

IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS BASADOS EN LA TEORÍA DE GRAFOS EN PROYECTOS DE SECTORIZACIÓN DE REDES DE AGUA POTABLE

• Velitchko G. Tzatchkov • Víctor Hugo Alcocer-Yamanaka •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

Los proyectos de sectorización de redes de agua potable, en proceso en diferentes ciudades mexicanas actualmente, consisten en dividir la red de la ciudad en varias subredes o sectores más pequeños con una o máximo dos entradas de agua por sector. Para diseñar los sectores se emplean modelos de redes de agua potable que revisan si la sectorización propuesta puede funcionar hidráulicamente de manera adecuada. Para los proyectos de sectorización en redes grandes se requieren, sin embargo, facilidades algorítmicas adicionales, como análisis de conectividad, zona de influencia y contribución de cada fuente sobre el consumo. En el presente artículo se discuten eficientes algoritmos de este tipo basados en la teoría de los grafos, implementados en un sistema de cómputo.

Palabras clave: sectorización de redes, modelos de redes de distribución, sistemas de abastecimiento de agua, algoritmos sobre grafos.

Introducción

En muchas ciudades mexicanas se tienen ahora redes de agua potable grandes abastecidas por varias fuentes interconectadas entre sí por medio de la propia red. En estas condiciones es difícil controlar el agua entregada y consumida, condición indispensable para un diagnóstico y reducción de las pérdidas de agua. Por lo anterior, en las últimas dos décadas en México, la solución a este tipo de situaciones ha sido la de *sectorizar* la red en cierto número de subredes separadas, con pocas o, en el mejor de los casos, con una sola alimentación por sector, para poder medir el caudal que ingresa a cada una de éstas y tener el área de influencia bien definida. Físicamente, la sectorización se realiza cerrando válvulas, mediante cortes en ciertos tramos o con la construcción de tuberías nuevas que permitan una mejor redistribución del flujo en la red. Para analizar las posibles alternativas de sectorización se requiere de la implementación de un modelo computacional que represente la

situación actual de la red simulada (para fines de diagnóstico) y los posibles efectos de una sectorización u otras soluciones hidráulicas. En principio, los modelos hidráulicos de redes de agua potable conocidos, como por ejemplo *Epanet*, *SARA*, *WaterCAD*, y otros (Doe y Duncan, 2003) pueden ser usados para llevar a cabo ese análisis. Con la ayuda de alguno de estos modelos se obtiene la distribución de gastos y presiones en las redes para cada una de las variantes de sectorización propuestas, y se revisa si se cumple con las presiones máximas y mínimas recomendadas en la normativa de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) (Tzatchkov, 2007) en cada sector independiente para las diferentes demandas de agua en la red. Pero antes de proceder con un análisis de este tipo, o paralelamente con él, en redes grandes, por ejemplo de miles de nodos, hay que revisar, en cuanto a la conectividad entre las tuberías y fuentes se refiere, si los datos de la red capturados no tienen errores y si las variantes de sectorización por analizar son

viabiles topológicamente. En redes pequeñas, tal revisión topológica puede llevarse a cabo visualmente sobre un plano de la red, pero en proyectos de sectorización en redes grandes resultan indispensables las siguientes facilidades adicionales, que no se contienen en los modelos existentes arriba mencionados:

1. Obtener cuántas redes independientes (sectores) se tienen capturadas. Se entiende bajo red independiente una red que tiene su(s) propia(s) fuente(s) y no tiene conexión hidráulica con otra red.
2. Obtener los nodos en cada sector y su demanda.
3. Revisar si con las acciones propuestas de sectorización, como cierre de válvulas y corte de tuberías, no se deja alguna parte

de la red sin punto de suministro.

4. En redes con más de una fuente de suministro, definir el área de influencia de cada fuente y la contribución de cada fuente sobre el consumo en cada nodo.

Las facilidades 1 y 3 resultan cruciales para detectar errores en los datos de la red y errores en las acciones propuestas. En la figura 1 se muestra una red en proyecto de sectorización: la red de distribución de la ciudad de San Luis Río Colorado (180 000 habitantes), en el estado de Sonora, México, digitalizada en el Sistema de Cómputo de Análisis y Diseño (SCADRED), que se describe más adelante en este artículo. Están tomadas en cuenta todas las tuberías de la red (de 3" para arriba). La red tiene 1 954 nodos y 2 706 tramos, está abastecida por 17

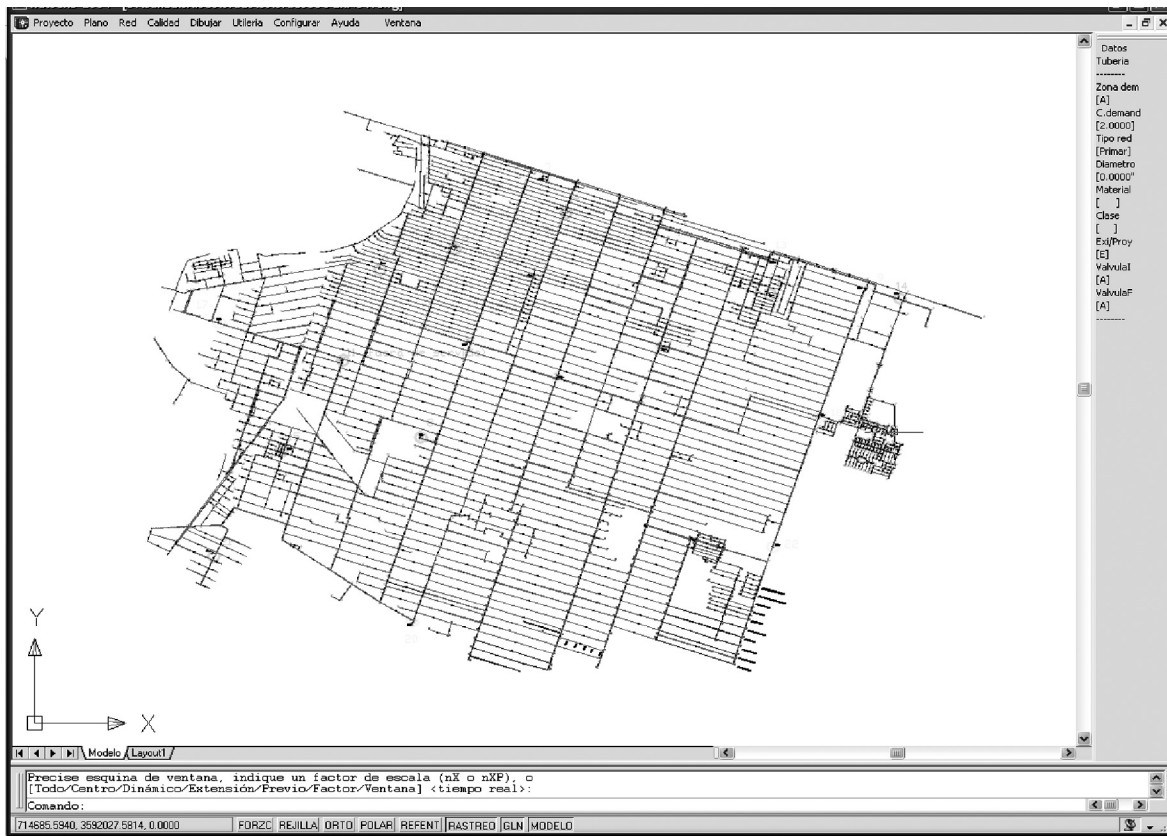


Figura 1. Red de distribución completa de San Luis Río Colorado, estado de Sonora, México, digitalizada en SCADRED (1 954 nodos y 2 706 tramos).

fuentes (pozos), y dividida en diez sectores por medio de cierre de válvulas y cortes de tubería puntuales. Resulta prácticamente imposible revisar errores en la sectorización propuesta, a no ser por medio de un algoritmo especial.

La facilidad 2 es esencial para realizar balances del agua en el sector y la facilidad 4 es importante para definir la sectorización.

