir de la información demográfica, topográfica e hidráulica lo que se hace imperioso en un ambiente de escasez de agua, clima semiárido y como única fuente, el agua subterránea. Este artículo propone análisis y diseño hidráulico por computadora de la red de agua potable para una zona de San Luis Río Colorado, Sonora México, utilizando EPANET. En los resultados se presenta el diseño, análisis y la modelación hidráulica, indicando que las presiones y las velocidades de flujo en las tuberías son adecuadas para satisfacer la demanda en la zona de estudio.

**Palabras claves**— EPANET, demanda de agua, demanda en nodos, distribución de agua, diseño de red, análisis de la red.

## I. INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución de agua potable que abastecen las ciudades es la interconexión de las tuberías, válvulas, tanques elevados, bombas entre otros que suministran el líquido a los consumidores bajo ciertas condiciones hidráulicas y son difíciles de operar y controlar por el constante crecimiento urbano y poblacional, lo que obliga a los OOAP (Organismos Operadores de Agua Potable) a planificar de forma continua el crecimiento de la red, la operación y el mantenimiento [1].

Debido a esta complejidad y a los problemas asociados como la obtención de recursos, suministro, calidad en el servicio y calidad en el agua se torna difícil su diseño para cualquier ciudad o poblado. Para el diseño de la RDAP (Red de Distribución de Agua Potable) o la ampliación de la ya existente es necesario investigar y conocer todas las características hidráulicas, poblacionales, topográficas y financieras para trazar una red confiable, con la presión adecuada en todos los puntos de demanda para que el sistema de suministro sea realmente efectivo [2].

A partir de la información de las características de la tubería, bombas, tanques elevados y del consumo de agua en los domicilios, el análisis hidráulico por computadora puede simplificar esta tarea. El uso de programas para el diseño y modelado de la RDAP aumenta cada día, al utilizar programas de dominio público como EPANET, REDCAD.8K, Branch, LOOP, HIDRUVAL, HidrasSoftware, NETIS, Giswater, tanto como los programas comerciales como WaterCAD, WaterGems, SCARED, Aquis, KYPIPE, H2O map. PIPE2014, HIDROFLO3 y otros [3-5].

Los programas anteriores se basan en las leyes físicas para analizar las redes utilizando algoritmos matemáticos programados que simulan el comportamiento hidráulico al resolver una serie de ecuaciones hidráulicas de presión y gasto, a partir de criterios establecidos como velocidad y presión en tuberías, presión en nodos y gastos de demanda [4].

El análisis hidráulico y la modelación también se apoyan en los Sistemas de Información Geográfica para la ubicación de tubería, tanques, altimetría, lotificación etc., y es útil para calcular los parámetros de demanda domiciliaria, basados en la información de las oficinas de catastro y desarrollo urbano [6].

En este estudio el programa EPANET se utilizó para el análisis y diseño, y el programa ArcGis para el cálculo de la demanda, lotificación, ubicación topográfica y altimetría. EPANET es un programa de dominio público que ha sido evaluado y utilizado por muchos investigadores para calibración y diseño [7-12].

## II. OBJETIVO

El objetivo es el diseño de la ampliación del RDAP en la región semidesértica del área sur de la ciudad de SLRC (San Luis Río Colorado, Sonora) para un futuro crecimiento urbano y poblacional de aproximadamente 25,000 habitantes, utilizando el programa EPANET para el cálculo hidráulico del proyecto. La RDAP debe contar con una adecuada presión en los puntos de demanda entre 15 y 22 mca, velocidades en las tuberías arriba de los 0.01 m/s pero menores de 2 m/s, las pérdidas de carga deben ser menores a 6m/Km y el suministro del líquido deberá ser a través de pozos en la zona.

## III. ANTECEDENTES

Son muchas las investigaciones realizadas para el análisis y diseño de RDAP, desde la aplicación de metodologías de optimización tradicional (métodos lineales y no lineales) hasta el modelado por computadora. En las últimas cuatro décadas los investigadores han empleado los métodos heurísticos y meta-heurísticos para el mismo fin, enfocándose a la búsqueda del costo mínimo en el diseño [12-18].

Muranho, et al. [10] evaluó los índices de gestión operativa de las RDAP apoyándose en EPANET y el módulo de WaterNetGen. En este caso WaterNetGen se aplicó para hacer el análisis de rendimiento en las tuberías, encontrando que los elementos de evaluación del desempeño incluidos en el programa pueden beneficiar a grandes poblaciones por su fácil manejo.

Toxky [19] se apoyó en EPANET para hacer el análisis hidráulico para automatizar la RDAP de una sección de la Delegación Miguel Hidalgo, en la Cd. de México, con el objetivo de dividir la red para controlar caudales y a su vez minimizar las fugas mediante la regulación de las presiones en los nodos de demanda. Cabrera and Tzatchkov [20] llevaron a cabo el estudio de Modelación y diseño de RDA (redes de distribución de agua) con suministro intermitente, en donde utilizan el modelo de manejo de aguas pluviales para cuantificar el escurrimiento y la calidad de agua que transporta este escurrimiento, utilizándolo como modelo para el llenado inicial de la RDA y una vez llena la red continúan con el modelado utilizando EPANET, modelando la RDA con tinacos como un depósito conectado a la red, recomendando el programa para el modelado de la red una vez presurizada.

Marchi, et al. [21] realizaron la comparación de las propuestas para optimizar el diseño y operación de la RDAP de varios algoritmos matemáticos (genéticos, evolución diferencial, colonia de hormigas, enjambre de partículas y rana saltarina) sobre el desempeño, la velocidad de convergencia y la consistencia de las soluciones y emplearon EPANET para la modelación hidráulica para cada algoritmo por ser un programa preciso y de fácil manejo.

Sayed, et al. [22] modelaron las presiones deficientes de la RDAP con el programa EPANET. Anisha, et al. [23] también hicieron uso del programa para el análisis y diseño de una RDAP en el municipio de Chirala en India, en donde analizaron la demanda pública de volúmenes de agua que entran y salen en los tanques elevados, pérdidas en la red y el la demanda de agua por parte de los usuarios. También hicieron un análisis en un futuro cercano para que el municipio tome precauciones en cuanto a futuros incrementos de la demanda de agua en base a la razón de crecimiento anual. En el mismo análisis observaron las mejoras a las redes existentes.

