Aplicación del modelo de asignación de agua a Monterrey, Nuevo León

Remo Loaiza García

Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos, SARH

Arturo Jiménez Ramón

Planeación y Sistemas de Control

La planeación y el aprovechamiento idóneos de los recursos escasos requieren día a día de nuevas técnicas y enfoques. El agua, como recurso prioritario del desarrollo y como factor limitante de él, debe analizarse con un enfoque integral, tanto en lo referente a su disponibilidad como en lo que respecta a su asignación para usos competitivos. En este artículo se presenta un modelo de asignación de recursos hidráulicos para simular, por medio de una representación de redes esquemáticas y de su solución matemática, el problema de abastecimiento de agua a la ciudad de Monterrey, Nuevo León. La aplicación de esta técnica a los diversos y complejos sistemas hidráulicos del país permitirá usar el agua de manera más eficiente y, por tanto, lograr un desarrollo regional más equilibrado.

Antecedentes

El abastecimiento de agua potable se ha convertido en uno de los problemas hidráulicos más importantes del país debido al rápido crecimiento de las ciudades ocasionado por la emigración rural en busca de oportunidades de trabajo, comodidades y servicios. Esta situación se agrava constantemente a causa de la situación económica actual y contribuye al desarrollo desmedido de los principales centros urbanos. Ejemplos palpables de ello son la ciudad de México, Tijuana, Guadalajara y Monterrey.

En relación con el suministro de agua potable a Monterrey, se han efectuado diversos estudios, orientados a determinar la factibilidad de conducir aguas superficiales a esta ciudad, precisando las fuentes de abastecimiento y los volúmenes aportados. En los últimos años, el incremento de la demanda ha superado a la oferta, lo que ha propiciado un déficit importante de agua potable para los diversos usos de la ciudad.

En uno de los estudios mencionados se analizaron fuentes de abastecimiento localizadas en un radio de 300 km, cuyo centro se ubica en Monterrey; a partir del análisis, fue factible compararlas y jerarquizarlas, para concluir que se cuenta con las siguientes posibles fuentes: Icamole, San Juan, Cerro Prieto, Libertad, Providencia, El Cuchillo, Falcón y Las Blancas. La ubicación de estos vasos de almacenamiento en cuencas o subcuencas diferentes plantea variables importantes para el manejo de los recursos de la región.

Posteriormente, se realizó otro estudio a nivel estatal destinado a definir un esquema de desarrollo hidráulico; en él se plantearon las condiciones y los sistemas regionales para un mejor aprovechamiento del agua en el estado de Nuevo León, con base en los requerimientos de agua actuales y futuros. A raíz de este estudio, se sugirió la construcción de los acueductos sur, Linares-Monterrey; oriente, China-Monterrey y norte, Las Estacas-Gomas-Monterrey. Así mismo, surgió la idea de incorporar al acueducto sur el agua de otras fuentes localizadas a lo largo de su trayectoria.

A fines de 1981, se llevó a cabo una reunión en la que participaron diversas secretarías de estado;

en ella, se determinó que la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos se abocaría al estudio y construcción del acueducto sur; la entonces Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas se encargaría del acueducto norte; y el Gobierno del Estado, de la construcción de un periducto que recibiría el agua en bloque de las diferentes fuentes.

Algunos meses después se realizó un estudio que analizó de manera independiente las fuentes localizadas a lo largo del acueducto sur. Se destacó la magnitud del problema que representa el abastecimiento de agua a la ciudad de Monterrey, y se propusieron algunas estrategias para solucionarlo en el mediano y largo plazos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los resultados de este estudio no son concluyentes, ya que *el análisis independiente de las fuentes de abastecimiento* sólo permite conocer, en cierto sentido, la disponibilidad hidrológica y su factibilidad técnica, pero no revela las dificultades de conducción, las dimensiones de los acueductos ni la política de operación de los distintos vasos en el sistema hidráulico.

Objetivo

Por todo lo anterior y con base en los estudios previos, se elaboró un nuevo trabajo, cuya finalidad fue definir tanto las estructuras necesarias para aprovechar el agua de las diversas corrientes que se presentan a lo largo del acueducto Linares-Monterrey, como las características de dichas estructuras y la política de operación que permitiera obtener el agua a menor costo.

El modelo de asignación de recursos

Con objeto de abordar el problema del suministro de agua a Monterrey, se utilizó un modelo de asignación de recursos desarrollado por la División de Ingeniería de Sistemas del Consejo de Desarrollo del Agua del Estado de Texas. Se trata de un modelo de optimización de sistemas de aprovechamientos hidráulicos superficiales y está diseñado para analizar la simulación multiperiódica de una configuración interconectada de vasos, canales y tuberías. Con el modelo es posible determinar:

- El método más económico para la construcción de vasos y acueductos.
- Las características de capacidad de las estructuras.
- La política de operación a costo mínimo del sistema hidráulico.

El modelo se fundamenta en un algoritmo de redes de flujo, que trabaja en forma eficiente y está basado en la técnica combinada de ruta más corta-flujo máximo (CPNH, 1983). Su estructura general es la siguiente:

- El sistema físico está representado espacialmente por una configuración de nodos y arcos, denominada geometría del sistema. Los nodos pueden representar tanto almacenamientos como puntos de unión, mientras que los arcos caracterizan canales, tuberías o ríos.
- La representación espacial se multiplica para tomar en consideración el tiempo. Para cada periodo del problema analizado, se efectúa una *copia* de la geometría física del sistema y se relaciona por medio de las características en que termina el sistema en dicho periodo, comunicando éste con el siguiente. Esto se conoce como réplica de la red.
- Para realizar el análisis de asignación de recursos hidráulicos, incluye los siguientes parámetros: a) condiciones iniciales en los nodos; b) características de la demanda (magnitud y distribución por periodo); c) entradas a las presas por periodo; d) factibilidad de sitios de derrame; e) suministro mínimo; f) cargas de bombeo.

A partir de estos tres componentes del modelo, en el sistema existen nueve tipos diferentes de nodos:

nodo	1. fuente
	2. de entradas
	3. de demanda
	4. de importación
	5. de derrame
	6. de almacenamiento final
	7. sumidero
	8. de almacenamiento
	9. de unión

El número total de nodos en una red está dado por:

$$N = Ln_n + 7 \qquad (1)$$

donde, L es el número de periodos en el problema, n_n, el número total de nodos en la representa-

ción espacial del sistema y 7, el número de nodos especiales en el problema caracterizados por los nombres arriba anotados del 1 al 7.

Existen, además, 10 tipos de arcos diferentes. El flujo a través de ellos está restringido por los límites superior e inferior dados por:

Tipo de arco	Limite inferior	Límite superior
1. Río	Flujo mínimo requerido	Capacidad de cauce
2. Canal o tubería	Flujo mínimo requerido	Capacidad del canal
3. Almacenamiento	Cero	Capacidad del almacenamiento
4. Almacenamiento meta	Almacenamiento mínimo	Almacenamiento esperado del vaso
5. Almacenamiento inicial	Almacenamiento inicial	Almacenamiento inicial
6. Entradas	Régimen del río	Régimen del río
7. Demanda	Porción requerida de la demanda que debe satisfacerse	Demanda total
8. Importación	Cero	Máxima disponible
9. Derrames		
10. Balance neto		
a. Entradas totales	Suma de entradas	Suma de entradas
b. Importaciones totales	Cero	Suma de importaciones máximas
c. Demanda total	Cero	Suma de demandas
d. Derrames totales	Cero	Suma de derrames
e. Almacenamiento final total	Cero	Suma de capacidades de vasos
f. Flujo de paso	Cero	Un valor positivo grande

En aquellos arcos donde el nivel o límite inferior es igual al superior, se obliga al sistema a respetar exactamente los valores de entrada al mismo por ese concepto y a mantenerlos fijos. El número total de arcos que puede resolver el modelo de asignación de recursos está dado por:

$$\text{Número de arcos} = \{(n_l + 2n_r + 2n_n + n_s + 1) * L\} + 6 + n_r \qquad (2)$$

donde n_L es el número de arcos (canales más ríos); n_r, el número de nodos que representan vasos; n_n, el número de nodos que representan uniones; n_S, el número de nodos donde se permite derrame; *1*, el arco de importación; *L*, el número de periodos del problema y *6* representa el número de arcos de balance neto.