En este artículo se presentan algoritmos eficientes para esas cuatro facilidades, implementados en el SCADRED.

En todo caso, el proceso que se sigue es primeramente aplicar un criterio hidráulico con base en el rango de presiones adecuadas, que luego se combina con las facilidades 1, 2 y 3, para revisar el conjunto de redes independientes con una o más fuentes de suministro de agua. Por ejemplo, en terrenos de topografías accidentadas, el sector o red independiente puede quedar definido por la presión máxima permitida que se presenta para el caso de la mínima demanda de agua en la red. Si después de aplicar la facilidad 3 resultan algunas subredes independientes sin punto de suministro, éstas deberán incorporarse a alguna de las otras redes o proponer su propio punto de suministro, según convenga, o en su caso asegurarse si no hubo errores en los datos de la red. La figura 2 muestra un diagrama de flujo del proceso. Las facilidades algorítmicas 1 y 2 se utilizan en el bloque 4 de este diagrama, la facilidad 3 en el bloque 5, y la facilidad 4 en el bloque 8.

La aplicación de la facilidad 4 permite también graficar en la computadora, usando colores, el área de influencia de cada fuente.

Trabajos previos

En parte, una solución de las necesidades planteadas en la Introducción de este artículo puede ser dada por el análisis de calidad del agua con flujo permanente que contienen algunos programas comerciales. Como un ejemplo, para obtener la zona de influencia de una fuente dada, bastaría con asignar una concentración ficticia de cien unidades a esa

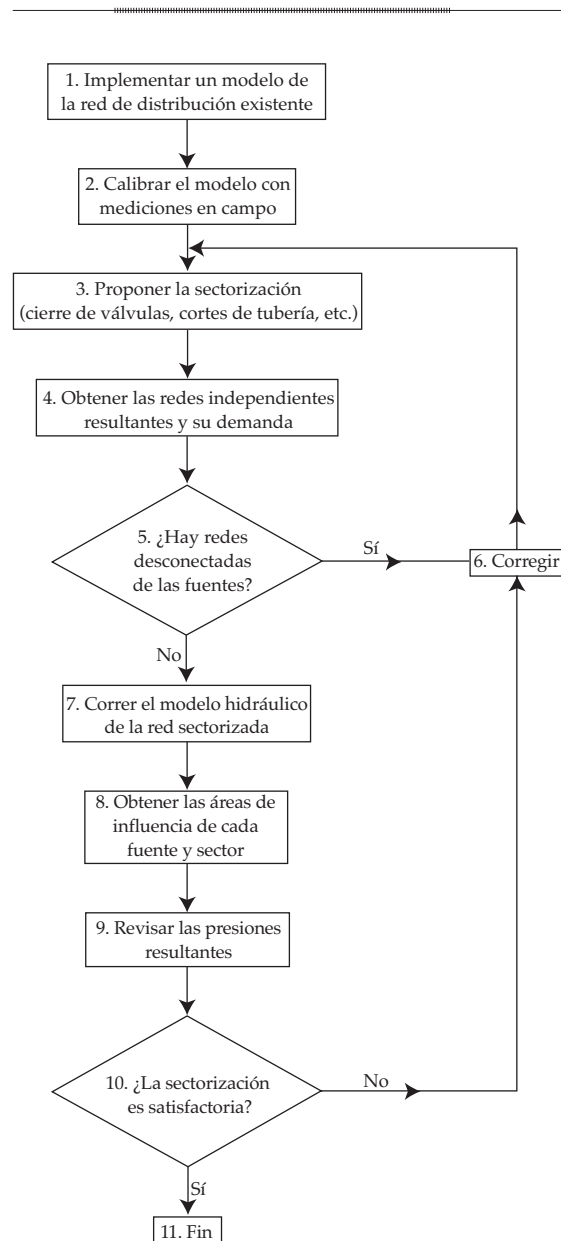


Figura 2. Diagrama de flujo del diseño de una sectorización con la ayuda de los algoritmos propuestos.

fuente y una concentración igual a cero en las restantes, y correr un modelo de calidad del agua para la red con sustancia conservativa (no reactante). El conjunto de nodos para los cuales se obtendría una concentración diferente de cero en el resultado de ese análisis daría directamente la zona de influencia

de la fuente. Repitiendo este proceso para cada fuente se puede obtener el porcentaje de contribución (influencia) de cada fuente sobre los nodos. Tzatchkov y Arreguín-Cortés (1996) presentaron algoritmos de este tipo, que también obtienen el tiempo de residencia del agua en la red y la concentración para sustancias no conservativas (reactantes). El proceso de cálculo que utilizan esos primeros algoritmos para ubicar los nodos vecinos de cada nodo es iterativo, por lo que funcionan bien para redes pequeñas, pero se vuelven muy lentos en redes grandes. Por esta razón se desarrollaron los algoritmos que se describen a continuación, con el uso de una memoria temporal llamada *pila* (*stack* en inglés), que son muy rápidos, también en redes grandes.

El Sistema de Cómputo de Análisis y Diseño de Redes (SCADRED)

Es un sistema para el análisis y diseño de redes de agua potable, que corre dentro de *AutoCAD*, y tiene las siguientes facilidades:

1. Análisis de flujo permanente en la red. Se utiliza el método de Todini y Pilati (1987).
2. Análisis de flujo no permanente en la red por medio de cambio consecutivo de estados de flujo permanente (el así llamado análisis de periodos extendidos).
3. Consideración en el análisis de la red de fugas y consumo como función de la presión.
4. Selección (diseño) de los diámetros de los tramos nuevos de la red basado en un procedimiento de enumeración restringida.
5. Visualización de los resultados de los análisis hidráulicos por medio de curvas de nivel, superficie 3D, y coloreado.
6. Diseño automático de piezas especiales en los cruceros para materiales hierro fundido con bridas, PVC y polietileno.
7. Cuantificación de cantidades de obra y piezas, y cálculo del presupuesto de la obra.

En Tzatchkov e Izurieta-Dávila (1996) se describe una de las primeras versiones del SCADRED. La figura 3 muestra cruceros armados de manera automática con el SCADRED, con el cuadro de cuantificación de piezas correspondiente.

Implementación algorítmica de una pila

Las pilas son estructuras básicas, que se utilizan en muchos algoritmos computacionales. Una pila es una estructura dinámica de almacenamiento temporal de datos. Su objetivo es almacenar temporalmente cierto número de elementos, con la posibilidad de añadir nuevos y extraer elementos almacenados, uno por uno. Un nuevo elemento puede ser añadido solamente al final de la pila y extraído también del final. De esta manera, el último elemento que ingresó en la pila es el primero en salir (esquema LIFO, *Last In, First Out*, en inglés).

Las pilas son fáciles de implementar en un programa de cómputo. Bastaría con declarar un arreglo de elementos, y un puntero (una variable de tipo entero) o *índice* que contenga la posición del último elemento almacenado. Para agregar un nuevo elemento a la pila se incrementa el valor del índice y se almacena el nuevo elemento en la posición resultante (al final de la pila). Para extraer un elemento de la pila, se toma el elemento al cual apunta el índice y se decrementa el valor del índice.