#### IV. ÁREA DE ESTUDIO

La imagen satelital de la zona de estudio fue tomada de ESRI Digital Globe en ArcMap. El mapa base es generado por el método de digitalización a través de AutoCad y se utilizó para distinguir lugares conocidos como iglesias, escuelas, parques recreativos etc. Las diferentes capas utilizadas como topografía, altimetría, lotificación y posibles fuentes de distribución de agua, ayudaron a estudiar el área.

El área de estudio se encuentra en el área sur de la ciudad, pasando el canal principal de la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), geográficamente está a 32°24' y 32°26' de latitud Norte, y 114°46' y 114°48' de longitud Oeste. Los terrenos pertenecen al Ejido La Grullita, en donde el Comisaría ejidal tiene en venta terrenos para casa-habitación (200 m<sup>2</sup> por lote) y cuya lotificación abarca un área aproximada de 955.4 Has sin urbanizar. Los planos adquiridos en la oficina de Desarrollo Urbano y Ecología avalan dicha lotificación, y la ampliación del área de estudio se encuentra limitando al Norte con el Canal Principal de la CONAGUA o Av. Argentina, al sur limita con la Subestación eléctrica del CFE hasta la Av. Haití B, al este con el relleno sanitario hasta la calle 30 y al Oeste con zona urbanizada del Ejido la Grullita hasta la Av. San Miguel, abarcando un área de 435 Has.

Es una zona semidesértica completamente plana, con vegetación matorral conocida como "Gobernadora" y las diferencias de elevación oscilan entre 1 y 1.5 m por cada 2.5 Km aproximadamente. En el área hay asentamientos desde la Av. San Miguel hasta la calle 26, de la Av. Argentina a la Av. Haití B, pero son muy irregulares, con una población aproximada de 4,000 habitantes. Las construcciones principales son notorias, como al Academia de Policía, Corralón Municipal, Juzgado tutelar y una planta recicladora particular, ver Fig. 1.

El área está proyectada como zona habitacional y hay algunas líneas de distribución de agua que abastecen la parte colindante con el Canal Principal de la CONAGUA, con tubería de 2.5 y 8 pulgadas de diámetro de material de plástico PVC, ver Fig. 2.

#### V. METODOLOGÍA

Varios programas fueron utilizados para crear la geometría de la RDAP como el ArcGis, Google earth, Microsoft Excel, Autocad, EpaCad y EPANET. La geometría de la red fue creada utilizando AutoCad V.14. La zona fue georeferenciada con Google earth en Autocad y se esqueletizó la red y posteriormente los archivos se convirtieron en formato \*.shp (shapefile) para ser trabajados en ArcMap (que es la aplicación principal de representación cartográfica en ArcGIS) para definir las distintas propiedades del mapa de la zona de estudio, colocar la capa de lotificación proporcionada por el departamento de DUE (Desarrollo Urbano y Ecología) y la de elevación topográfica de la zona. El programa EPANET es un programa desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y realiza análisis del comportamiento de los sistemas de distribución de agua de redes presurizadas y el seguimiento de la calidad del agua en los mismos en períodos estáticos y extendidos. Los datos de entrada definen las características de las tuberías, los nodos, el control de las bombas y válvulas en la red de distribución [24].

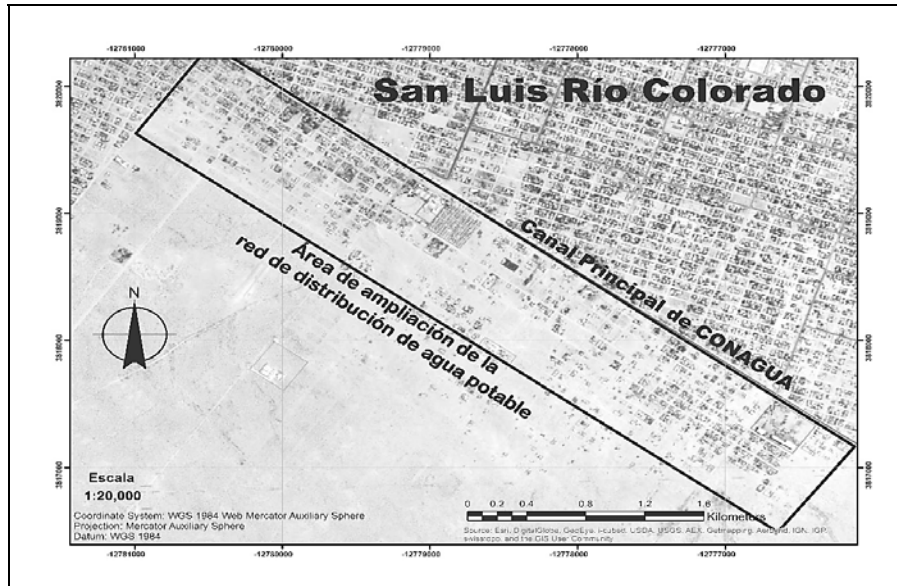


Fig. 1. Zona de ampliación de la red de distribución de agua potable al sur de la ciudad.

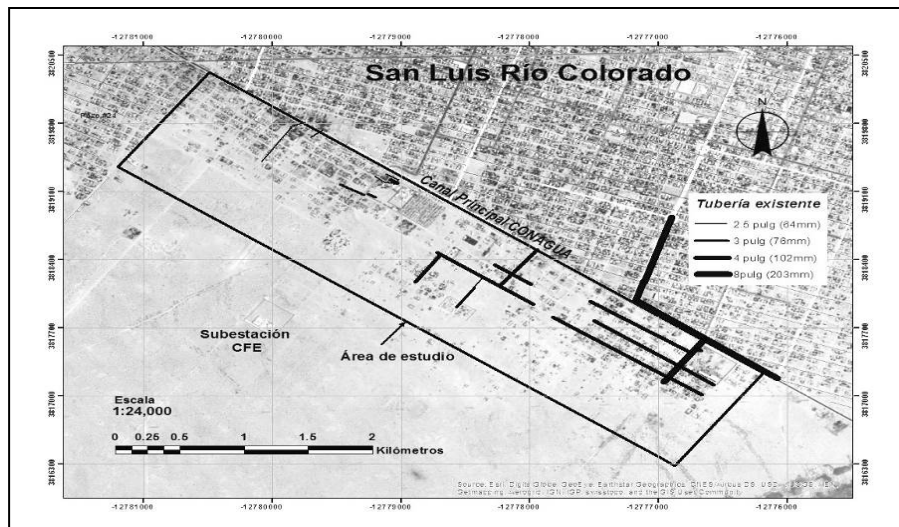


Fig. 2. Área de estudio donde se muestra la extensión actual de la red de agua potable.

