

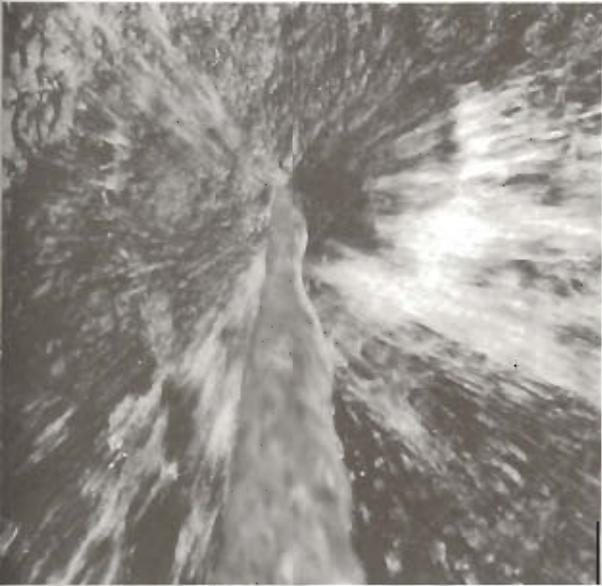
COLABORACIÓN

Ingeniero Juan Manuel Lesser Illades
Ingeniero David González Posadas
Ingeniero Luis Ernesto Lesser Carrillo

Grupo de ingenieros especialistas en geohidrología y contaminación de acuíferos, que actualmente integran la empresa Lesser y asociados, S.A. de C.V.

Juan Manuel Lesser Illades originario de la ciudad de México, obtuvo el título de ingeniero geólogo en 1971 en la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Cursó estudios de posgrado y de especialización en geohidrología en Estados Unidos, Austria y Rusia. Tiene una amplia trayectoria en docencia y actualmente coordina los cursos internacionales de contaminación de acuíferos, impartidos por la División de Educación Continua de la facultad de Ingeniería de la UNAM. Ha participado como investigador principal en 107 proyectos gubernamentales.

En el año de 1997 recibió reconocimiento por ser el primer mexicano certificado por la asociación de Investigadores e Ingenieros en Aguas Subterráneas Association of Ground Water Scientists and Engineers, división de la NGWA (National Ground Water Association).



Balance de agua subterránea del acuífero de la ciudad de México, 1997

En la elaboración de este proyecto, participó la ingeniera Julia Ribera Jaramillo, jefa de la oficina de marco físico urbano.

► El estudio del acuífero

La principal fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad de México corresponde a la extracción de agua del acuífero por medio de pozos profundos. Ante la importancia de esta fuente, es necesario conocer la evolución de los niveles del agua subterránea ya que estos presentan una constante fluctuación, que depende del grado y forma de explotación a que se encuentre sujeto.

Con el fin de observar de forma controlada estos niveles se lleva un registro de su variación desde el año de 1984 y se actualiza año con año.

Adicionalmente, se calcula la evolución que sufre el almacenamiento y los efectos colaterales causados por la extracción de agua subterránea. Para cumplir con los objetivos y solventar esta necesidad, la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Gobierno del Distrito Federal, a través de su Subdirección de Programación, realizó la actualización en 1997 de los niveles estáticos de los pozos tanto en el Distrito Federal como en los valles de Chalco y Texcoco, a través de la Compañía Lesser y Asociados, S.A. de C.V., con el fin de dar seguimiento a la evolución de los niveles del agua subterránea.

Cabe aclarar que estas mediciones constituyen la base para el balance geohidrológico, para efectuar correlaciones con los asentamientos del terreno y para actualizar el modelo matemático del acuífero.

► Objetivos

Los objetivos planteados son:

- 1 Medir los niveles estáticos de los pozos piloto, tanto en el Distrito Federal como en los valles de Chalco y Texcoco.



- 2 Actualizar los hidrógrafos de los pozos piloto y analizar su comportamiento.
- 3 Verificar y dar seguimiento a la evolución de los niveles estáticos.
- 4 Elaborar e interpretar configuraciones de la profundidad, elevación y evolución del nivel estático.
- 5 Cuantificar el agua subterránea en la zona de estudio, actualizada a 1997.

► Mediciones piezométricas

La Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica ha venido realizando en forma sistemática la medición de niveles estáticos del acuífero a través de pozos desde el año de 1984. Inicialmente la red piezométrica abarcaba alrededor de 200 pozos, los que en número se fueron incrementando con el paso de los años, principalmente debido a que se fue aumentando el área que inicialmente correspondió al Distrito Federal y posteriormente abarcó a los valles de Chalco y Texcoco. Actualmente la red piezométrica consta de 470 puntos de medición.

► División del sistema del acuífero

Se dividió el acuífero en subsistemas que corresponde a Subsistema Acuífero ciudad de México, Subsistema Acuífero Texcoco y Subsistema Acuífero Chalco (figura 1).

La división entre los subsistemas de la ciudad de México y Texcoco se trazó tomando en cuenta las redes de flujo, de donde se marcó un parteaguas subterráneo que va de la Sierra de Santa Catarina con dirección al noroeste, pasando por el Aeropuerto Internacional y, posteriormente, siguiendo rumbo al norte por la elevación topográfica de la Sierra de Guadalupe. La división de los acuíferos entre la ciudad de México y el valle de Chalco, se realizó debido a que el flujo

subterráneo presenta independencia, de acuerdo con las equipotenciales y direcciones de flujo del agua subterránea que permitió el trazo de un parteaguas subterráneo a la altura de San Pedro Tláhuac.