Algoritmo para obtener las subredes separadas

Para este análisis no se ocupa el sentido del flujo en las tuberías, por lo que éste se puede realizar antes del análisis hidráulico de gastos y presiones. En la terminología de la teoría de los grafos, en este caso la red se maneja como un *grafo no dirigido*, que es conveniente representar con una lista en que para cada nodo se indican sus nodos vecinos. La determinación de las subredes se realiza de la manera siguiente:

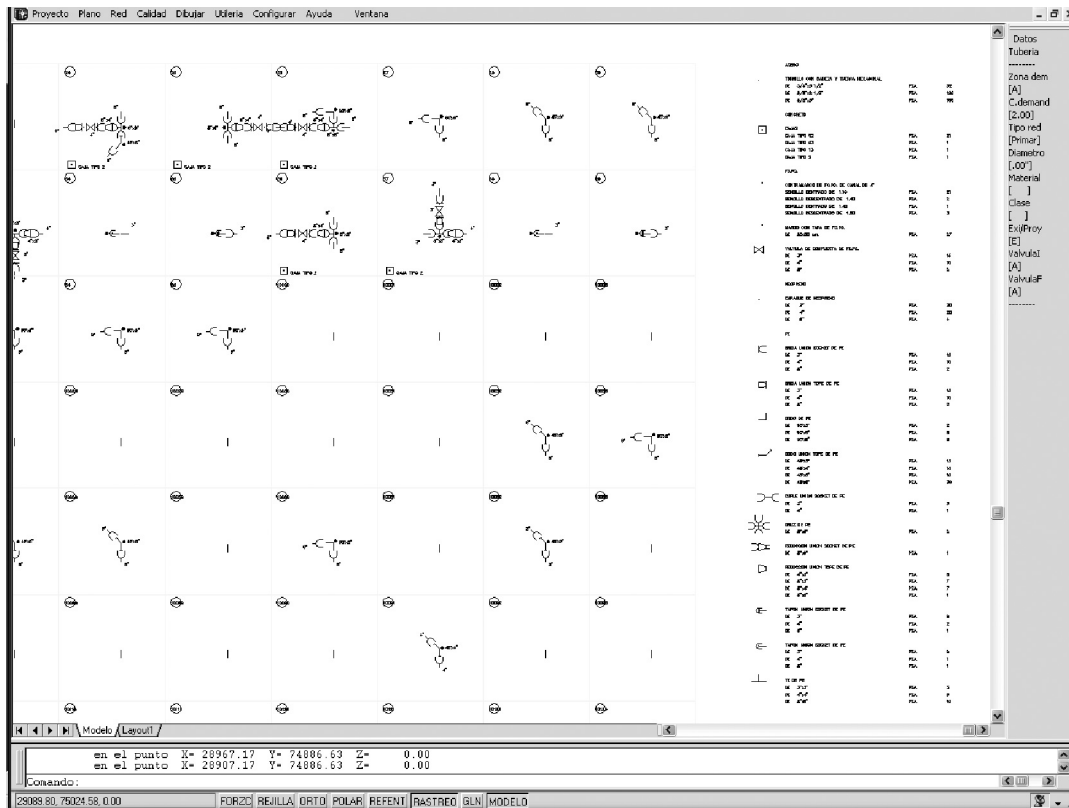


Figura 3. Diseño de piezas especiales en cruceros y cuadro de cuantificación correspondiente, obtenidos automáticamente por el SCADRED.

1. Se declara un arreglo de tipo Booleano con dimensión igual a la cantidad de nodos en red. Este arreglo se usa para marcar los nodos visitados, por lo que puede nombrarse *Visitados()*.
2. A todos los elementos de *Visitados()* se les asigna valor "Falso" (es decir, al inicio ningún nodo se encuentra visitado).
3. Se revisa el estado de los nodos (visitado o no) uno por uno. Si el nodo i no está visitado, se ejecuta la rutina $BP(i)$ descrita al final de este algoritmo. Si el nodo ya está visitado, se pasa a revisar el siguiente nodo.
4. En el resultado de la ejecución de la rutina $BP(i)$, algunos nodos que no estaban visitados pasan a ser visitados. El conjunto de esos nodos forma una subred separada con raíz en el nodo i .

Rutina $BP(i)$, donde i indica el *nodo raíz* de la subred:

1. Se revisan los vecinos no visitados de i . Al detectar un vecino no visitado, éste se almacena en una pila y se declara visitado.
2. Se toma como nodo i el último nodo almacenado en la pila y se repite el punto 1 de la rutina.
3. El proceso termina cuando se vacía la pila.

La rutina $BP(i)$ realiza lo que en la teoría de los grafos se conoce como una *Búsqueda en Profundidad* (de ahí el nombre BP), conocido en inglés como *depth first search*, por la razón de que el proceso avanza en profundidad (alejándose del nodo raíz). En la teoría de los grafos se muestra que en este algoritmo cada

nodo se visita sólo una vez, por lo que es bastante rápido.

Algoritmo para revisar nodos desconectados

Para este análisis tampoco se ocupa el sentido del flujo en las tuberías, por lo que éste se puede realizar antes del análisis hidráulico de gastos y presiones. En la terminología de la teoría de los grafos, en este caso la red se maneja como un *grafo no dirigido*, que para los fines del algoritmo que aquí se describe es conveniente representar con una lista en que para cada nodo se indican sus nodos vecinos. La determinación de las subredes se realiza de la manera siguiente:

1. Se declara un arreglo de tipo Booleano con dimensión igual a la cantidad de nodos en red. Este arreglo se usa para marcar los nodos visitados, por lo que puede nombrarse *Visitados()*.
2. A todos los elementos de *Visitados()* se les asigna valor "Falso" (es decir, al principio ningún nodo se encuentra visitado).
3. Cada nodo en la red que puede servir como una fuente de abastecimiento (como un tanque o una bomba) se declara como visitado (es decir, se asigna valor "Verdadero" a cada elemento del arreglo *Visitados()* que corresponde a un tanque o bomba).
4. Se revisa el estado de los nodos (visitado o no) uno por uno. Si el nodo i está visitado, se ejecuta la rutina $BA(i)$ descrita al final de este algoritmo. Si el nodo ya está visitado, se pasa a revisar el siguiente nodo.
5. Los nodos que quedan no visitados después de concluir el punto 4 no están conectados a ninguna fuente (no les puede llegar el agua).

Rutina $BA(i)$, donde i indica el *nodo raíz* de la subred:

1. El nodo i se coloca en una pila.

2. Se toma el último nodo almacenado en la pila y se revisan sus nodos vecinos. Cada nodo vecino no visitado se coloca en la pila y se declara como visitado.
3. El proceso termina cuando se vacía la pila.

La rutina $BA(i)$ realiza lo que en la teoría de los grafos se conoce como una *Búsqueda en Amplitud* (de ahí el nombre BA), conocido en inglés como *breadth first search*, por la razón de que en el proceso primero se recorren todos los nodos vecinos del nodo en cuestión, antes de pasar a otro nodo no visitado. En la teoría de los grafos se muestra que en este algoritmo también cada nodo se visita sólo una vez, por lo que es bastante rápido.

Algoritmo para determinar la contribución de las fuentes al consumo en los nodos

En este análisis se ocupa el sentido del flujo en las tuberías, por lo que éste se puede realizar apenas después de correr el análisis hidráulico de gastos y presiones. En la terminología de la teoría de los grafos, en este caso la red se maneja como un *grafo dirigido*, que para los fines del algoritmo que aquí se describe es conveniente representar por dos listas. En la primera lista se indica, para cada nodo, cuáles son los nodos que introducen agua al nodo. En la segunda lista se indica, para cada nodo, cuáles son los nodos que reciben agua del nodo.

El algoritmo para determinar la contribución de una fuente al consumo en los nodos de la red se desprende del algoritmo de cálculo de la concentración de una sustancia química conservativa en los nodos de la red, dada su concentración en las fuentes de abastecimiento. Por esta razón se explica primero ese algoritmo. Los conceptos básicos se ilustran en la figura 4.