El programa contiene un simulador avanzado que calcula las pérdidas de carga mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning, modela varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención y reguladoras de presión, emplea cinéticas de orden cero o de primer orden para modelar reacciones en las paredes de las tuberías, además de calcular el comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en un sistema de distribución de agua durante periodos de operación prolongados y no tiene restricciones en cuanto al número de nodos (ó nudos) a utilizar [24].

## VI. CÁLCULO DE LA POBLACIÓN

El diseño de la RDAP se basa en la lotificación para casa-habitación realizada por DUE y el Ejido “La Grullita” de la zona de estudio (435 has) con un índice de hacinamiento por hogar de 4.1 habitantes [25] y lotes de 10 a 20 m de frente y 20 de largo (200 y 400 m<sup>2</sup>). La población puede cambiar en los

próximos años dependiendo del tiempo en que se tarde en realizar el diseño. Este índice de hacinamiento es con que proyecta el Organismo Operador su ampliación y mejoras en la red.

## VII. CÁLCULO DE LA DEMANDA

La dotación media por habitante al día está calculada en 411.1 l/hab/día y el porcentaje de fugas (aprox. 30%), datos que se tomaron de los estudios realizados por el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) al Organismo Operador de Agua Potable en el período del 2003 al 2008 [26-28].

Para calcular la demanda en el área de estudio, se empleó el método de la repartición media o métodos de las longitudes de tuberías o gastos especiales (determinación de caudales en cada tramo del sistema repartiéndolos en partes iguales entre los nodos involucrados) y se calcula como la semisuma de los lotes entre nodos (1). Este resultado será el número de usuarios que se abastecen de ese nodo.

$$Q_{nodo} = 0.5 \sum Q_{dist} \quad (1)$$

$$Q_{dist} = \text{Suma de los gastos en los tramos}$$

$$Q_{nodo} = \text{Gastos en el nodo o demanda en el nodo}$$

La demanda actual se considera a la suma de los consumos para cada tipo de usuario más las pérdidas físicas y se obtiene generalmente multiplicando el consumo por cada tipo de usuario de cada sector, por el número correspondiente de ellos, ya sean habitantes, locales comerciales, etc. [4, 29]. El número de hogares se contabilizó utilizando la lotificación de DUE y de los planos del Ejido “Grullita”. La Tabla I muestran los datos calculados.

Tabla I. Información calculada a partir de la demanda base y consumo medio por habitante al día.

Datos del Sector hidrométrico 05		
Demanda de agua del sector:	156.99	L/s
Dotación promedio por habitante:	411.60	L/Hab/día
Dotación por vivienda:	1,687.60	L/Viv/día
Fugas en la red (~30% de la demanda):	36.23	L/s
Gasto medio:	120.76	L/s
Gasto Máximo Diario:	169.07	L/s
Gasto Máximo Horario:	262.05	L/s
Coefficiente de variación horaria:	1.55	[4]
Coefficiente de variación diaria:	1.40	[4]
Longitud de la tubería	60,648.12	Metros
Modo de suministro :	Pozo	
No. de viviendas:	6,097	
Índice de hacinamiento:	4.10	Hab/vivienda [25]
Total aproximado de habitantes:	23,000	
Dotación en usos múltiples	9.45	L/s (Jardines, clínicas, centro comercial, escuelas)



### VIII. DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

Debido a que la ampliación de la red es muy grande, se diseña como un proyecto nuevo y su configuración será una malla cerrada rectangular, abastecida por dos pozos de agua de 150 lps. El abastecimiento de agua será continuo durante las 24 horas del día los 365 días del año.

Se proyectan cinco entradas de agua a la red en caso de alguna contingencia del sector por medio de cinco válvulas de paso que deberán ser instaladas en: Av. Argentina y calle 26, Av. Argentina y calle 15, Av. Argentina y Calle 8, Av. Argentina entre calles 3 y 4 y Av. Argentina y Calle San Emeterio. Todas conectan con el sector Norte pasando el canal Principal de CONAGUA a través de las válvulas 3, 6, 8, 10 y 7 respectivamente.

El diámetro mínimo de la red es de 2.5 pulg (64 mm) y el máximo es de 14 pulg (356 mm) en la salida de las bombas de cada pozo.

Para preparar el archivo de base de datos en EPANET, se realizan los pasos siguientes:

- Se importa el diseño de la RDAP de AutoCad a EPANET utilizando el programa EPACAD (convierte archivos AutoCad a EPANET).
- Se esqueletiza la red en EPANET ver Fig. 3.
- Las propiedades hidráulicas para la RDAP como longitud, diámetro, etc., son asignadas así como la demanda base a cada nodo, ver Fig. 4 y 5.
- Se calcula el tipo de bomba a emplear dependiendo de la demanda base total y la demanda horaria [4, 30].

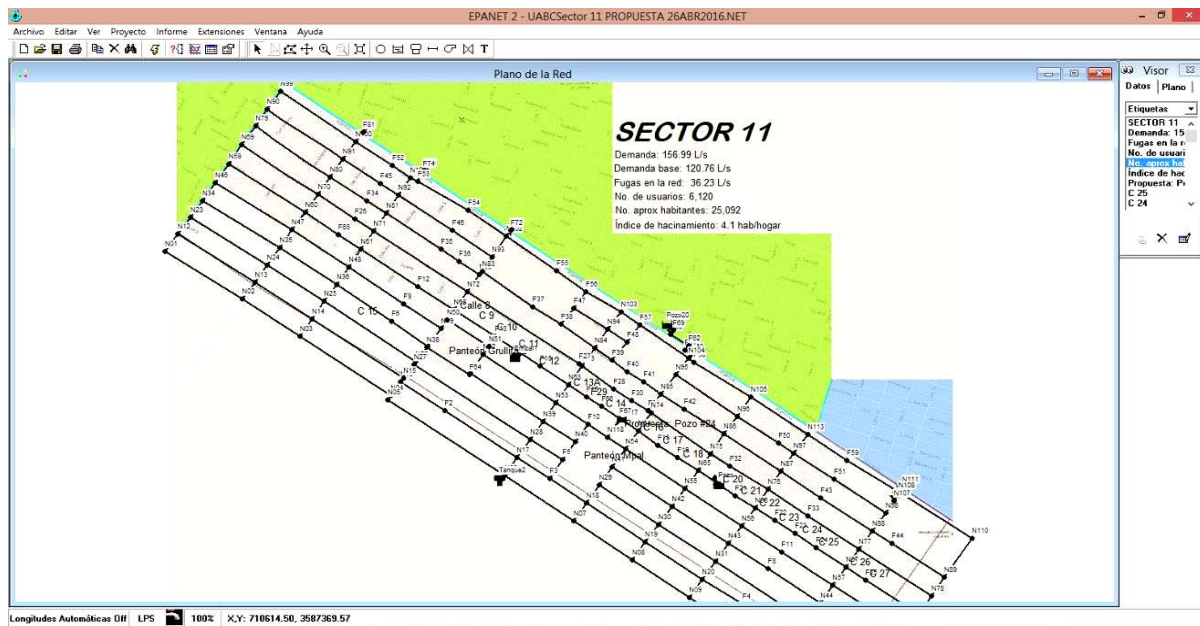


Fig. 3. Esqueletización de la red de distribución de agua potable en EPANET.