Cuando el número de periodos en que se divide el año (o el número de años que se desea analizar) es muy grande, el resultado del algoritmo sólo podrá utilizarse en partes; esto es, como el número de arcos y nodos de que consta la red es también muy grande (dadas las réplicas que genera por año y/o periodo de análisis), el problema se irá resolviendo en forma parcial; estos resultados serán óptimos y válidos para el primer o primeros años y la manera de obtener una solución para los sucesivos consistirá en suprimir ese primer año resuelto y añadir datos nuevos asociados al siguiente, hasta donde se alcanzó a trabajar con el algoritmo. De esta manera, se resolverá una nueva red y se obtendrán resultados para el segundo año, después para el tercero y así hasta terminar con todos los que se desea analizar. (Es conveniente señalar que al eliminar un año, las condiciones finales del sistema en dicho año corresponderán a las iniciales para el siguiente).

El modelo parte de las hipótesis siguientes:

- No considera la calidad del agua.
- Debido a la magnitud de los incrementos de tiempo que, en general, serán mensuales (como mínimo), no se puede simular el comportamiento de canales o ríos en presencia de avenidas.
- Todas las demandas de agua deben especificarse de antemano.
- Las importaciones de agua se realizarán siempre y cuando el sistema no pueda satisfacer la demanda y haya agua disponible en el arco de importación.
- Se manejan en forma conjunta la función objetivo de mínimo costo y la de penalización, dadas las restricciones y parámetros de costo involucrados en cada uno de los datos del sistema. Por consiguiente, se tendrá como resultado la maximización de los beneficios netos.
- En relación con el punto anterior, para obtener resultados adecuados y con mayor detalle, es necesario especificar en forma apropiada los costos o beneficios por derramar o almacenar agua en los vasos.
- Los costos de los canales deben dividirse en dos componentes, los de construcción y los de operación.
- El sistema físico se representa por un conjunto de nodos y arcos interconectados. Los primeros representan vasos y puntos de unión; los segundos corresponden a ríos, canales y tuberías.

- Todas las demandas se realizan en los vasos.
- Las evaporaciones de los canales se calculan como un porcentaje del flujo a través de ellos.
- Se supone una eficiencia de bombeo de 0.8 en aquellos arcos que requieren de ésta.

Metodología de solución

El problema de optimización de flujo en la red multiperiódica antes descrito constituye un refinamiento de los programas en que se apoya este algoritmo.

Anteriormente, para resolver la red se usaba un algoritmo mediante el análisis clásico de redes de flujo, considerando que lo que sale del nodo fuente es igual a lo que entra al nodo sumidero; por consiguiente, no representaba el fenómeno físico, pues no se contabilizaban las pérdidas por evaporación en vasos o canales. Además, tampoco era adecuada la precisión para periodos múltiples.

El desarrollo de algoritmos eficientes, desde el punto de vista computacional, permite calcular el flujo a costo mínimo en redes con ganancia. Una red con ganancia es simplemente una red con un parámetro descriptivo adicional asociado a cada arco. Este parámetro adicional se denomina factor de ganancia y tiene un valor igual a la relación entre el flujo que sale del arco y el que entra. Un arco con una ganancia de 0.9, por ejemplo, transmitirá el 90% del flujo, al tiempo que perderá el 10% restante.

El valor asignado a un factor de ganancia de un arco dependerá del fenómeno que ocasione las pérdidas de agua. La parte más completa en la asignación de los factores de ganancia corresponde a las pérdidas por evaporación de vasos, debido principalmente a la relación entre área-almacenamiento y evaporación, que por supuesto no es lineal. Sin embargo, mediante una separación correcta, de la relación existente entre el volumen almacenado y el área expuesta se obtienen dos rectas que asocian esta dependencia; una de ellas representa la correspondencia entre ambas variables para valores pequeños y la otra para valores más altos. Así, la evaporación puede calcularse de manera más precisa, ya que es proporcional al almacenamiento.

La aplicación del modelo requiere de datos sobre: estructura del sistema, nodos, arcos, costos, hidráulicos e hidrológicos y de simulación del sistema.

Estructura del sistema

- Dimensiones de la red.
- Lista de cada arco que entra a cada nodo.
- Lista de los nodos al final de cada arco (dirección).

Nodos

- Nombre para cada nodo.
- Capacidad máxima.
- Capacidad mínima.
- Relación capacidad-área.
- Número de nodo hacia donde fluirá el agua.
- Año de la simulación en que iniciará su operación.

Arcos

- Nombre para cada arco.
- Capacidad máxima.
- Capacidad mínima.
- Costo de bombeo.
- Carga de bombeo.
- Año de la simulación en que iniciará su operación.
- Porcentaje medio anual de pérdidas por conducción.

Costos

- Tasa de interés y horizonte de planeación.
- Inversión y operación para cada vaso.
- Inversión y operación para cada arco.
- Unitario por déficit en cada nodo de demanda por periodo.

Hidráulicos e hidrológicos

- Entradas a los vasos en cada periodo.
- Demandas en los nodos en cada periodo.
- Evaporaciones para cada vaso y en cada periodo.

Simulación del sistema

- Delimitadores del intervalo de tiempo y lapso total de la simulación.
- Lista de los nodos donde se permite el derrame y costo unitario de derrames.
- Volumen total, distribución estacional y costo unitario del agua para importación.
- Porcentaje de llenado de cada vaso al inicio de la simulación.

Alcances del programa

Con el programa de Asignación de Recursos en la computadora de la SARH se puede analizar un sistema interconectado de hasta 30 vasos y uniones, 45 arcos (canales, tuberías y ríos) y hasta 12 periodos en el año, mientras que el horizonte de simulación puede ser de hasta 45 años.

El número de nodos y arcos que puede resolverse mediante el modelo no debe ser mayor de 1800 y 500, respectivamente; el total debe calcularse de acuerdo con las ecuaciones mencionadas anteriormente.

El uso del modelo permite: establecer la política de operación de costo mínimo para un sistema de almacenamientos múltiples y en un horizonte de tiempo finito; determinar las capacidades de vasos, canales y tuberías y encontrar las reglas de operación periódica de los vasos.

Configuración del sistema

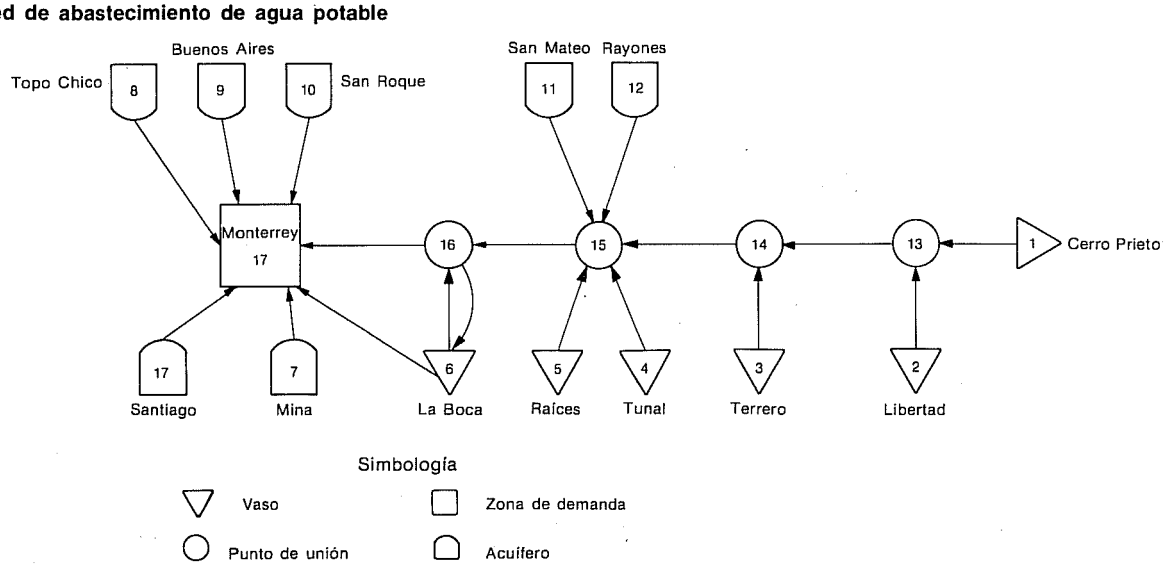
A partir de las características básicas tanto del modelo de asignación de recursos como del sistema de abastecimiento de agua potable a la ciudad de Monterrey, se plantearon algunas suposiciones para analizar todo el sistema de manera integral. Como primera hipótesis se admitió la operación de los acuíferos como vasos; esto es, la recarga se consideró como la entrada media del periodo, dándose niveles máximos y mínimos de almacenamiento. Además, no se permitió que hubiera pérdidas por evaporación. Se manejaron todas las unidades dentro del sistema MKS, para lo que se efectuaron las transformaciones correspondientes. También se modificaron los factores para convertir gasto a potencia.