Los dos números en los subíndices en la figura 4 tienen el significado siguiente: cuando los dos subíndices son iguales, por ejemplo C_{33} , se refiere a la concentración en un nodo (el nodo 3, en este caso). Cuando los

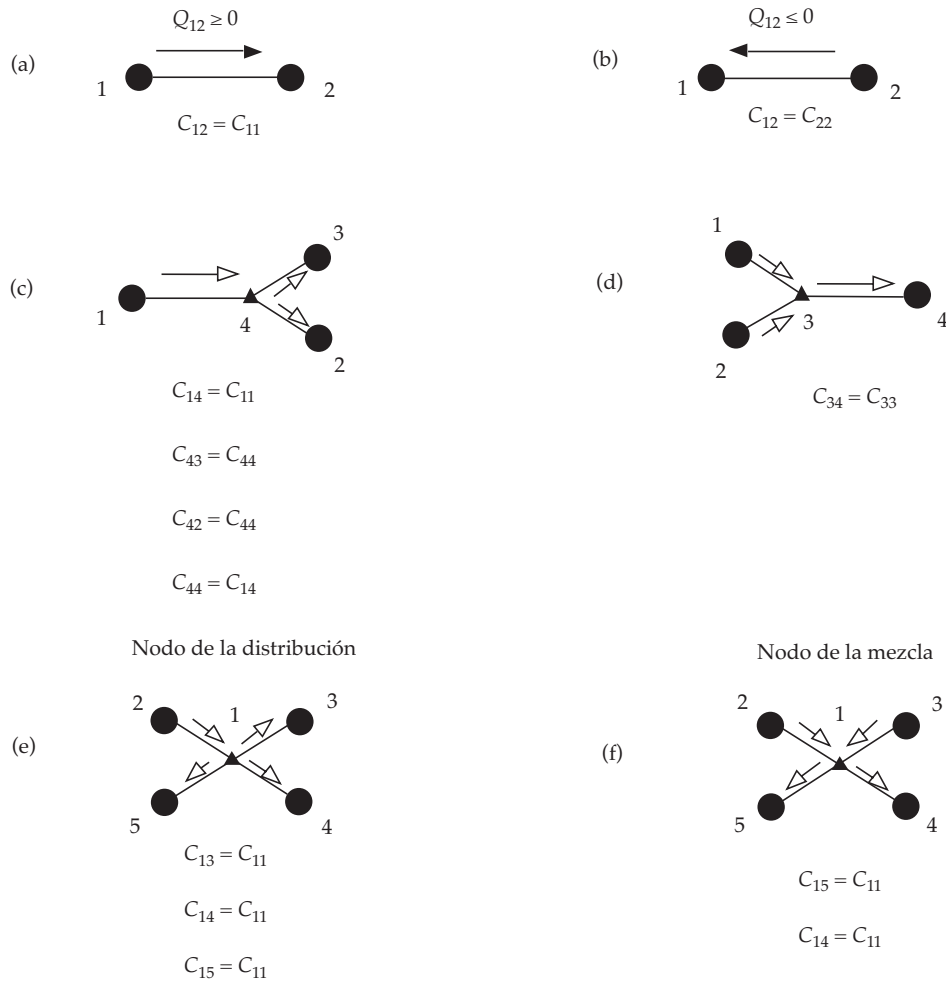


Figura 4. Conceptos en el cálculo de la concentración de una sustancia conservativa en nodos de distribución y de mezcla en una red.

dos subíndices son diferentes, por ejemplo C_{13} , se refieren a la concentración en el tramo definido por los dos nodos cuyos números representan los dos subíndices (nodos 1 y 3, y el tramo entre los nodos 1 y 3, en este caso). En un estado permanente, una sustancia conservativa no cambia su concentración a lo largo de una tubería, por lo que, como se muestra en la figura 4, $C_{12} = C_{11}$ en la figura 4a y $C_{12} = C_{22}$ en la figura 4b. En un nodo de distribución, como en la figura 4c, los flujos que salen del nodo llevan la concentración que se tiene en el nodo. En un nodo de mezcla, como el nodo en la figura 4d, el

agua se mezcla en el nodo, obteniéndose una nueva concentración, que llevarán los flujos que salen del nodo. Asumiendo una mezcla completa en el nodo, la concentración en los flujos salientes se calcula como:

$$C_{ii} = \frac{\sum_{j \in N_{in}} Q_j C_{ji}}{\sum_{j \in N_{in}} Q_j} \quad (1)$$

donde N_{in} indica el conjunto de nodos que introducen agua al nodo i . Los conceptos representados en las figuras 4a, 4b, 4c y 4d se extienden fácilmente a nodos en los cuales se

unen más de tres tuberías, como se muestra, por ejemplo, en las figuras 4e y 4f.

Con esta base, la concentración de una sustancia conservativa en los nodos de una red, dada su concentración en las fuentes, se calcula por el algoritmo siguiente:

1. A los nodos que representan las fuentes se les asigna la concentración dada correspondiente.
2. Se revisa el estado (con concentración asignada o no) de los nodos uno por uno. Si el nodo i tiene concentración asignada se pasa al punto 2.1 de este algoritmo.
 - 2.1. El nodo i se coloca en una pila (será el primer nodo en la pila).
 - 2.2. Se extrae el último nodo almacenado en la pila. Sea éste el nodo j .
 - 2.3. Se revisa el estado de los nodos vecinos que reciben agua del nodo j uno por uno. Sea un nodo vecino de ese tipo k .
 - 2.4. Si el nodo k no tiene concentración asignada, la concentración del nodo j se asigna al tramo jk y luego se revisa si tienen concentración asignada todos los tramos que introducen agua al nodo k . Si este es el caso, se calcula la concentración en el nodo k por la ecuación (1), y el nodo k se agrega a la pila.
 - 2.5. Se ejecuta nuevamente el punto 2.2 hasta que la pila quede vacía.
3. Al concluir el ciclo del punto 2 arriba queda definida la concentración en todos los nodos de la red.

Ahora bien, como se mencionó anteriormente, para obtener la zona de influencia de una fuente se asigna una concentración ficticia de cien unidades a esa fuente y una concentración igual a cero en las restantes fuentes, y se ejecuta el algoritmo así descrito. Se obtiene un valor de la supuesta concentración para cada nodo, que viene siendo el porcentaje de contribución de la fuente al consumo en el nodo. El SCADRED muestra ese resultado en dos formas: en forma de un cuadro en un archivo de texto

(figura 5) y en forma gráfica en un diagrama tipo “pastel” (*pie chart* en inglés) con diferente color (tonos de gris) para cada fuente y letreros con el número de la fuente (figura 6). En la figura 7 se muestra una vista del resultado de contribución de las fuentes, obtenido en el SCADRED para una red completa, permitiendo identificar enseguida las zonas de influencia de las fuentes, y visualizando con esto la eventual sectorización.

Aplicación del algoritmo en una red en servicio. Caso San Luis Río Colorado

La ciudad de San Luis Río Colorado se encuentra en el estado de Sonora, en la frontera entre los Estados Unidos de América y México, prácticamente en un punto común de cuatro estados: Sonora y Baja California, en México, y California y Arizona, en los Estados Unidos de América (figura 8). Su clima en promedio se considera templado, con escasas lluvias en verano. Tiene una precipitación pluvial anual de 15.00 milímetros y temperaturas que oscilan de -2.0 a 50.0 °C. En la región predomina el suelo de tipo arenoso, propio de las zonas desérticas. La carretera federal número 2 cruza por el centro comercial de San Luis Río Colorado y por ella se llega a las principales ciudades del sur del estado, así como a Mexicali, Tijuana y Tecate. La situación geográfica de esta ciudad la ha colocado como una importante frontera para el transporte de mercancías hacia grandes centros urbanos tales como San Diego y Los Ángeles, en California, y Yuma, Phoenix y Nogales, en Arizona.