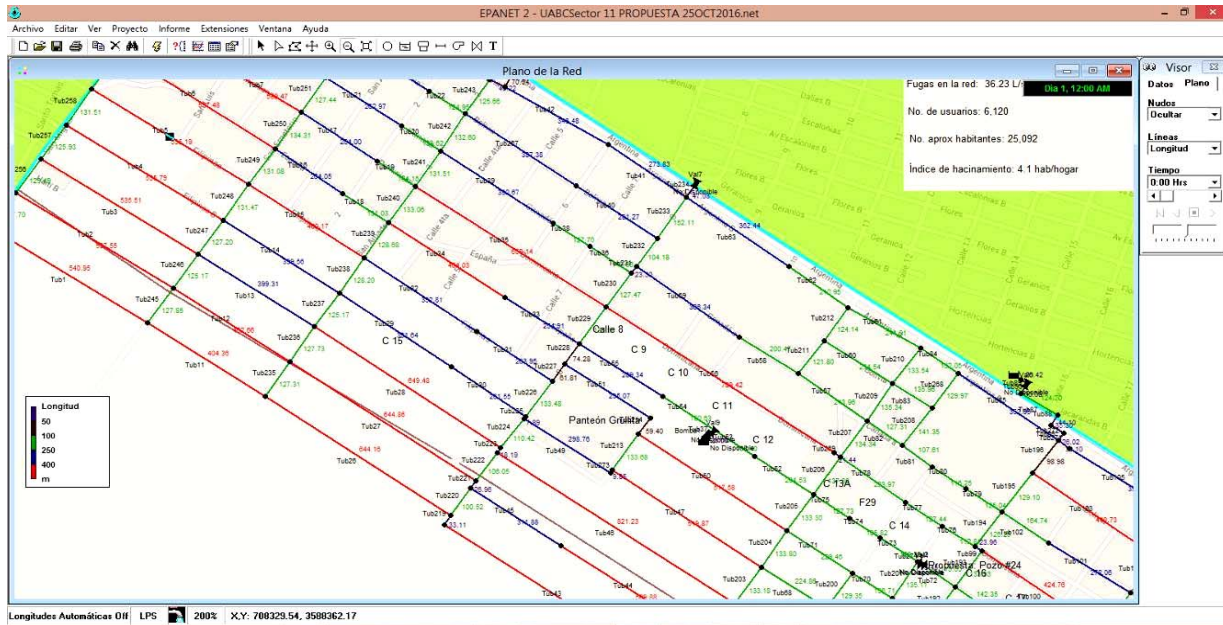


Fig. 4. Asignación de longitudes de tubería e identificación de cada una.

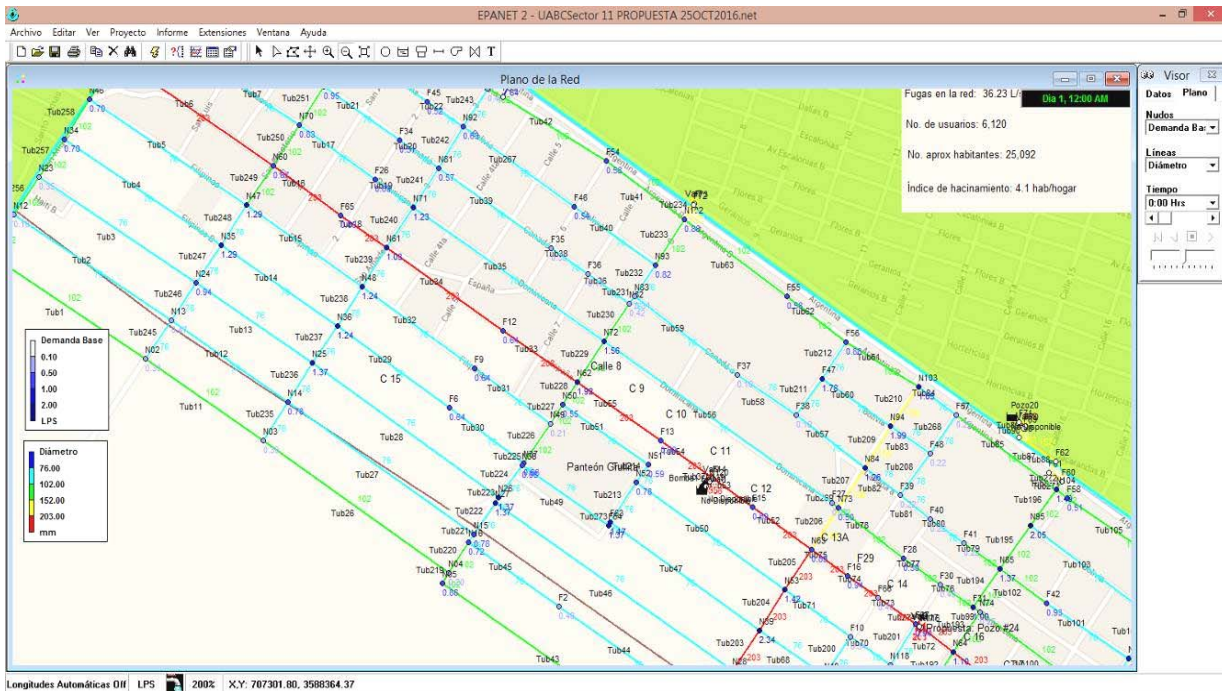


Fig. 5. Asignación de diámetros de tuberías y demanda base de la red de abastecimiento de agua.

- Se asignan las unidades en litros por segundo y se fija la fórmula de pérdidas de carga. Para el caso de estudio es tubería de plástico (PVC) y se utiliza la fórmula de Hazen-Williams con una rugosidad de 145 [24] (ver Tabla II y III).