El sistema estuvo constituido por 18 nodos, de los cuales 12 fueron vasos o acuíferos y seis nodos de unión; se consideró un derrame en 10 de los vasos. De los 20 arcos considerados, cinco eran ríos y el resto, tramos del acueducto sur. El número total de años —que varía de 3 a 9— de análisis a futuro varió según la alternativa estudiada.

La ilustración 1 presenta el esquema de la red que plantea el problema de abastecimiento a la ciudad de Monterrey, y en el cuadro 1 se muestran las características de cada proyecto tal como se han analizado en el programa. En el mismo cuadro y en la ilustración 2, se señalan los datos hidrológicos utilizados en el modelo, ya sea como entradas a las presas o como recarga a los acuíferos. Este último dato fue repartido en el año, de acuerdo con las particularidades climatológicas de la región. En la ilustración 3 pueden observarse las pendientes asociadas a los dos rangos donde se calcularon las evaporaciones de los vasos.

En el renglón económico, se consideró una tasa de interés del 12% anual, un periodo de recuperación del capital de 30 años y un costo de energía para bombeo de $1.50 KW-HR (pesos de 1983). Los costos por deficiencia fueron de $400.00 por m^3 para el periodo seco (diciembre a mayo) y de $395.00 para el húmedo (junio a noviembre). Los costos anuales de operación y mantenimiento de las presas se calcularon en 9% de la inversión inicial, mientras que los de los conductos fueron de 2%. La información utilizada en la estructura de datos del modelo se basó en

1. Red de abastecimiento de agua potable



1. Características de los vasos y acuíferos

Vaso o acuífero	Capacidad (Mm^3)	Inversión (M$)*	Entrada o recarga (Mm^3)	Media anual (Mm^3/s)
Cerro Prieto	390.0	2900.0	258.4	8.2
Libertad	120.0	3300.0	87.9	2.8
Terrero	175.0	3500.0	121.4	3.9
Tunal	30.0	600	40.4	1.3
Raíces	150.0	900	81.1	2.6
La Boca	42.0		78.1	2.5
Mina	220.0		26.2	0.8
Topo Chico	110.0		15.8	0.5
Buenos Aires	330.0		31.5	1.0
San Roque	19.0		6.3	0.2
San Mateo	7.0	135.0	1.9	0.06
Rayones	22.0	350.0	18.9	0.6
Santiago			28.4	0.9
Total		11685.0	796.3	25.2
Fuentes superficiales	907.0	11200.0	667.3	21.2
Fuentes subterráneas	708.0	485.0	129.0	4.0

* **Fuente:** Dirección General de Captaciones y Conducciones de Agua, Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica, SARH, 1983.

los cálculos presupuestarios del proyecto de abastecimiento a Monterrey de la Dirección General de Captaciones y Conducciones de Agua de la SARH.

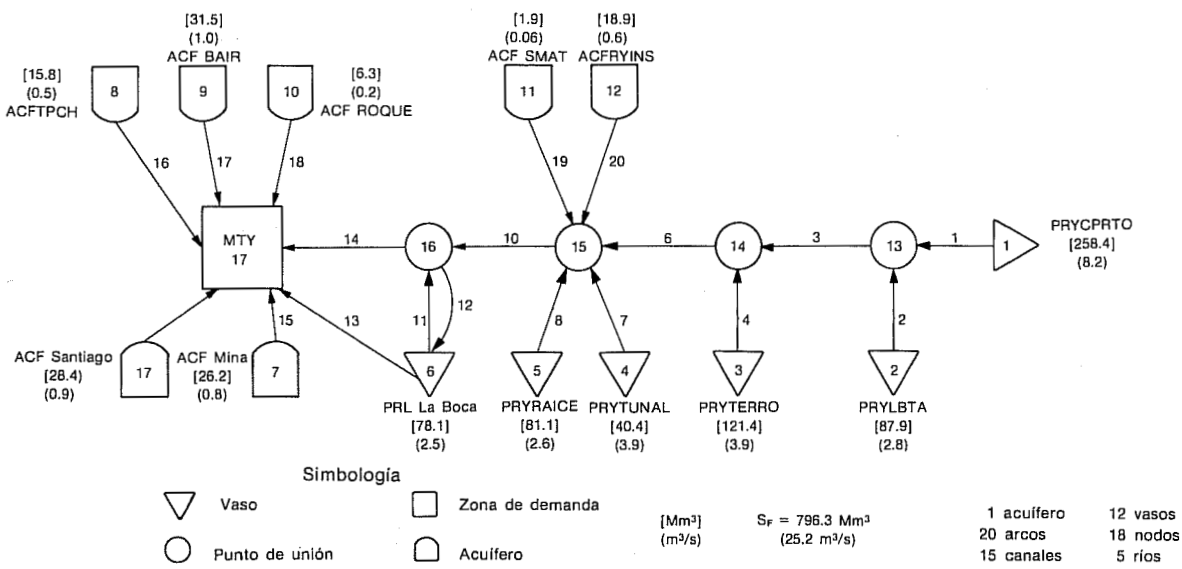
Análisis de alternativas

Se plantearon diversas opciones que permitieron, por un lado, precisar los elementos del sistema y, por otro, obtener información útil para la toma de decisiones. A continuación se describen las alternativas, a partir de las cuales se seleccionó la más adecuada.

De aguas superficiales

En la primera configuración del sistema sólo se analizaron en forma independiente el control y aprovechamiento de las aguas superficiales; es decir, se consideraron los vasos de almacenamiento y los ríos Pablillo, Pilón, Blanquillo, Ramos y San Juan. En esta primera alternativa, se requería calcular la operación de los vasos, por lo cual se variaron los años en que se terminarían de construir, conforme al programa original, planteado por la CPNH en 1980. La operación de los acuíferos estaba controlada, lo que permitía recu-

2. Volúmenes medios de entrada o recarga



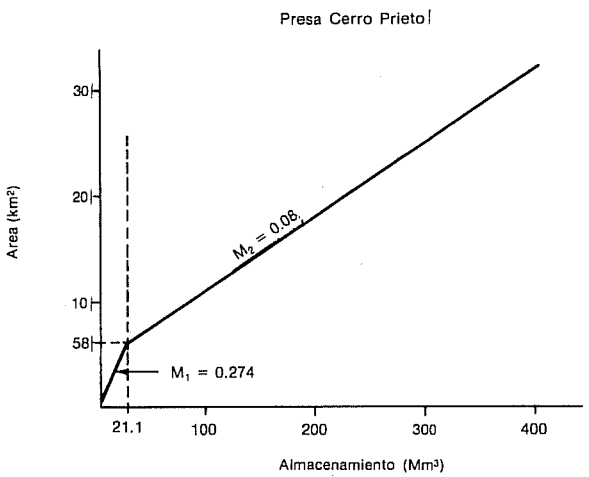
perar algunos cuyos niveles en ese momento eran muy bajos.

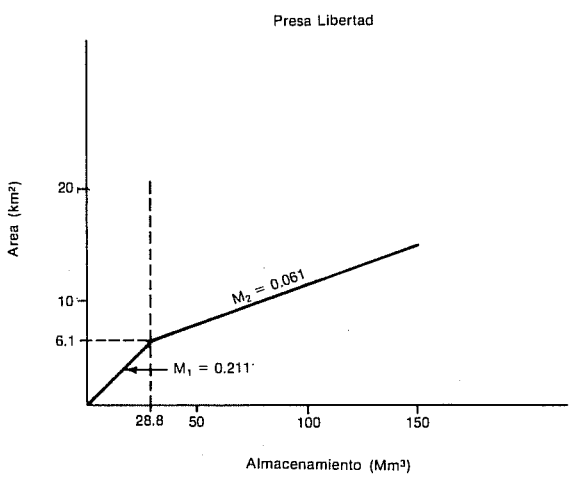
La demanda de agua en la ciudad de Monterrey se consideró creciente en forma lineal durante los 7 años de la simulación; el nivel inicial era de 6 hasta 8.6 m^3/s.