De acuerdo con el Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la ciudad (OOMAPAS) se tienen los siguientes indicadores de agua potable promedio anual:

Cobertura de agua potable:	96%
Producción:	2 734 070 m ³ /mes
Dotación promedio:	459.26 l/hab/día
Número de tomas:	48 400

Nodo	Fuentes	6010	6011	6002	6200	6000	1593	6003	6014
1	1619	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	94.01	0.00	5.99	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	61.59	0.00	38.41	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	70.57	0.00	29.63	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00	90.82	0.00	9.88	0.00	0.00
17	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.51	6.88	90.76	0.00	1.85	0.00	0.00
23	0.00	0.00	1.38	19.75	77.30	0.00	1.58	0.00	0.00
24	0.00	0.00	2.51	24.55	71.48	0.00	1.46	0.00	0.00
25	0.00	0.00	12.08	25.42	61.25	0.00	1.25	0.00	0.00
26	0.00	0.00	19.70	25.06	54.13	0.00	1.11	0.00	0.00
27	0.00	0.00	26.42	22.96	49.90	0.00	1.01	0.00	0.00
28	0.00	0.00	32.72	21.00	45.36	0.00	0.93	0.00	0.00
29	0.00	0.00	79.84	6.29	13.59	0.00	0.28	0.00	0.00
30	0.00	0.00	79.85	7.23	13.48	0.00	0.28	0.00	0.00
31	0.00	0.00	79.85	7.23	13.48	0.00	0.28	0.00	0.00
32	0.00	0.00	77.60	8.44	13.29	0.01	0.27	0.29	0.10
33	0.00	0.00	75.48	10.47	12.97	0.02	0.26	0.19	0.21
34	0.00	0.00	75.15	12.62	12.01	0.03	0.26	0.09	0.35
35	0.00	0.00	70.62	14.83	10.21	0.04	0.25	0.00	0.52
36	0.00	0.00	67.94	17.04	11.79	0.05	0.24	0.00	0.74
37	0.00	0.00	65.10	19.24	11.34	0.08	0.23	0.00	1.00
38	0.00	0.00	62.13	21.41	10.87	0.11	0.22	0.00	1.25
39	0.00	0.00	59.01	23.47	10.37	0.13	0.21	0.00	1.63
40	0.00	0.00	55.78	25.41	9.84	0.16	0.20	0.00	1.99
41	0.00	0.00	0.00	0.00	32.40	0.00	67.60	0.00	0.00
42	0.00	0.00	0.00	0.00	51.96	0.00	48.04	0.00	0.00
43	0.00	0.00	0.00	0.00	58.75	0.00	41.25	0.00	0.00
44	0.00	0.00	0.00	0.00	58.75	0.00	41.25	0.00	0.00
45	0.00	0.00	0.00	0.00	65.98	0.00	34.12	0.00	0.00
46	0.00	0.00	0.00	0.00	68.99	0.00	31.01	0.00	0.00
47	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
48	0.00	0.00	0.00	0.00	34.01	65.99	0.00	0.00	0.00
49	0.00	0.00	0.00	0.00	54.59	45.40	0.00	0.00	0.00
50	0.00	0.00	0.00	0.00	65.83	34.16	0.00	0.00	0.00
51	0.00	0.00	0.00	0.00	86.12	13.88	0.00	0.00	0.00
52	0.00	0.00	0.00	0.00	95.52	4.48	0.00	0.00	0.00
53	0.00	0.00	0.00	0.00	95.52	4.48	0.00	0.00	0.00
54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.30	0.00	26.00	65.70
55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.30	0.00	26.00	65.70
56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.19	0.00	22.32	70.29
57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.09	0.00	29.35	58.36
58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.57	0.00	30.25	57.19
59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.32	0.00	31.32	52.36
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.12	0.00	31.20	49.33
61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.77	0.00	28.34	36.97
62	0.00	0.00	0.00	0.00	11.19	43.01	1.21	25.14	18.88
63	0.00	0.00	0.00	0.00	13.40	49.50	10.68	19.29	5.13
64	0.00	0.00	0.00	0.00	21.79	42.71	15.10	13.15	7.25
65	0.00	0.00	0.00	0.00	24.28	39.10	17.77	10.32	8.53
66	0.00	0.00	0.00	0.00	20.61	15.42	48.22	0.00	20.75
67	0.00	0.00	0.00	0.00	9.00	6.73	56.93	0.00	27.34

Figura 5. Cuadro con la contribución de cada fuente sobre el consumo en cada nodo, obtenida en el SCADRED para una red con diez fuentes de abastecimiento.

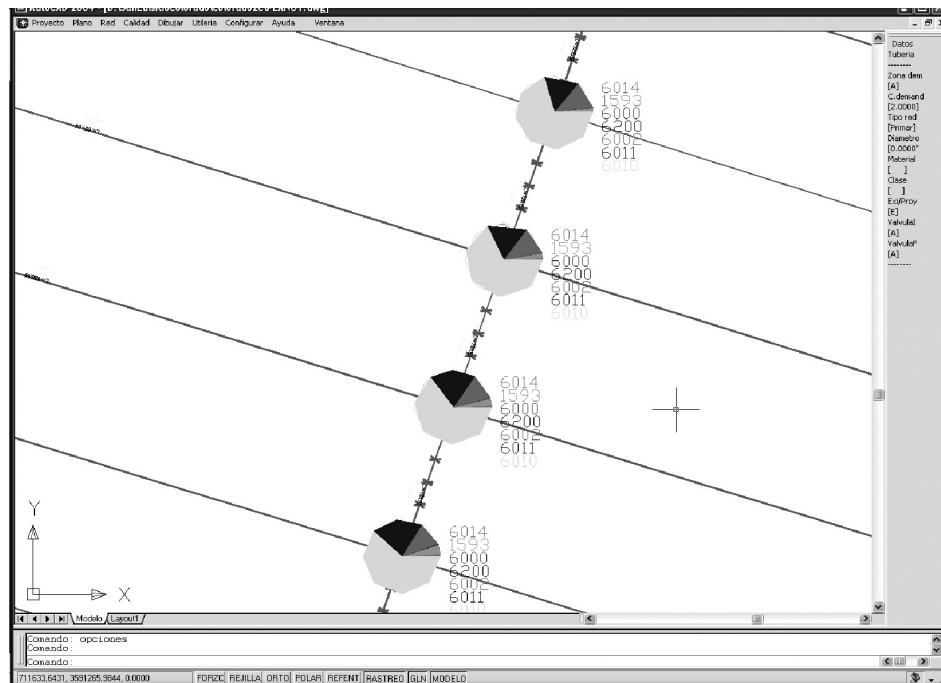


Figura 6. Cuadro con la contribución de cada fuente sobre el consumo en cada nodo, obtenida en el SCADRED para una red con diez fuentes de abastecimiento.



Figura 7. Resultado de la contribución de las fuentes, visualizado en el SCADRED para una red completa. Se distinguen claramente por color (tonalidades de gris) las áreas de influencia de las fuentes.



Figura 8. Localización del sitio de estudio.

La clasificación de las tomas por tipo de usuario y estado de medición del consumo se muestra en los cuadros 1 y 2.

La red de agua potable tiene una antigüedad de hasta cincuenta años aproximadamente y se compone de tuberías de asbesto cemento y PVC de diámetros que comprenden los 3 a 24 pulgadas, incluidos tramos de 15" que no son comerciales en México. Las fuentes de agua potable son pozos que bombean directamente a la red. No hay tanques y la red está completamente interconectada (no hay separación entre las áreas de influencia de los pozos). Algunos de los pozos están equipados con variadores de velocidad, que por lo general hacen que la bomba siga la variación de la demanda y la paran en horas de la noche.

El servicio de agua potable es continuo. El consumo de agua potable se incrementa considerablemente (más de 40%) en los meses de verano debido al aumento de temperatura, que llega a 50 °C. Por tal motivo, los habitantes de la ciudad, con el objetivo de mitigar la temperatura durante esta temporada, emplean aparatos de enfriamiento evaporativo, llamados en el lugar *coolers*, por su nombre en inglés.

En términos de eficiencia, el OOMAPAS reporta con base en sus ingresos y egresos monetarios una eficiencia comercial de 72%.

Modelo de simulación hidráulica de la ciudad

El trazo de la red de distribución de la ciudad se introdujo dentro del sistema SCADRED®. De forma posterior, se procedió a revisar las interconexiones de la red, así como la detección de posibles errores o inconsistencias en el plano otorgado por el organismo operador. La red de agua se conformó por 1 954 nodos y 2 706 tramos (Alcocer-Yamanaka *et al.*, 2005). A partir de este proceso de implementación y captura de la red de distribución dentro de un programa de cómputo, se detectaron al menos 131 errores en el plano, como los siguientes:

1. Tramos de tubería inconclusos, sobre todo en cruceros. En forma conjunta con el OOMAPAS se definió si existía conexión o no del tramo analizado hacia el cruce.
2. Válvulas que existen dentro de la red de distribución y no se incluyen en el plano.
3. Incertidumbre en la configuración de algunos cruceros.
4. Incertidumbre sobre la ubicación exacta de válvulas.