- Se comprueban que todos los nodos, tuberías, válvulas y bombas estén correctamente conectados.
- Se establecen los parámetros para el diseño en base a las especificaciones técnicas del Organismo Operador: las tuberías deberán transportar el agua a velocidades entre 0.01 y 2 m/s; las pérdidas de carga deben ser menores a 10 m/Km [4] y las presiones en los nodos deben estar entre 15 y 22 mca (21.33 – 31.29 lb/m2) establecido por el Organismo operador. La norma establece 10 y 50 mca [4] y por último
- se ejecuta el análisis.

A pesar de que el proyecto de lotificación de la Oficina de DUE no tiene contempladas áreas verdes, ni escuelas, ni hospitales y mucho menos hidrantes, estas demandas fueron contempladas en los nodos F43, N19, N25, N32 y N39, datos que pudieran tomarse en proyectos futuros.

Tabla II. Cálculo de pérdidas en tuberías (en pies y caudal en cfs).

Fórmula	Coefficiente de Resistencia (A)	Exponente de Caudal (B)
Hazen-Williams	$4.727^{-1.852} d^{-4.971} L$	1.852
Darcy-Weisbach	$0.0252 f(\epsilon, d, q) d^{-5} L$	2
Chezy-Manning	$4.66 n^2 d^{-5.33} L$	2

Notas:

C = coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams

$\epsilon$  = coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach (ft)

f = factor de fricción (depende de  $\epsilon$ , d y q)

n = coeficiente de rugosidad de Manning

d = diámetro de la tubería (ft)

L = longitud de la tubería (ft)

q = caudal (cfs)

Tabla III. Coeficiente de Rugosidad para diferentes materiales.

Material	Hazen-Williams C (adimensional)	Manning's n (adimensional)	Material	Darcy-Weisbach $\epsilon$ (mm)
Hierro Colado	130 – 140	0.012 – 0.015	PVC y PE	0.0025
Hormigón o Revestido de Hormigón	120 – 140	0.012 – 0.017	Fibro cemento	0.025
Hierro galvanizado	120	0.015 – 0.017	Fundición revestida	0.03
Plástico	140 – 150	0.011 – 0.015	Fundición no revestida	0.15
Acero	140 – 150	0.015 – 0.017	Hormigón armado	0.1
Arcilla Vitrificada	110	0.013 – 0.015	Hormigón liso	0.025



### IX. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Para la planificación de la RDAP se hizo una corrida en período estático para analizar las presiones con respecto a la demanda, a los diámetros de las tuberías y sus velocidades con la finalidad de localizar los nodos con presiones negativas. En este análisis se observaron los nodos con caídas de presión y los nodos con presiones muy altas, así como velocidades por debajo de los 0.01 m/s en las tuberías parámetros muy por debajo de los requeridos por el Organismo Operador Municipal.

Una vez equilibrado el sistema para el periodo estático (ver Figura 6 y 7) mediante cambios de diámetros y colocación de válvulas e instalación de 1 tanque elevado, se procede a equilibrar el sistema para el período extendido (24 hrs) en función del factor de corrección horaria [4, 31].

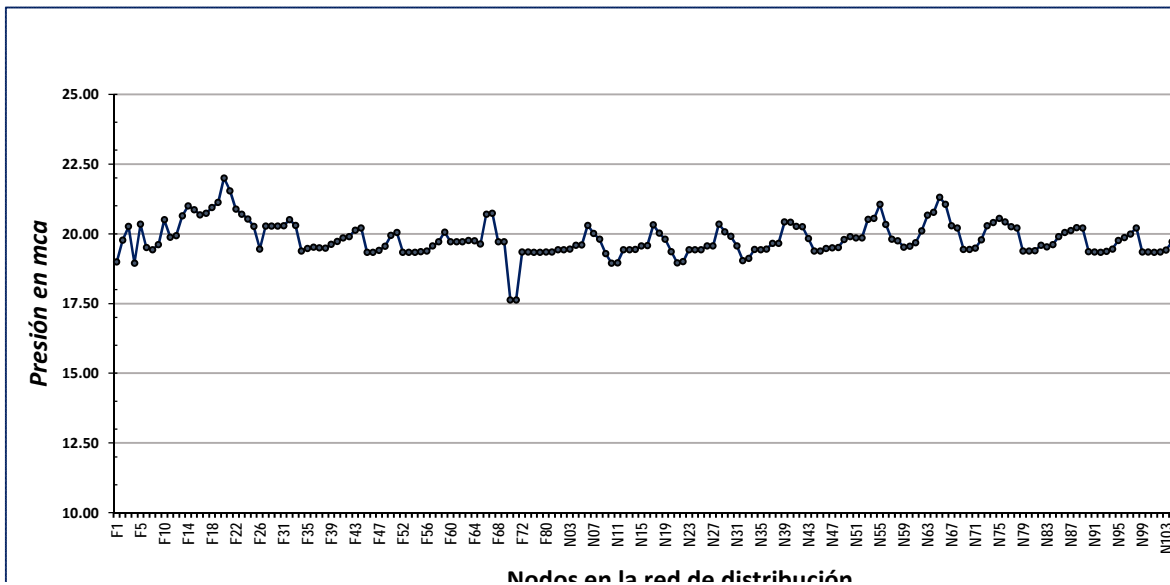


Fig. 6. Presiones calculadas en función de la demanda base en el período estático.