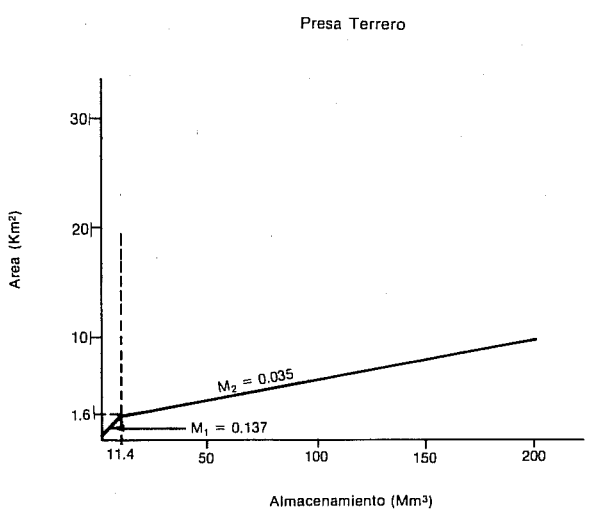
Bajo estas condiciones se observaron algunas características importantes del funcionamiento del sistema:

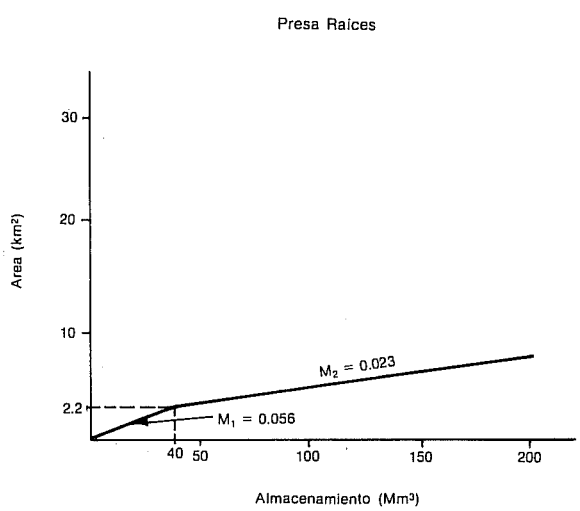
- Durante el primer año hubo deficiencias muy importantes en el suministro de agua a la ciudad.

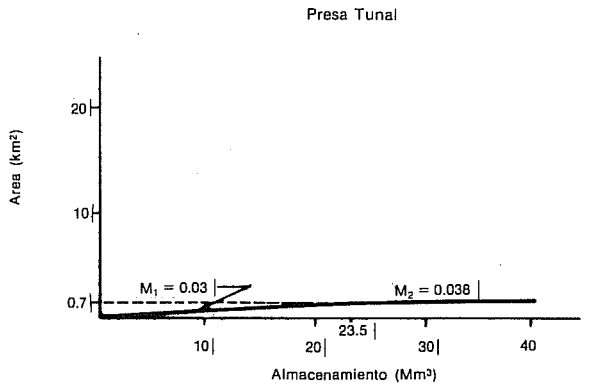
3. Curvas capacidades-áreas

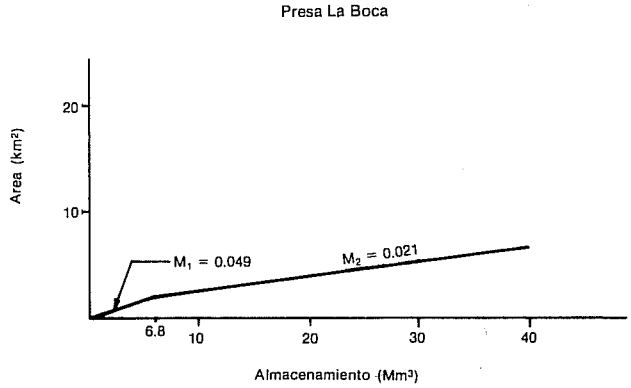












- Al entrar en operación la presa Cerro Prieto en el segundo año de simulación, se cubrió la demanda.

- A partir del tercer año, dejó de utilizarse la presa Cerro Prieto, que fue sustituida por las presas Tunal y Raíces, apoyadas por el vaso Terrero.

- En los 7 años que pudo simularse el sistema, la presa Libertad no entró en operación.

- No se presentaron deficiencias a partir del segundo año.

Con dos centros de demanda: de agua potable y de riego

En virtud de los problemas surgidos en relación con el aprovechamiento de las corrientes Pilón, Ramos y Blanquillo, cuyas aguas están concesionadas para el cultivo de cítricos, se modificó la red del sistema, aumentando un nuevo centro de demanda, correspondiente a la zona agrícola. Además, se decidió separar los acuíferos; esto es, que se operaran independientemente y de acuerdo con las condiciones prevalecientes en cada uno de ellos. Por lo tanto, se manejaron como vasos de almacenamiento sin evaporaciones.

Con los resultados obtenidos en esta alternativa, no se pudieron definir ni el tramo de las presas en proyecto ni los del acueducto, por lo que se generaron otras posibilidades de análisis.

Cabe señalar que, para eliminar los conflictos que se pudieran ocasionar por la utilización del agua concesionada de las corrientes Ramos, Pilón y Blanquillo, es necesario reponer el agua empleada por los agricultores, mediante el retorno de las aguas negras tratadas procedentes de Monterrey.

De dimensionamiento de presas

El modelo de asignación de recursos plantea dimensionar un vaso de almacenamiento como una de las posibilidades de resolución del problema, por lo que mediante la configuración de la red presentada en el apartado anterior, se decidió diseñar el tamaño de los vasos Libertad, Terrero, Tunal y Raíces.

A fin de lograr que el vaso o vasos de donde se harían las extracciones para cubrir la demanda concordaran con el modelo, se consideró, en lugar de una demanda creciente, una fija que podría ser satisfecha por todos los proyectos en el primer año. De manera adicional, se efectuó un análisis de frecuencias sobre los niveles de almacenamiento de los proyectos y se concluyó que la capacidad de las presas Terrero y Raíces estaba restringida por las condiciones topográficas y que se requerían capacidades mayores que las de los sitios escogidos (175 y 150 Mm^3, respectivamente), lo cual hizo necesario buscar vasos adicionales aguas arriba de los ya localizados.

Por otro lado, se encontró que la presa Tunal funcionaba bien con una capacidad útil de 30 Mm^3, y que la presa Libertad no se utilizaría para el periodo analizado.

La jerarquización por importancia de las presas en el tiempo fue: Terrero, Raíces, Tunal y Libertad.

De sensibilidad del sistema a la presa Libertad

Con los resultados de la alternativa anterior, y para evitar posibles conflictos con los agricultores, la Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica propuso el aprovechamiento del río Potosí, mediante una derivadora, cuyas aguas serían enviadas a las presas Terrero y Cerro Prieto. Dicha derivadora se ubicaría aproximadamente 16 km aguas arriba de la estación Cabezones; el área de cuenca de captación es de 993 km^2 y su precipitación media anual es de 500 mm.

A fin de calcular los escurrimientos, se tomó como base la estación hidrométrica Cabezones, cuya área de drenaje es de 1 166 km^2, con una precipitación media anual de 600 mm. A partir de estas estimaciones, se determinó un funcionamiento diario de la derivadora para el periodo 1956-1974, considerando una capacidad de derivación de 12 y 8 m^3/s, para las presas Terrero y Cerro Prieto, respectivamente. Por lo tanto, se procedió a simular el funcionamiento del sistema descrito en la alternativa anterior, haciendo que la demanda de agua a Monterrey fuera constante durante el periodo y llegara a 15 m^3/s.

Para analizar el comportamiento marginal de la presa Libertad, se simularon tres posibilidades diferentes: la primera, que sirvió como marco de referencia, no contempló el aprovechamiento del río Potosí; en la segunda, se consideró la derivadora; mientras que en la tercera, se utilizó el almacenamiento con capacidad útil de 120 Mm^3. Con esta alternativa se obtuvieron los siguientes resultados: sin aprovechar el río Potosí, el sistema suministra en el periodo un gasto medio anual de 14.1 m^3/s; con la derivadora, 14.2 m^3/s y con la presa de almacenamiento, 14.4 m^3/s.

De demanda cercana al potencial hidrológico del sistema

Debido a la poca variación en el suministro total a la ciudad con un almacenamiento o con una derivadora, se revisaron las condiciones del sistema y se observó que se requería un volumen de demanda inferior al disponible en las cuencas controladas. Por este motivo, se simuló el mismo sistema para diferentes niveles de demanda: 20, 22, 24, 26, 28 y 30 m^3/s; los resultados indicaron que para 30 m^3/s, el sistema tenía un comportamiento controlable, aunque con ciertas deficiencias; por ello, se seleccionó este nivel de demanda como el adecuado para el análisis real del sistema.

De dimensionamiento de tubería

En una de las etapas de desarrollo del proyecto, se decidió dimensionar el tamaño de los tubos que conforman el acueducto Linares-Monterrey, pero en virtud de la baja demanda a que se sometía el sistema, los resultados obtenidos no fueron adecuados ni consistentes.

Para el nivel de demanda de 30 m^3/s, podría obtenerse un dimensionamiento del acueducto aceptable para el futuro. En primer término, se dejaron libres las capacidades de la tubería; para ello, en el modelo se fijaron 1000 m^3/s como límite superior, con el cual, el sistema proporcionó un gasto medio anual a la ciudad de Monterrey de 22.8 m^3/s y los tamaños de cada arco según la numeración original de la red señalados en el cuadro 2.