Todas y cada una de las observaciones fueron analizadas en gabinete y en campo. Para esto último se contó con el respaldo de una brigada que el OOMAPAS designó especialmente. Una vez esclarecidas todas

Cuadro 1. Clasificación de tomas por tipo de usuario.

Tipo	Doméstica	Comercial	Industrial	Total
Núm. de tomas	45 850	2 445	105	48 400

Cuadro 2. Clasificación de tomas con y sin medidor.

Tipos	Medido	No medido	Total
Doméstica	29 940	15 910	45 850
Comercial	2 010	435	2 445
Industrial	90	15	105
Total	32 040	16 360	48 400

las inconsistencias, se realizaron los trabajos de medición de caudal y presión en fuentes de abastecimiento y puntos dentro de la red. Por tal motivo fue necesario llevar a cabo dos campañas de medición: una en verano y otra en invierno.

La campaña de medición es fundamental debido a que la demanda (incluidas las fugas) proveniente de los usuarios difiere en promedio entre 323 y 522 l/hab/día entre la estaciones de invierno y verano (500 y 809 l/hab/día, respectivamente, considerando el coeficiente de variación horaria establecida por la Conagua). Esta situación obliga al diseño de los sectores, con la ayuda de la teoría de los grafos, a cumplir con ambas condiciones estacionales.

Mediciones de caudal

El caudal de cada uno de los pozos se monitoreó a la salida del mismo. Algunos pozos tienen más de una salida, por lo que fue necesario colocar un medidor de caudal en cada salida. La medición de caudal se llevó a cabo durante siete días continuos en cada pozo y con intervalos de registro de un minuto. En la figura 9 se muestra la evolución del caudal medido para uno de los pozos equipado con variador de velocidad. Se observa que el gasto máximo se presenta entre las 08:00 y las 18:00 horas, alcanzando un valor de entre 120.0 y 130.0 l/s. Después de este periodo, el gasto cae de forma lineal hasta alcanzar un valor de 0.0 l/s entre las 18:00 y las 24:00 horas, manteniéndose en este valor hasta las 08:00 horas del día siguiente (la figura se representa con una escala diaria en el eje de las abscisas). Este comportamiento se debe al variador de velocidad (Alcocer-Yamanaka *et al.*, 2005).

En la figura 10 se muestra la evolución del caudal medido para otro pozo que no tiene variador de velocidad. Se observa que el gasto máximo se presenta entre las 11:00 y las 14:00 horas, alcanzando un valor de entre 70.0 y 75.0 l/s; durante el resto del día, el gasto

se mantiene en los 50.0 litros por segundo (la figura se representa con una escala diaria en el eje de las abscisas).

En total, las mediciones de caudal mostraron un volumen de producción de 1 836 304.17 m³/mes, situación que difiere de los registros del organismo operador.

Medición de presión

La presión en los pozos se midió utilizando los manómetros colocados en los trenes de descarga. Estos manómetros tienen una aproximación de 2 lb/pulg². Los valores fueron convertidos a kg/cm² y así es como aparecen graficados. En la figura 11 se observa el comportamiento de la presión para los pozos 1, 3, 10 y 17; en general, las presiones varían de 1.5 a 2.1 kg/cm².

Se obtuvo también la presión manométrica en tomas domiciliarias dentro de la red de distribución, seleccionadas de forma aleatoria para conocer la distribución de ésta en la red.

Medición de niveles dinámicos en pozos

Se utilizó una sonda eléctrica, que consiste en dos alambres con forro de goma o plástico, una fuente de energía eléctrica (baterías) y un amperímetro. El circuito eléctrico se forma por batería, timbre o amperímetro, alambre que baja al pozo, y alambre que sube del pozo y que conectándolo con la batería completa el circuito. Los dos alambres se proveen de puntas desnudas en sus extremos cubiertas con cinta aislante o hilo para que las citadas puntas estén sin tocarse entre sí. Mientras bajan los alambres al pozo se observa el amperímetro o el timbre, y al momento en que dicho amperímetro marca corriente, es cuando las puntas desnudas inferiores tocan la superficie del espejo, cerrando la misma agua el circuito. De forma general, el nivel dinámico obtenido por las mediciones en todos los pozos oscila entre 32 y 44 metros.

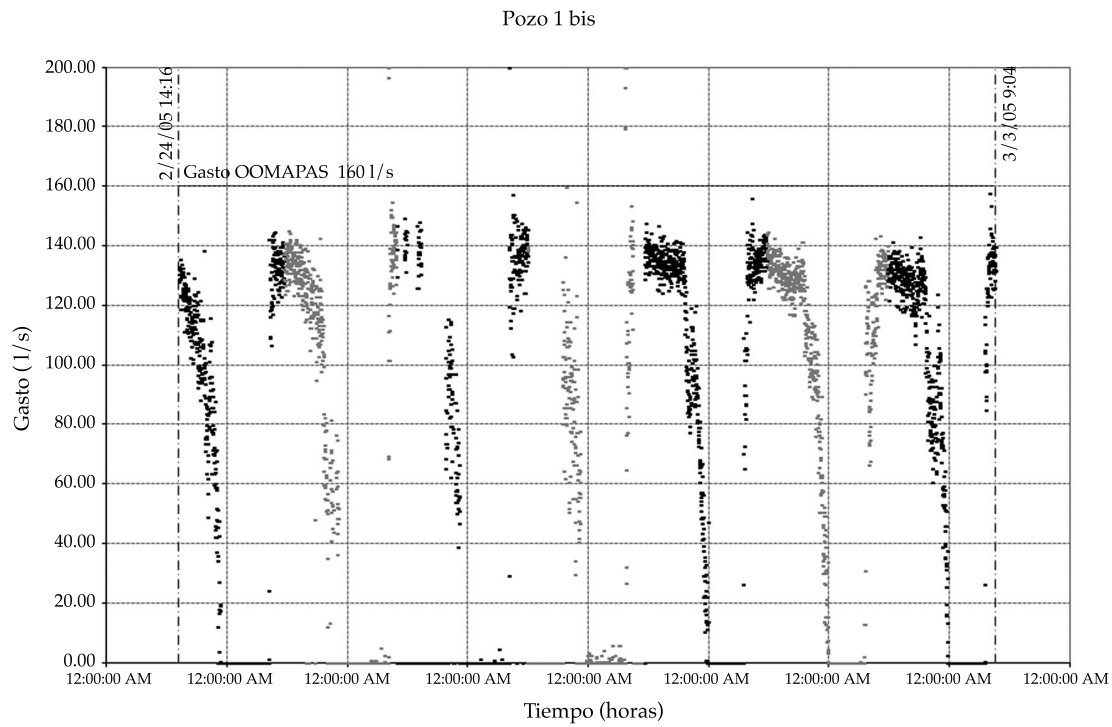


Figura 9. Evolución del caudal medido en el pozo 1 (equipado con variador de velocidad) (Alcocer-Yamanaka *et al.*, 2005).