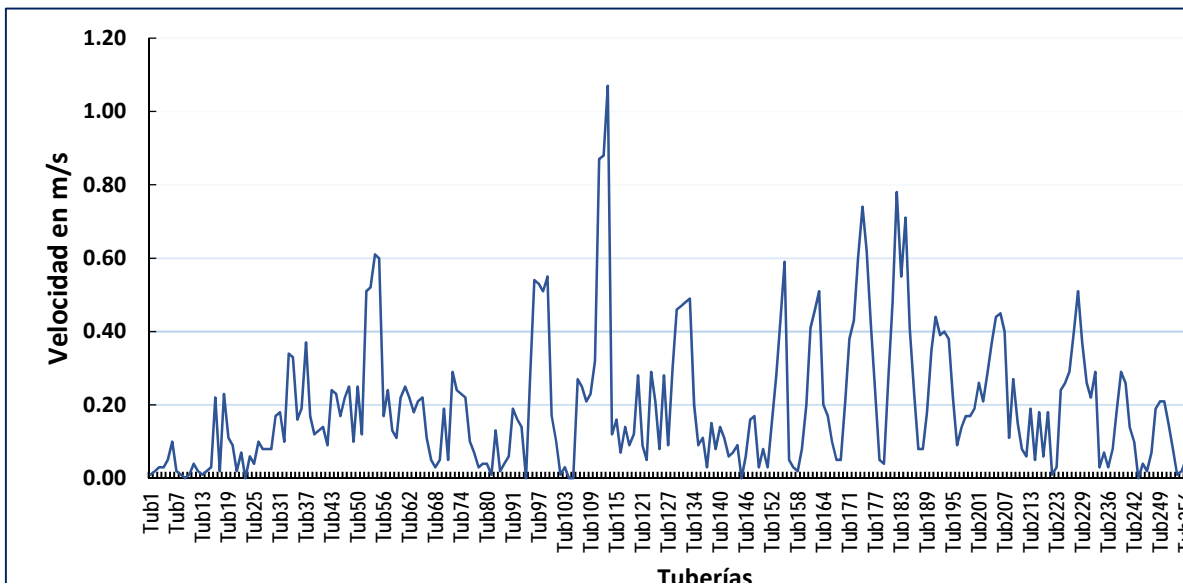


Fig. 7. Velocidad de las tuberías de la red de distribución en el período estático.

Los resultados del análisis se muestran en las Figs. 8, 9 y 10 para las 0:00, 9:00, 15:00 y 20:00 Hrs. (solo se grafican 4 horas del total de 24 horas que son demandas máximas y mínimas).

Como se observa, la Fig. 8 muestra las presiones en todos los nodos las cuales no rebasan los parámetros de 15 a 22 mca. La Fig. 9 muestra las velocidades en rangos de 0.01 a 1.84 m/s en un período de 24 horas, por lo que la velocidad de flujo en la red es aceptable, ya que todas las líneas de conducción están por debajo de los 3 m/s.

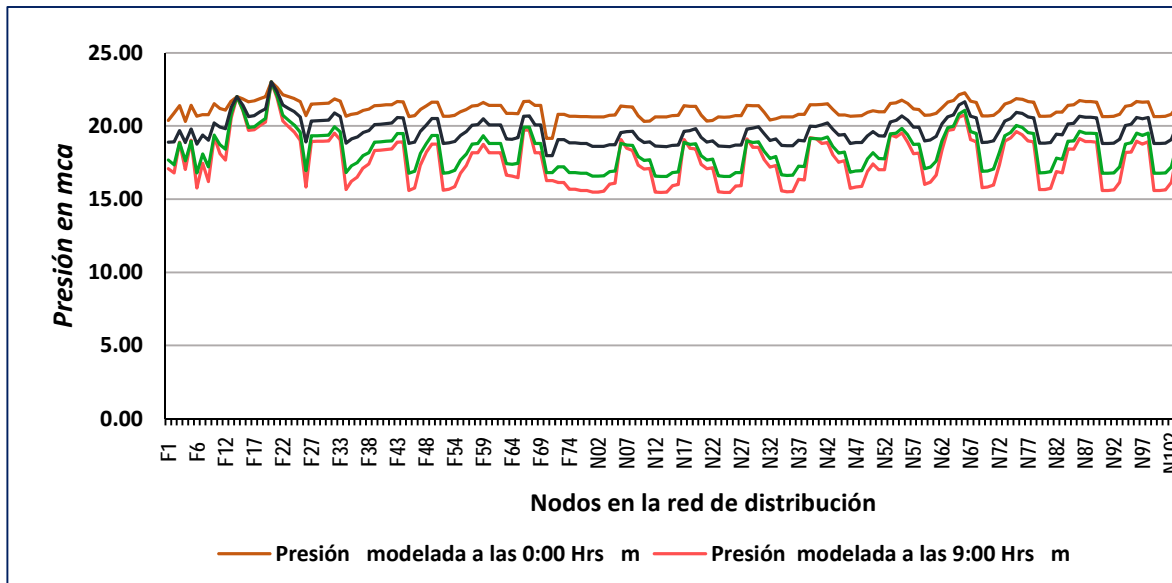


Fig. 8. Presiones en los nodos en base al factor de corrección horaria, período extendido por 24 horas.

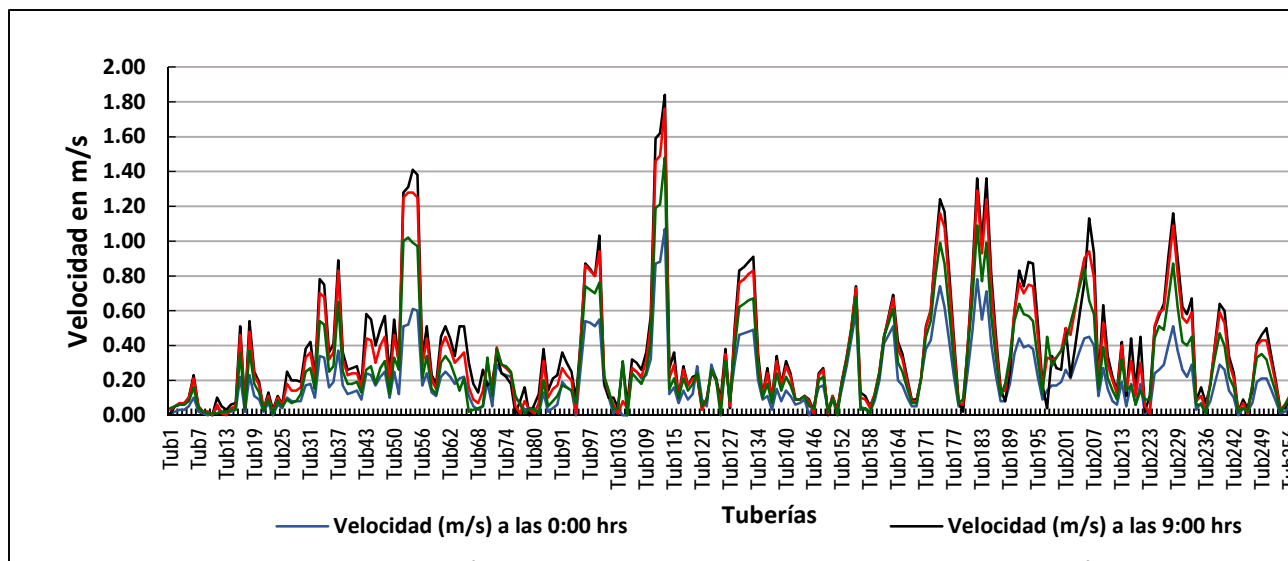


Fig. 9. Velocidades en período extendido seleccionando solo 4 horas del total de 24 horas para su comparación.