Posteriormente, se redujeron las capacidades de las tuberías de acuerdo con las curvas de distribución de frecuencias de los gastos, para lo cual se escogieron los tamaños para los porcentajes de 90, 75 y 50, obteniéndose suministros de 22.7, 22.3 y 18.2 m^3/s, respectivamente.

Dado que la diferencia en tamaño de tubo entre el máximo y el del percentil 75 era muy grande y debido a que se obtuvieron valores de suministro muy semejantes, se eligió el más reducido, cuyos tamaños y gastos medios transferidos se muestran en el mismo cuadro 2.

Hasta este punto del análisis, a excepción de las dos primeras alternativas en que se utilizaron 12 periodos (meses) por año, en las demás se dividió el año en tres periodos de cuatro meses; con ello se procuró manejar el algoritmo a toda su capacidad y que abarcara, en la medida de lo posible, los periodos secos y húmedos contenidos en el registro de los escurrimientos históricos de la región que comprende los aprovechamientos para el abastecimiento de agua a la ciudad de Monterrey.

2. Capacidades de las conducciones (m^3/s)

Número del arco	Capacidad tubo libre	Tubo para percentil 90	Tubo para percentil 50	Tubo para percentil 75	Gasto medio por el arco P_{75}
1	28	19	5	11	6.7
2	12	6	2	4	2.5
3	29	21	7	15	9.1
4	12	6	3	5	3.5
5					
6	29	25	10	19	12.7
7	6	3	1	2	0.9
8	12	7	2	5	2.5
9					
10	30	29	16	26	20.8
11	16	16	15	8	1.1
12	6	6	2	8	0.5
13	2	2	2	2	2.0
14	28	28	20	26	17.5
15	17	17	10	2	0.7
16	7	7	5	1	0.4
17	19	20	13	2	0.8
18	2	2	2	1	0.2
19	1	1	1	1	0.0
20	3	3	3	1	0.7

Cotas de tasación para los vasos

Una vez conocido el tamaño de presas y tuberías, se definieron las políticas de operación del sistema. En estudios anteriores, para determinar la operación de un vaso se consideró cada presa de manera independiente. Sin embargo, debido a que el análisis del abastecimiento de agua potable a Monterrey contempla un sistema de vasos que abarcan varias cuencas diferentes, ese criterio no es aplicable en forma directa, por lo cual se atacó el problema considerando a las presas como parte de un sistema hidráulico único. Para ello, fue necesario determinar los niveles máximo y mínimo en los que deberían encontrarse los almacenamientos al final de los periodos preestablecidos.

Como primera alternativa, se intentó estudiar los almacenamientos finales de los vasos en cada uno de los tres periodos en que se dividió el año; sin embargo, los resultados no indicaron con claridad ninguna tendencia a mantener ciertos niveles mínimos o máximos.

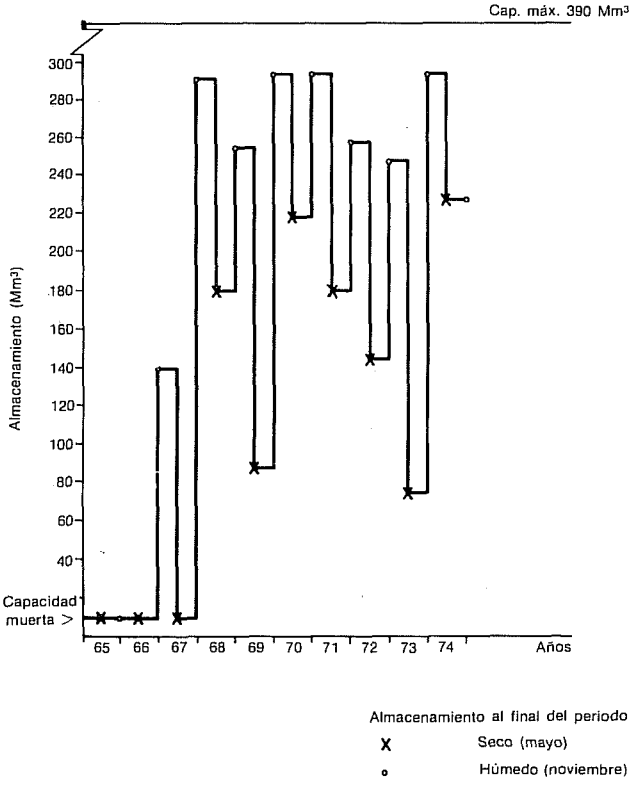
Con objeto de definir nuevos periodos, se analizó la curva de distribución de los escurrimientos durante el año y se observó la existencia de dos

etapas bien diferenciadas: la seca, que abarca de diciembre a mayo y la húmeda, de junio a noviembre. Posteriormente, se simuló el comportamiento de la red con el modelo de asignación de recursos, contemplando dos periodos por año. Los resultados revelaron la tendencia del modelo a mantener a los vasos en ciertos niveles de almacenamiento al final de cada uno.

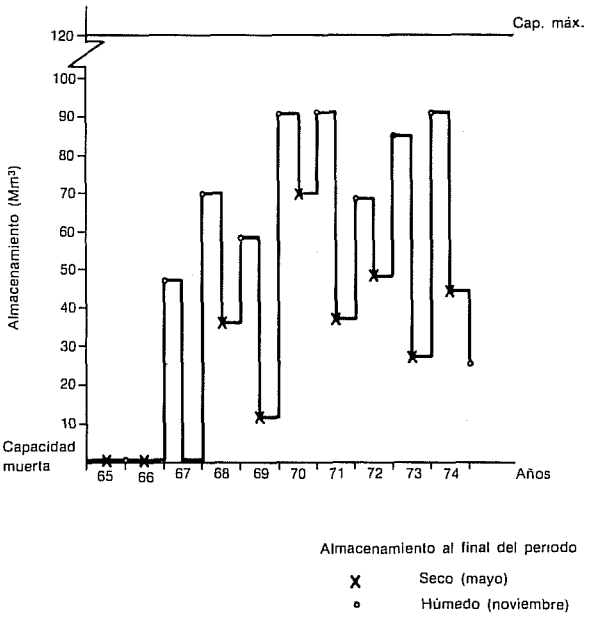
En el caso del periodo seco, el nivel de almacenamiento fue bajo, lo que facilitó captar las avenidas que pudieran presentarse en el húmedo; mientras que al final de éste, el nivel de almacenamiento se mantuvo en tal magnitud que permitió satisfacer la demanda en la época crítica, de diciembre a mayo. En las ilustraciones 4 a 9 se muestran los niveles de almacenamiento simulados y las cotas de tasación definidas para cada uno de los vasos de almacenamiento del sistema.

Por último, se realizó un análisis para determinar la confiabilidad de los resultados, que consistió en utilizar las capacidades de los diferentes elementos del sistema (vasos y conductos) determinados anteriormente y simular, por mes, el funcionamiento del acueducto, mediante dos planteamientos alternos:

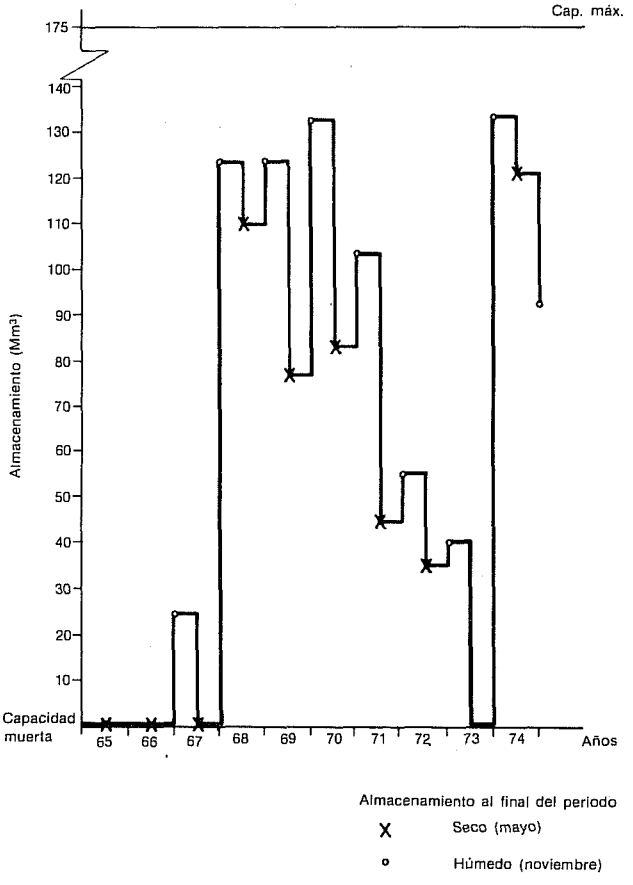
4. Cerro prieto



5. Libertad



6. Terrero



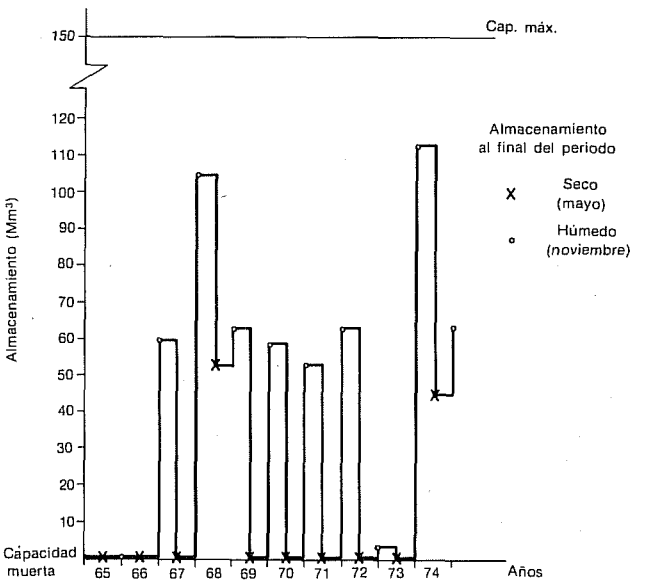
- En el primero, se emplearon políticas de operación individuales para cada fuente, con lo que se obtuvo un gasto de 20.1 m^3/s para el suministro a Monterrey.
- En el segundo, se aplicaron las mismas políticas de operación, pero tratando de mantener las cotas de tasación en los vasos al final de cada periodo. Los resultados indicaron que así es posible suministrar a esa ciudad un gasto de 20.4 m^3/s.

Conclusiones

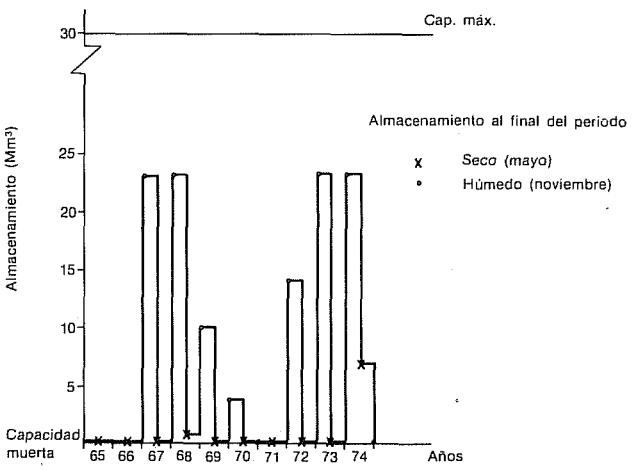
Conforme al análisis e interpretación de los resultados, se llegó a las siguientes conclusiones:

- El orden en que se deben construir las presas de almacenamiento en el tiempo son: Terrero, Raíces, Tunal y Libertad.
- La tubería de la red que constituye el proyecto de abastecimiento deberá tener las siguientes capacidades por tramo: Cerro Prieto-río Potosí, 11 m^3/s; río Potosí-río Pilón, 15 m^3/s; río Pilón-río Ramos, 19 m^3/s; río Ramos-río San Juan, 26 m^3/s y río San Juan-Cd. Monterrey, 26 m^3/s.
- El sistema de abastecimiento de agua potable a la ciudad de Monterrey constituido por seis vasos: Cerro Prieto, Libertad, Terrero, Raíces, Tunal y La Boca (véase ilustración 10), así como por seis acuíferos: Mina, Topo-Chico, Buenos Aires, San Roque, San Mateo, Rayones (véase ilustración 11) y el sistema Santiago, cuya disponibilidad natural total equivale a 25.3 m^3/s, con una capacidad de almacenamiento total de 1 615 Mm^3, satisface los requerimientos estimados de la ciudad para el año 2005, con un gasto de 20.4 m^3/s, y una demanda de 30 m^3/s, si se construye con las dimensiones que aquí se definen. En la ilustración 12 se muestra la participación de las diferentes fuentes en el abastecimiento, mientras que en el cuadro 3 se señalan los gastos por arco y por año de la simulación (véase cuadro 4).
- La operación calculada de las presas muestra los niveles en los que deben mantenerse para disminuir las probabilidades de deficiencia y/o derrames.

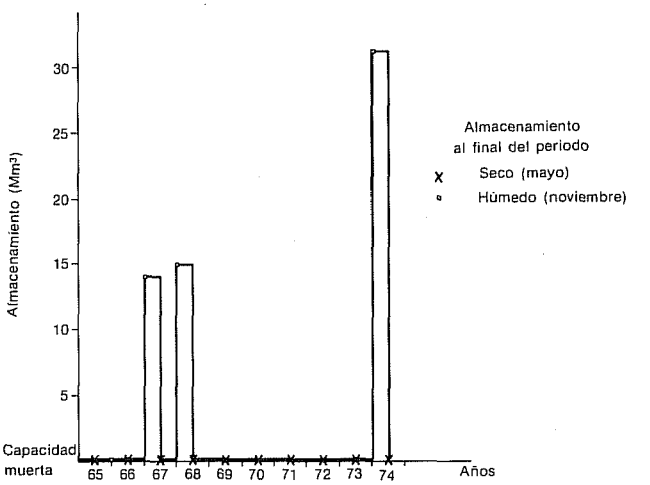
8. Raíces



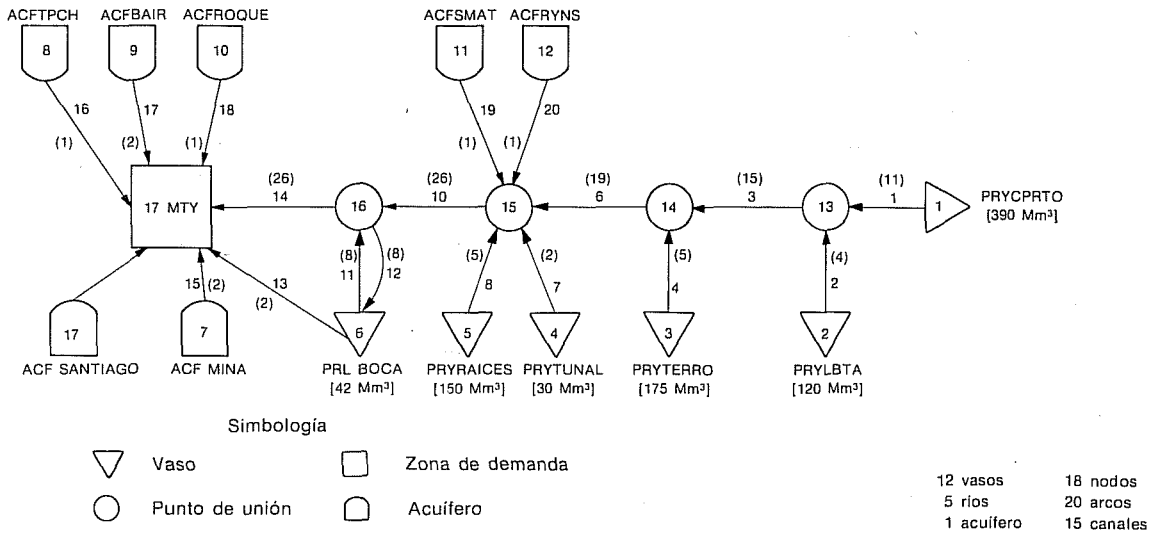
7. Tunal



9. La Boca



10. Tamaño de presas y conducciones



Vaso	Cota mínima al final del periodo húmedo	Cota máxima al final del periodo seco
Cerro Prieto	270 Mm^3	90 Mm^3
Libertad	90 Mm^3	35 Mm^3
Terrero	125 Mm^3	75 Mm^3
Raíces	60 Mm^3	15 Mm^3
Tunal	22 Mm^3	5 Mm^3