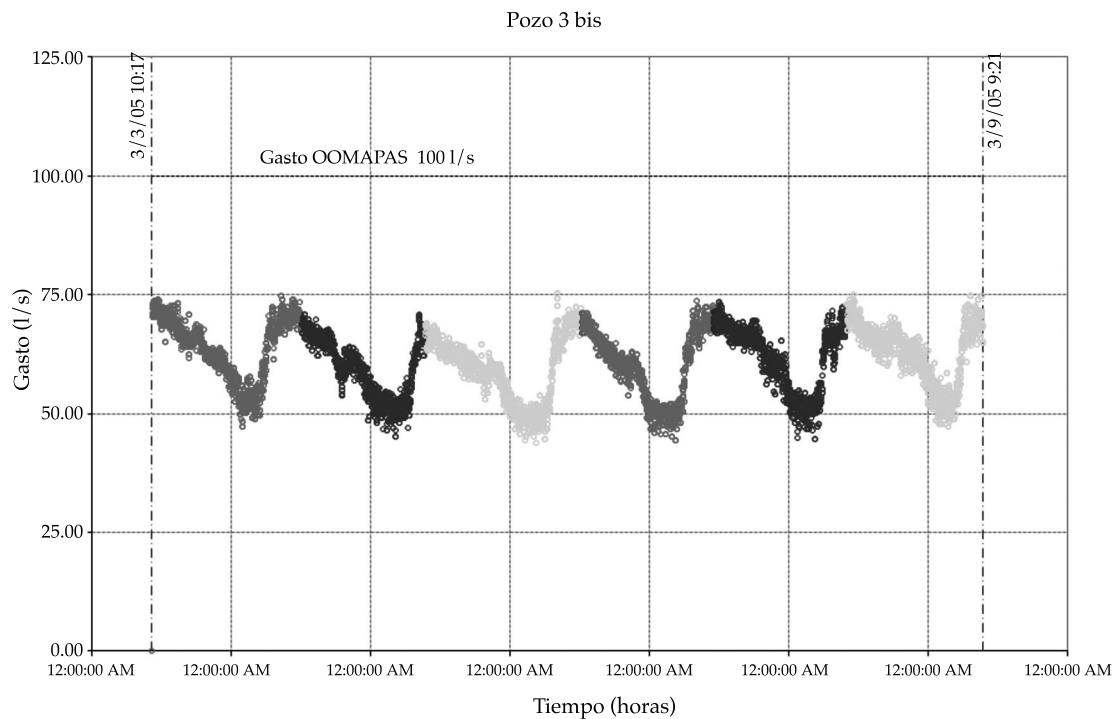


Figura 10. Evolución del caudal medido en el pozo 3 (sin variador de velocidad) (Alcocer-Yamanaka *et al.*, 2005).

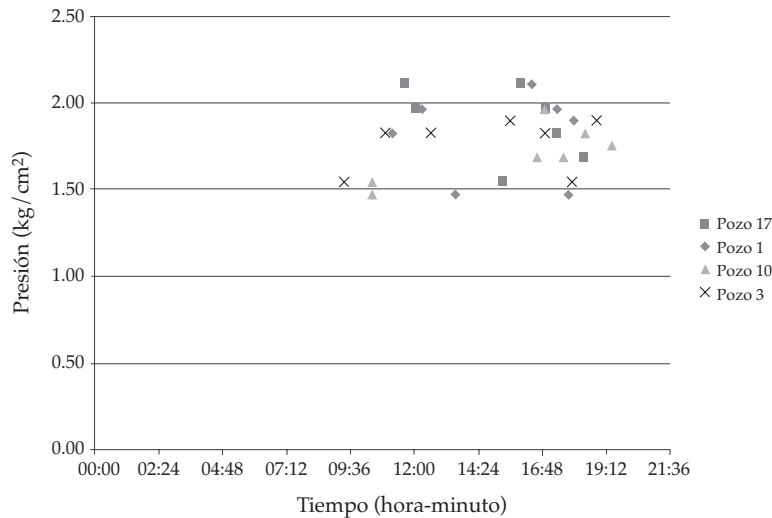


Figura 11. Comportamiento de la presión para los pozos 1, 3, 10 y 17 (Alcocer-Yamanaka *et al.*, 2005).

Construcción del modelo de simulación

Dado que la sectorización es una técnica que consiste en dividir una red de distribución en varias redes subredes más pequeñas, cada "subred", que llamaremos "sector", constituye una unidad de distribución, suficientemente limitada y homogénea como para que el manejo de los datos a captar y analizar sea lo más rápido y fiable posible. La delimitación de cada sector precisa de un trabajo preparatorio cuidadoso. Todos los elementos que garanticen dicha división física deberán ser revisados y eventualmente reparados, en particular las válvulas de corte.

Es imprescindible realizar un estudio de viabilidad, de manera que se asegure que los cambios provocados por la sectorización no resultan drásticos, y que el nivel de servicios que prestará la red sectorizada será, como mínimo, de la misma calidad que el nivel existente anteriormente. Ello implica realizar comprobaciones teóricas del funcionamiento de la red sectorizada mediante simulaciones con un modelo de simulación matemática.

De forma resumida, el desarrollo de los escenarios de sectorización a través del modelo de simulación se sujetó a las siguientes actividades:

- Recopilación de información del sitio de proyecto.
- Introducción de la red de distribución dentro del modelo de simulación hidráulica.
- Mediciones de caudal en pozos.
- Mediciones de presión en pozos y puntos dentro de la red de distribución.
- Ajuste y calibración del modelo de simulación.
- Análisis de la contribución de cada pozo.
- Recopilación de reportes de facturación.
- Determinación de eficiencias física y de facturación.

Una vez recopilada la información mencionada con anterioridad, se procedió a realizar las simulaciones dentro del programa de cómputo *SCADRED*, con el objetivo de definir los sectores hidrométricos. Se simuló primero la situación existente, a fin de calibrar el modelo de la red. Las facilidades algorítmicas 1 y 3 arriba descritas se aplicaron primero para detectar y corregir errores en los datos de la red proporcionados y capturados. La demanda de agua potable considerada fue de 323 l/hab/día, obtenida con base en los reportes de facturación y muestreo en campo, con un coeficiente de variación horaria de 1.55, de acuerdo con las recomendaciones de la Conagua (Conagua, 2004).

Se realizó después el análisis para conocer la contribución de cada fuente de abastecimiento sobre la demanda en cada nodo de la red de distribución de la ciudad, utilizando la facilidad 4 arriba descrita. Este análisis reveló que las áreas de influencia de los pozos no estaban bien balanceadas, muy grandes para algunos pozos, y muy pequeñas para otros, algo que en realidad se esperaba, dada la situación de una red completamente interconectada con múltiples fuentes y operación empírica. El análisis explicó también algunos problemas de baja presión que se tenían en una parte de la ciudad, y justificó una vez más la necesidad de sectorizar la red. Se procedió luego a proponer varias variantes de sectorizar la red, analizando cada una de ellas con el modelo *SCADRED*, adicionado con las cuatro facilidades algorítmicas descritas.

Para definir los sectores dentro de la red de distribución fue necesario considerar que la demanda de invierno difiere de la de verano; por tal motivo, el diseño final de los sectores hidrométricos mostrados en el presente artículo deberá cumplir con ambas diferencias estacionales. Considerando las recomendaciones mencionadas para las condiciones de demanda de invierno y verano se definieron diez sectores hidrométricos de la ciudad de San Luis Río Colorado (figura 12).