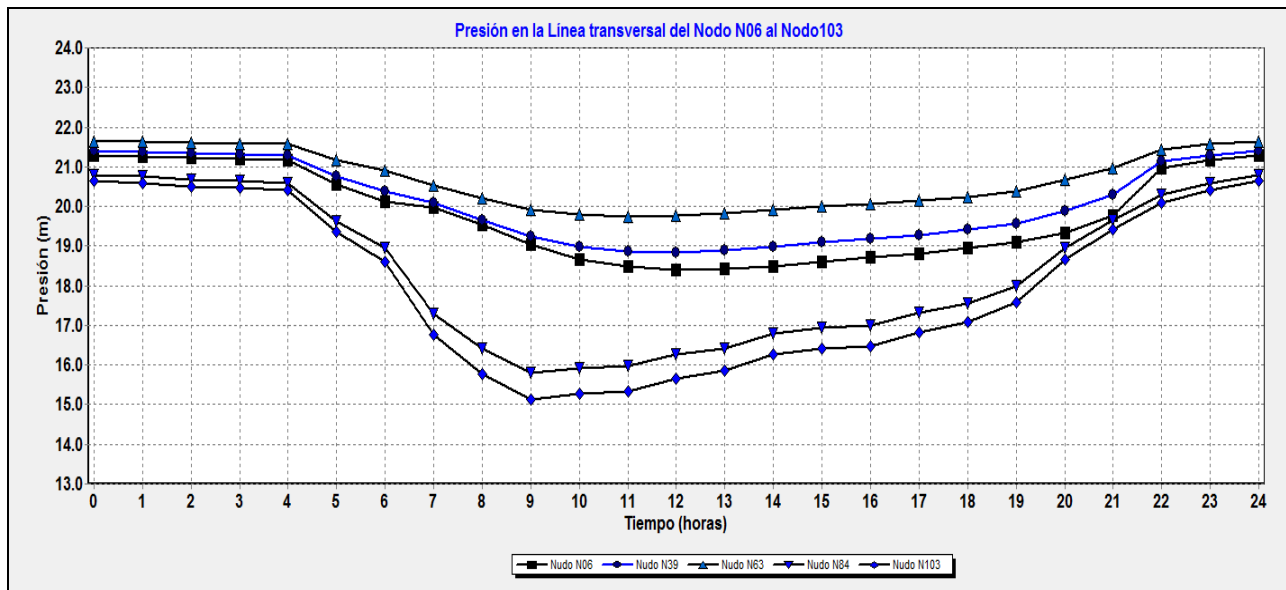


Fig. 10. Presión en los nodos mediante la Curva de evolución temporal (Nudo N06 al N103) corte transversal en calle 13.

### X. CONCLUSIONES

En el análisis de la zona de estudio fueron corregidas todas las áreas con bajas presiones, velocidades y pérdidas de carga. Los parámetros hidráulicos de cada nodo y línea de conducción reciben presiones requeridas en el objetivo.

Se examinaron todas las condiciones actuales para el suministro de agua la red de distribución, tomando en consideración la información del proyecto de lotificación del Ejido la Grullita y la Oficina de DUE recabando la información necesaria, así como los datos de la cartografía de la zona de estudio requeridos para el análisis hidráulico.

El análisis determinó que el suministro de agua a través de dos pozos con bombas de 150 lps cada uno y un tanque elevado, satisfacen la demanda de la zona de estudio. Las presiones en los nodos, el flujo y las velocidades en las tuberías y cruceros son eficientes y pueden abastecer de agua la zona de estudio en base a la demanda calculada por habitante como se muestra en la Fig. 11.

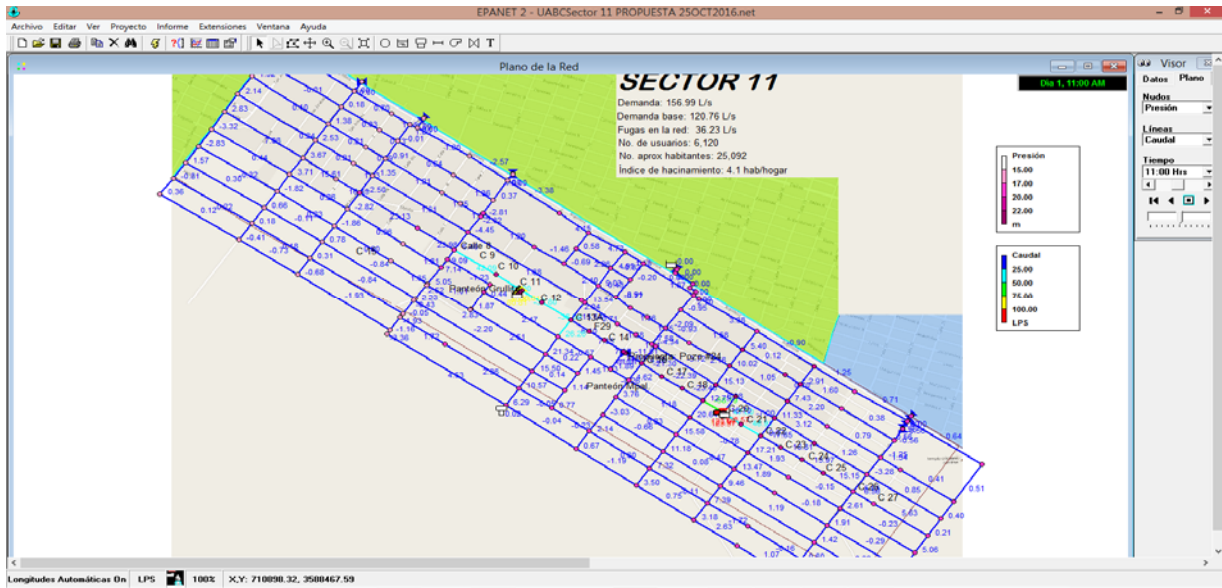


Fig. 11. Resultados en base a la demanda en los nodos de presión y flujo del área de estudio..

### RECONOCIMIENTOS

A la Universidad Estatal de Sonora, al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California y al CONACyT por el apoyo brindado para la realización de este estudio..