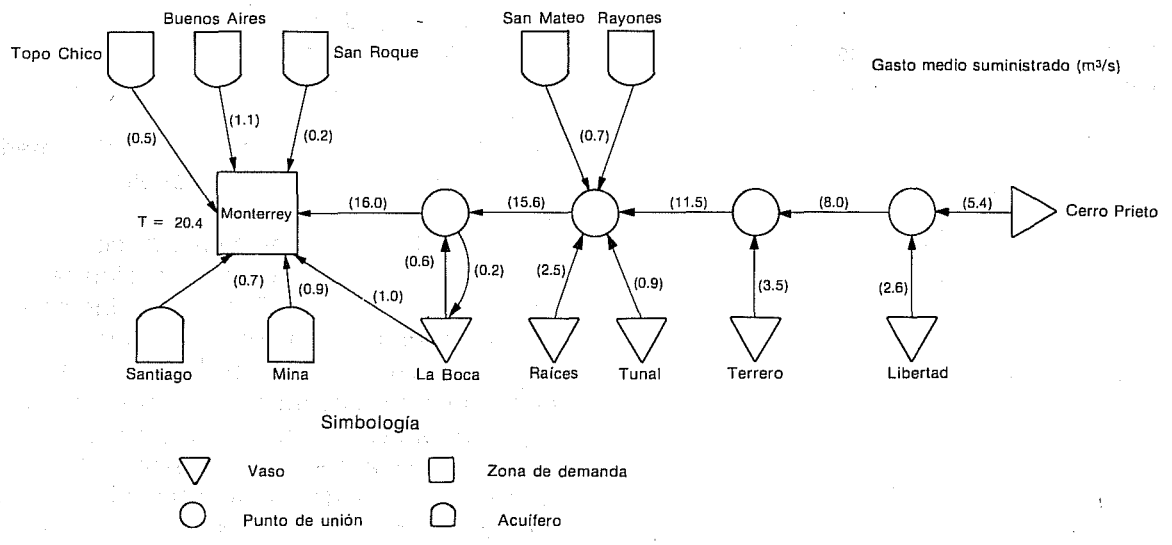
En virtud de que la presa La Boca se utiliza para completar las posibles deficiencias en la demanda, no es factible obtener las cotas para el vaso de esta presa.

Recomendaciones

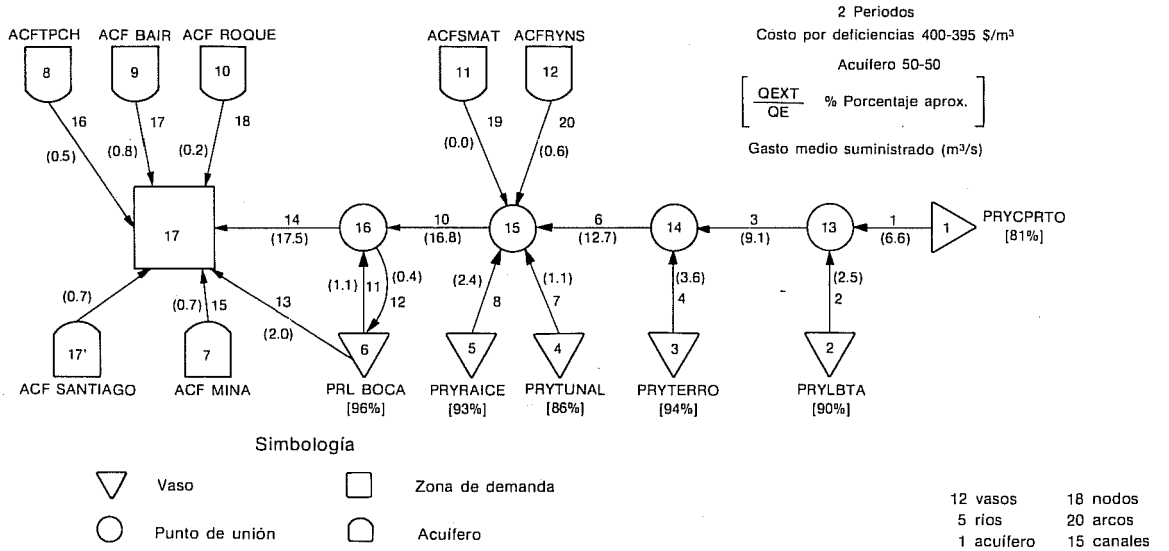
De este estudio se derivaron las siguientes recomendaciones:

- Restituir el agua de los ríos Ramos, Pilón y Blanquillo, empleada para abastecer a Monterrey, por agua residual, mediante una planta de tratamiento de aguas negras y la conducción correspondiente. Dicha restitución deberá llevarse a cabo simultáneamente con las fases de expansión del acueducto sur, de tal manera que no se afecte a los agricultores.

11. Simulación mensual



12. Participación de diversas fuentes



- Definir las capacidades en etapas, número de tubos y sus dimensiones a medida que se incorporen nuevas fuentes al acueducto.
- A partir de las cotas de tasación apuntadas en la tercera conclusión, precisar las políticas de operación para cada uno de los vasos, de acuerdo con las etapas de expansión, resaltando que dichas políticas deberán orientarse al funcionamiento integral de un sistema hidráulico.
- Prever la magnitud de los derechos de vía necesarios para alojar el acueducto e instalaciones correspondientes, una vez finalizadas todas las fases constructivas.

Anexo 1

Descripción matemática del modelo de asignación.

Las proposiciones matemáticas del problema de asignación pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\text{minimice} \quad \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} q_{ij} C_{ij} \tag{1}$$

sujeto a:

Balance en puntos nodos:

$$\sum_{i=1}^{N} (q_{ij} - q'_{ji}) = 0, \quad j = 1, \ldots, N \tag{2}$$

pérdidas en los arcos:

$$q'_{ij} - (1 - f_{ij}) q_{ij} = 0, \qquad \forall\, i \text{ y } j \tag{3}$$

y los límites en los arcos deben cumplirse

$$L_{ij} \leqslant q_{ij} \leqslant U_{ij} \tag{4}$$

donde:

q_{ij} Flujo que entra al arco del nodo *i* al *j*.
q'_{ij} Flujo que sale del arco del nodo *i* al *j*.
L_{ij} Límite inferior del flujo por el arco que va del nodo *i* al *j*.
U_{ij} Límite superior del flujo por el arco que va del nodo *i* al *j*.
N Número de nodos en la red.
C_{ij} Costo por transportar el gasto q_{ij}.
f_{ij} Factor de pérdidas.

La estructura matemática se describe mediante cuatro conjuntos de restricciones y una función objetivo. Un conjunto de las ecuaciones de restricción obliga al cumplimiento de continuidad en todos los nodos de la red, a excepción de un nodo fuente y un sumidero. El segundo indica el volumen de agua perdido por las conducciones a través de cada uno de los arcos, los otros dos describen los límites superior e inferior del flujo en los arcos de la red. Por lo anterior, existe una ecuación para cada nodo y tres para cada arco.

Las ecuaciones de continuidad para cada nodo pueden expresarse de la siguiente manera:

3. Gastos medios anuales y totales de suministro a Monterrey (m^3/s)

		Años																					
		Secos											Húmedos										
Tramo	Arco	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	Q_1	66	67	68	69	70	71	72	73	74	Q_2	Q	$Q_{máx}$
Presa Cerro Prieto-río Potosí	1	8	4.5	5	5.5	5.5	5.5	3	5	1	2	4.5	6.5	8	10.5	11	11	10.5	11	6.8	4.5	8.9	6.6	11
Presa Libertad-acueducto	2	3	1	1	4	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	0.5	1.6	2.5	4	3.5	4	3.5	3.5	3	4	4	3.6	2.5	4
Río Pablillo-río Pilón	3	11	5	6	9.5	6.5	7	4.5	6.5	2	3	6.1	9	12	14	15	14.5	14	14	10.5	8.5	12.4	9.1	15
Presa Terrero-acueducto	4	5	1.5	3	5	5	3	2	2	1	1	2.9	3.5	4.5	5	4	4.5	5	5	4.5	5	4.6	3.7	5
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Río Pilón-río Ramos	6	16	6.5	9	14.5	11.5	10	6.5	8.5	3	3.5	8.9	12.5	16.5	19	19	19	19	19	15	13.5	16.9	12.7	19
Presa Tunal-acueducto	7	1	0.5	1	1.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	2	2	1.5	2	1	1	2	1	2	1.6	1.1	2
Presa Raices-acueducto	8	3.5	0.5	0.5	4.5	1.5	1	1	1.5	1	0.5	1.6	2.5	3.5	3.5	4.5	3.5	2	3.5	3.5	5	3.5	2.5	5
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Río Ramos-río San Juan	10	21	9	11.5	21	14	12	8	10.5	5	5.5	11.8	17.5	22	24.5	26	24	23	25	20.5	20.5	22.6	16.9	26
Presa La Boca-acueducto	11	0.5	0	4	1.5	0	0	0	0	0	0	0.6	1	4	1.5	0	0.5	1.5	1	4	1.5	1.7	1.1	8
Acueducto presa-La Boca	12	0.5	0.5	0.5	0	1	0.5	0.5	0.5	1	1	0.6	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.3	0.5	1
Presa La Boca-Monterrey	13	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Río San Juan-Monterrey	14	21	8	15	22.5	13.5	12	7.5	10	4	4.5	11.8	17.5	26	26	25.5	24.5	24	25.5	24	22	23.9	17.5	26
Acuífero Mina-Monterrey	15	0	0	0	0	0.5	1	1	1	1	2	0.7	1	0	0.5	1	1	1	0.5	1.5	2	0.9	0.8	2
Acuífero Topo Chico-Monterrey	16	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.3	0.5	1	0	0	1	1	0	0.5	1	0.6	0.5	1
Acuífero Buenos Aires-Monterrey	17	0	0	0	0	1	0	1	1	1	2	0.6	1	0	1	1	1	1	1	1	2	1	0.8	2
Sistema Santiago-Monterrey	17	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.5	0.5	0	0.5	0.8	0.5	0.8	0.6	0.7	1
Acuífero San Roque-Monterrey	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.1	0.5	0	0	0	0.5	0.5	0	0.5	0	0.2	0.1	1
Acuífero San Mateo-acueducto	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0
Acuífero Rayones-acueducto	20	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.6	1	0	0.5	0.5	1	0.5	1	0.5	0.5	0.6	0.6	1
Total fuentes actuales		2.8	2.8	2.8	3.3	4.8	4.3	5.3	5.3	5.3	8.3	4.5	5.8	3.8	4	4.5	5.5	6	4.3	6	7.8	5.3	4.9	
Total acueducto		21	8	15	22.5	13.5	12	7.5	10	4	4.5	11.8	17.5	26	26	25.5	24.5	24	25.5	24	22	23.9	17.5	
Total Monterrey		23.8	10.8	17.8	25.8	18.3	16.3	12.8	15.3	9.3	12.8	16.3	23.3	29.8	30	30	30	30	29.8	30	29.8	29.2	22.4	
Defic. total		6.2	19.2	12.2	4.2	11.7	13.7	17.2	14.7	20.7	17.2	13.7	6.7	0.2	0	0	0	0	0.2	0	0.2	0.8	7.6	
Defic. en %		20.7	64	40.7	14	39	45.7	57.3	49	69	57.3	45.7	22.3	0.7	0	0	0	0	0.7	0	0.7	2.7	25.3	