Con base en el diseño, el organismo operador (empresa de agua) y los autores del presente artículo formularon el Programa de Sectorización 2007-2012 de la Red de Agua Potable de la Ciudad de San Luis Río Colorado, Sonora. Con ello se tiene un programa de inversión con un horizonte de planeación de cinco años y con resultados inmediatos en la

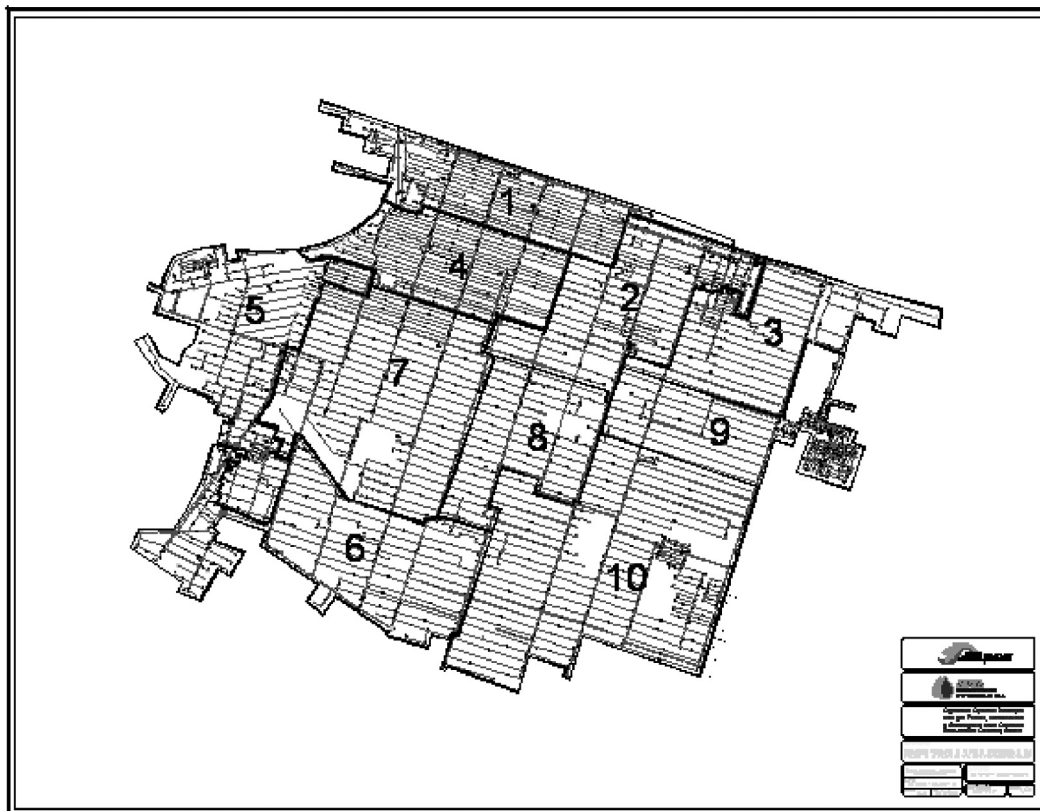


Figura 12. Definición de diez sectores hidrométricos dentro de la red de distribución de la ciudad de San Luis Río Colorado, Sonora.

organización de la red de distribución de agua de la ciudad.

Programa de sectorización física de la red de distribución de la ciudad de San Luis Río Colorado, Sonora

Durante los años subsecuentes (2007, 2008 y 2009), el Organismo Operador de Agua de San Luis Río Colorado Sonora (OOMAPAS), en forma conjunta con diversas instituciones, realizó los trabajos de sectorización física con base en el diseño realizado.

Los trabajos de sectorización consisten en llevar a cabo el aislamiento de la red a través de la instalación de válvulas en las fronteras entre los sectores, además de la implementación del programa de mejoramiento de eficiencia física en cada uno de los mismos (Conagua, 2004).

Con base en los recursos humanos, económicos y políticos, así como en la capacidad de recuperación de la inversión derivada de los trabajos de sectorización, como detección de tomas clandestinas, actualización del padrón de usuarios y reducción de fugas, entre otros, se establece la realización de actividades únicamente en dos sectores hidrométricos por año (cuadro 3).

Cuadro 3. Periodo de ejecución de actividades por sector hidrométrico en la ciudad de San Luis Río Colorado, Sonora.

	Años de ejecución	
Sector 1 (distrito piloto)	2007	2008
Sector 4	2007	2008
Sector 2	2008	2009
Sector 3	2008	2009
Sector 9	2009	2010
Sector 10	2009	2010
Sector 5 (proyectado)	2010	2011
Sector 6 (proyectado)	2010	2011
Sector 7 (proyectado)	2011	2012
Sector 8 (proyectado)	2011	2012

Actualmente se tiene la sectorización física y evaluación de la eficiencia física en cuatro distritos hidrométricos (sectores 1, 4, 2 y 3).

Hoy día, los trabajos de campo relacionados con el programa de sectorización los realiza el personal del Organismo Operador Municipal de San Luis Río Colorado, recurriendo únicamente al apoyo en la evaluación y determinación de la eficiencia física de los distritos hidrométricos.

Conclusiones

Los proyectos de sectorización en redes grandes requieren facilidades algorítmicas adicionales, como análisis de conectividad, zona de influencia y contribución de las fuentes sobre el consumo. Esas facilidades normalmente no se tienen en los paquetes de análisis de redes de distribución de agua potable disponibles en el mercado. En el presente artículo se presentan algoritmos eficientes, basados en la teoría de los grafos, para obtener las subredes separadas, revisar para nodos desconectados de las fuentes, y determinar la contribución de las fuentes sobre el consumo en los nodos. Los algoritmos descritos están implementados en el *Sistema de Cómputo de Análisis y Diseño de Redes (SCADRED)*, con facilidades gráficas que permiten, entre otros detalles, visualizar la contribución de las fuentes sobre el consumo en los nodos y definir con esto sus áreas de influencia, algo que es de suma importancia en los proyectos de sectorización.

Incluir el algoritmo dentro del programa fue posible dado que los autores son los programadores y autores del código del programa; asimismo, este algoritmo ha sido implementado en los proyectos de sectorización en otras ciudades mexicanas, como Matamoros, Tamaulipas; Pátzcuaro, Michoacán; Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, y Chihuahua, Chihuahua, entre otras.

Finalmente es importante señalar que en la actualidad no existe un programa comercial que aborde esta problemática basada en la

sectorización de redes de agua potable tanto en el ámbito nacional como internacional.

Recibido: 17/09/09
Aprobado: 07/12/10

Referencias

- ALCOCER-YAMANAKA, V.H., TZATCHKOV, V. y MARTÍN DOMÍNGUEZ, A. Modelación hidráulica de la red de distribución de agua potable de la ciudad de San Luis Río Colorado, Sonora. *Informe final*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2005.
- CONAGUA. Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia en sistemas de agua potable. *Manual técnico*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2004.
- DOE, S.R. and DUNCAN, G. Water Informatics: State of the arts in the integration of water supply and geographic information systems. *Environmental Informatics Archives*. Vol. 1, 2003, pp. 524-531.
- TODINI, E. and PILATI, S. *A gradient method for the analysis of pipe networks*. International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, United Kingdom, September 1987.
- TZATCHKOV, V. Redes de distribución. *Manual de diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2007.
- TZATCHKOV, V. y ARREGUÍN-CORTÉS, F.I. Modelo de calidad del agua en redes de distribución con flujo permanente. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XI, núm. 1, enero-abril de 1996, pp. 61-70.
- TZATCHKOV, V. e IZURIETA-DÁVILA, J.L. Sistema de cómputo para el análisis y diseño óptimo de redes de distribución de agua potable. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XI, núm. 2, mayo-agosto de 1996, pp. 55-63.

Abstract

TZATCHKOV, V.G. & ALCOCER-YAMANAKA, V.H. Implementation of graph theory based algorithms in water distribution network sectorization projects. *Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. II, No. 3, July-September, 2011, pp. 97-114.

Water distribution network sectorization projects currently underway in many Mexican cities consist of dividing the city distribution network into smaller sub-networks, or sectors, with one or at most two water inlets per sector. To design the sectors, water distribution network models are used, which review whether the proposed sectorization can adequately function hydraulically. For large network sectorization projects, however, additional algorithmic capabilities are needed, such as connectivity analysis, zone of influence and the contribution of each source on consumption. This paper discusses efficient algorithms of this type based on graph theory, implemented in a computer system.

Keywords: sectorization of distribution networks, distribution network models, water supply systems, algorithms on graphs.

Dirección institucional de los autores

Dr. Velitchko G. Tzatchkov

Dr. Víctor Hugo Alcocer-Yamanaka

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso

62550 Jiutepec, Morelos, México

Teléfonos: +52 (777) 3293 678 y 3293 600, extensiones 898 y 816

Fax: +52 (777) 3293 678

velitchk@tlaloc.imta.mx

yamanaka@tlaloc.imta.mx