### REFERENCIAS

- [1] A. Ostfeld, "Water Distribution Networks," in *Intelligent Monitoring, Control, and Security of Critical Infrastructure Systems*, E. Kyriakides and M. Polycarpou, Eds., ed Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 101-124.
- [2] L. Shie-Yui and M. Atiquzzaman, "Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution," *Journal of The Institution of Engineers, Singapore*, vol. 44, pp. 93-107, 2004.
- [3] N. P. Sonaje and M. G. Joshi, "A review of modeling and application of water distribution networks (WDN) softwares," *International Journal of Technical Research an Applications*, vol. 3, pp. 174-178, September-October 2015 2015.
- [4] CONAGUA, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Redes de distribución*, 2007 ed. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua, 2007.
- [5] R. Schmid, *Working papers on water supply an environmental sanitation: Review of modeling software for piped distribution networks.* . St. Gallen, Switzerland: Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management (SKAT), 2002.
- [6] L. Fragoso Sandoval, J. Roberto Ruiz, Z. Flores, and A. B. Juárez León, "Sistema para control y gestión de redes de agua potable de dos localidades de México," *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 34, pp. 112-126, 2013.
- [7] A. M. Bagirov, A. F. Barton, H. Mala Jetmarova, A. Al Nuaimat, S. T. Ahmed, N. Sultanova, *et al.*, "An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 57, pp. 873-886, 2// 2013.
- [8] N. B. Gorev, I. F. Kodzhespirova, Y. Kovalenko, R. Álvarez, E. Prokhorov, and A. Ramos, "Evolutionary Testing of Hydraulic Simulator Functionality," *Water Resources Management*, vol. 25, pp. 1935-1947, 2011.
- [9] W. O. Kurek, Avi, "Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems," *Journal of Environmental Management*, vol. 115, pp. 189-197, 1/30/ 2013.



- [10] J. Muranho, A. Ferreira, J. Sousa, A. Gomes, and A. S. Marques, "WaterNetGen: an EPANET extension for automatic water distribution network models generation and pipe sizing," *Water Science & Technology: Water Supply*, vol. 12, pp. 117-123, 2012.
- [11] R. v. L. Sitzenfrei, J. Rauch, W., "Design and Optimization of Small Hydropower Systems in Water Distribution Networks Based on 10-Years Simulation with Epanet2," *Procedia Engineering*, vol. 89, pp. 533-539, // 2014.
- [12] F. d. C. Villalba, G., "Algoritmos de Optimización Combinatoria (AOC) aplicados al diseño de redes de distribución de agua potable," *Revista de Ingeniería*, vol. 22, pp. 118-125, 2005.
- [13] E. Todini and S. Pilati, "A gradient algorithm for the analysis of pipe networks," in *Computer applications in water supply: vol. 1---systems analysis and simulation*, ed: Research Studies Press Ltd., 1988, pp. 1-20.
- [14] D. R. Broad, G. C. Dandy, and H. R. Maier, "Water Distribution System Optimization Using Metamodels," *Journal of Water Resources Planning & Management*, vol. 131, pp. 172-180, 2005.
- [15] D. R. Broad, H. R. Maier, and G. C. Dandy, "Optimal Operation of Complex Water Distribution Systems Using Metamodels," *Journal of Water Resources Planning & Management*, vol. 136, pp. 433-443, 2010.
- [16] P. Bieupoude, Y. Azoumah, and P. Neveu, "Optimization of drinking water distribution networks: Computer-based methods and structural design," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 36, pp. 434-444, 9// 2012.
- [17] R. Baños, C. Gil, J. Reza, and F. G. Montoya, "A memetic algorithm applied to the design of water distribution networks," *Applied Soft Computing*, vol. 10, pp. 261-266, 1// 2010.
- [18] K. M. Aghdam, I. Mirzaee, N. Pourmahmood, and M. P. Aghababa, "Design of water distribution networks using accelerated momentum particle swarm optimisation technique," *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 26, pp. 459-475, 2014.
- [19] L. Toxky, G., "La Sectorización En La Optimización Hidráulica De Redes De Distribución De Agua Potable," 2012.
- [20] B. Cabrera, José Antonio and V. G. Tzatchkov, " Modelación de redes de distribución de agua con suministro intermitente," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, pp. 5-25, Abril-Junio, 2012 2012.
- [21] A. Marchi, G. Dandy, A. Wilkins, and H. Rohrlach, "Methodology for Comparing Evolutionary Algorithms for Optimization of Water Distribution Systems," *Journal of Water Resources Planning & Management*, vol. 140, pp. 22-31, 2014.
- [22] M. A. H. A. Sayyed, R. Gupta, and T. T. Tanyimboh, "Modelling Pressure Deficient Water Distribution Networks in EPANET," *Procedia Engineering*, vol. 89, pp. 626-631, // 2014.
- [23] G. Anisha, A. Kumar, J. A. Kumar, and P. S. Raju, "Analysis and Design of Water Distribution Network Using EPANET for Chirala Municipality in Prakasam District of Andhra Pradesh," *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 3, p. 8, April 2016 2016.
- [24] L. A. Rossman, *EPANET: User's manual (EPANET 2 Manual del Usuario)*. Cincinnati, OH, USA: Environmental Protection Agency, Cincinnati, USA, 2000.
- [25] INEGI. Censos Generales y Conteos. Serie histórica censal e intercensal. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [Online]. Available: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/> ; [www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/default.aspx](http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/default.aspx) acceso 28 Julio 2016.
- [26] IMTA-Sept, "Informe Final: Programa de Mejoramiento de la Eficiencia de Distribución del Agua y de Detección de Fugas en el Sistema de Agua Potable de la Ciudad de San Luis Río Colorado, Sonora. Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Sept 2007," Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, San Luis Río Colorado 10 Mayo 2007., 2007 2007.
- [27] IMTA-Junio, "Informe Final: Evaluación del programa de sectorización en la ciudad de San Luis Río Colorado, Sonora. Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Junio 2007," Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, San Luis Río Colorado, Sonora Junio 2007 2007.
- [28] IMTA-Sept, "Informe Final: Medición y análisis de la demanda de agua potable en la ciudad de San Luis Río Colorado, Sonora. Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Sept 2005," Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, San Luis Río Colorado, Sonora Contrato No. 71413604, Septiembre 2005 2005.
- [29] CONAGUA, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de agua potable*, 2007 ed. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua, 2007.
- [30] R. López Corzo, "Análisis hidráulico-económico de bombas de velocidad variable aplicadas a sistemas de distribución de agua potable," Maestro en Ingeniería Hidráulica, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México - Campus Morelos, Jiutepec, Morelos, México., 2010.
- [31] CONAGUA, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Datos Básicos*, 2007 ed. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua, 2007.