Q — gasto en m^3/s
Q_0 — gasto medio en todo el periodo (m^3/s)
Q_1 — gasto promedio años secos (1956-1965) (m^3/s)
Q_2 — gasto promedio años húmedos (1966-1979) (m^3/s)

1. Nodo de entrada

$$\sum_{k=1}^{L}\sum_{j=1}^{N}\alpha_{jk} = x_i \qquad (5)$$

2. Nodo de demanda

$$\sum_{k=1}^{L}\sum_{j=1}^{N}D_{jk} = X_d \qquad (6)$$

3. Nodo de importación

$$\sum_{k=1}^{L}\sum_{j=1}^{n}\delta_j I_k = X_m \qquad (7)$$

4. Nodo de derrame

$$\sum_{k=1}^{L}\sum_{j=1}^{n}\Theta_j P_{jk} = X_s \qquad (8)$$

5. Nodo de almacenamiento final

$$\sum_{j=1}^{nr} S_i, L + \frac{1}{At} = X_f \qquad (9)$$

6. Nodos de vasos

$$\sum_{i=1}^{N}Q'_{ijk} - \sum_{i=1}^{N}Q_{jik} - \Theta_j P_{jk} - S_{j,k} + \frac{1}{At} + \frac{S_{jk}}{At} + \delta_j I_k + \alpha_{jk} - D_{jk} - \beta_{ij} = 0 \qquad (10)$$

$$j = 1, 2, \ldots, n_r \qquad k = 1, 2, \ldots, L$$

7. Nodos de unión

$$\sum_{i=1}^{N}Q'_{ijk} - \sum_{i=1}^{N}Q_{ijk} - \Theta_j P_{jk} + \delta_j I_k - D_{jk} + \alpha_{jk} = 0$$

$$j = n_r + 1,\ n_r + 2, \ldots, n \qquad k = 1, 2, \ldots, L \qquad (11)$$

donde:

Q'_{ijk} Flujo al vaso o nodo de unión del nodo *j* al *i* en el periodo *k*.
Q_{ijk} Flujo del vaso o nodo de unión *i* al *j* en el periodo *k*.
P_{jk} Nivel de derrame del vaso *j* en el periodo *k*.
S_{jk} Almacenamiento en el vaso *j* al inicio del periodo *k*.

4. Gastos medios anuales y totales de suministro a Monterrey (m^3/s) (simulación mensual)

	Años																				
	Secos											Húmedos									
Fuente	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	Q_1	66	67	68	69	70	71	72	73	74	Q_2	Q
Presa Raíces	2.8	1.0	0.8	4.5	0.8	1.3	1.0	0.8	1.2	0.8	1.5	2.2	2.4	5.0	2.6	2.5	3.3	4.4	4.7	4.1	3.5	2.5
Presa Tunal	*0.8*	*0.4*	*0.4*	*1.2*	*0.4*	*0.7*	*0.5*	*0.4*	*0.6*	*0.4*	*0.6*	*1.1*	*1.1*	*1.2*	*1.1*	*1.2*	*0.9*	*1.6*	*1.4*	*1.1*	*1.2*	*0.9*
Presa Terrero	3.4	1.7	1.1	5.0	3.6	3.1	2.0	1.6	1.4	0.9	2.4	2.2	3.6	5.0	4.1	4.6	3.5	5.0	3.8	5.0	4.2	3.4
Presa Libertad	2.7	0.7	0.7	4.0	0.9	1.6	1.0	1.0	1.0	0.5	1.4	3.2	2.8	4.0	3.4	4.0	3.6	4.0	4.0	3.6	3.7	2.6
Presa Cerro Prieto	6.1	3.9	2.3	8.6	2.4	6.7	4.5	2.4	4.3	1.1	4.2	5.1	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	6.5	6.5
Acuífero Rayones y Sn. Mateo	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7
Presa La Boca	1.4	1.1	1.2	2.3	1.6	1.3	1.4	0.9	1.1	0.7	1.3	1.3	1.6	2.0	1.7	1.7	1.8	2.3	2.2	1.9	1.8	1.6
Acuífero Buenos Aires	5.4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1
Acuífero Topo Chico	1.9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Acuífero San Roque	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Acuífero Mina	3.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.9
Sistema Santiago	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Total Monterrey	30.0	12.6	10.5	29.5	13.6	18.6	14.4	11.0	13.6	8.3	16.2	19.0	22.3	28.2	23.7	24.9	23.9	28.2	26.9	26.6	24.6	21.6

Q — gastos en m^3/s
Q_2— *gasto medio en todo el periodo* (m^3/s)
Q_1 — gasto promedio años secos (1956-1965) (m^3/s)
Q_2 — gasto promedio años húmedos (1966-1974) (m^3/s)

I_k Importación de agua en el periodo *k*.
D_{jk} Demanda en el nodo *j* en el periodo *k*.
jk Flujo de entrada al nodo *j*.
jk Pérdidas debidas a evaporación en el vaso *j* en el periodo *k*.
j 1, si *j* es un nodo de derrame.
0, si *j* no es nodo de derrame.
j 1, si *j* es un nodo de importación.
0, si *j* no es un nodo de importación.
f_{ij} Fracción del flujo perdido a través del arco del nodo *i* al *j*.
imk Número de los nodos.
N_r Número de vasos.
N Número de vasos más números de nodos de unión.
k Periodo de tiempo.
L Número de periodos.

Todas las ecuaciones pueden reducirse en la forma común

$$\sum_{i=1}^{N} q'_{ij} - \sum_{i=1}^{N} q_{ij} = 0 \qquad j = 1, \ldots, n \qquad (12)$$

El flujo de entrada al nodo *j*, de salida del nodo *i* debe cumplir la restricción

$$q_{ij} \geq L_{ij} \qquad \text{y} \qquad q_{ij} \geq U_{ij} \qquad (13)$$

En esta red, los arcos de los canales, la demanda, el almacenamiento y derrame son los tipos de arco que tienen asociados costos. Además, en los canales se maneja el costo asociado a la energía requerida para los bombeos del agua en relación con su traslado a la zona de demanda.

Referencias

Bazaraa, M. S. y Jarvis, J. J., *Linear Programming and Network Flows*, John Wiley and Sons, EUA, 1977.

CPNH, Abastecimiento de agua potable a la ciudad de Monterrey. Estudio del Acueducto Sur, Informe interno, 1983.

CPNH, Implantación de programas y análisis de aprovechamientos hidráulicos y aplicaciones al PLHINO, Informe interno, 1982.

Texas Water Development Board, "Water Supply Allocation Model", Texas, EUA, 1975.