► Profundidad a nivel estático

Se trazó una configuración que muestra la distribución de la profundidad al nivel del agua a partir de la superficie del terreno.

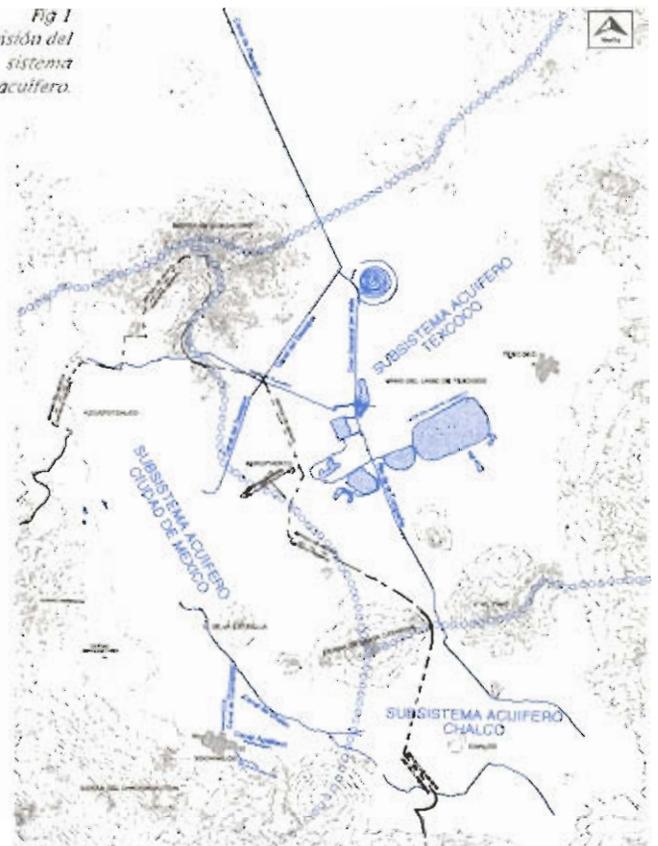
Para el subsistema acuífero de la zona metropolitana, se encuentran valores de profundidad que en la configuración están representados por curvas que van desde 30 hasta 180 metros. Los valores más someros se encuentran en dos áreas: zona centro-norte y Xochimilco.

La zona centro-norte está limitada por la Sierra de Guadalupe al norte, el Aeropuerto Internacional al oriente, la Avenida Insurgentes y el Viaducto Miguel Alemán al oeste y sur. En esta porción el agua se encuentra a profundidades que varían entre 30 y 40 metros. Se hace notar que en esta área la extracción de agua del subsuelo es reducida, debido a que los asentamientos del terreno causados principalmente en la década de los sesentas obligó a parar pozos y por lo tanto a disminuir la extracción.

La segunda zona con niveles estáticos relativamente someros, entre 30 y 40 metros de profundidad, corresponde al área de Xochimilco. En esta porción, además de corresponder a una de las zonas bajas del antiguo lago de Xochimilco, se caracteriza porque en ella prácticamente no existen pozos de extracción de agua subterránea.

Alrededor del Cerro de la Estrella, el nivel estático se encuentra a profundidades de entre 60 y 70 metros, lo cual está en relación con la elevación del terreno. Conforme se

Fig 1
División del
sistema
acuífero.



aleja del Cerro de La Estrella, el nivel estático fluctúa entre 50 y 60 metros, siendo la característica de una amplia área que abarca a los pozos Tláhuac-Neza, a los pozos Xotepingo y a parte de los pozos ubicados al norte del Cerro de La Estrella.

La profundidad al nivel estático se encuentra influenciada por la topografía del terreno, los niveles se profundizan conforme se eleva la superficie topográfica, ocasionando que los pozos ubicados hacia la Sierra de Las Cruces al poniente de la ciudad y hacia la Sierra del Chichinautzin al sur, presenten valores que varían de 60 metros al pie de la sierra y que se incrementan para llegar a alcanzar más de 100 metros. En la porción correspondiente al subsistema acuífero del lago de Texcoco, el nivel estático se encuentra a profundidades que fluctúan entre 30 y 80 metros. En el plano de la figura 2 la configuración incluye curvas en la parte central del lago de Texcoco con el valor de 30 metros de profundidad y hacia la periferia del lago la curva 40 metros. Hacia las elevaciones topográficas se encuentra la curva 50 metros

y en la porción al sureste de Texcoco se marcan también las curvas 60 y 80 metros de profundidad. En la porción sureste del área de trabajo correspondiente al subsistema acuífero de Chalco, la profundidad al nivel estático varía entre 20 y 130 metros. Hacia la parte plana del valle fue factible marcar la curva 30 metros, aunque la mayor parte del área presenta profundidades entre 30 y 40 metros. Hacia las elevaciones topográficas el nivel estático se profundiza para alcanzar entre 50 y 60 metros. Hacia la delegación de Milpa Alta existen varios pozos los que, debido a su posición topográfica alta, llegan a presentar profundidades de entre 100 y 130 metros.

► **Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo**

Se obtuvo la elevación de la superficie piezométrica respecto al nivel del mar para los datos obtenidos en el año de 1997. Estos valores se vaciaron sobre el plano de la figura 3 y a partir de ellos se trazó la configuración de la elevación del nivel estático respecto al nivel del mar. En dicha configuración se observa que, para el subsistema acuífero de la ciudad de México, se marcaron las curvas que presentan una distribución concéntrica. Incluye los valores más altos hacia la porción externa de la ciudad México donde se trazaron las curvas 2195 y 2200 msnm. Hacia la parte baja de la ciudad se forman dos conos piezométricos. Uno de ellos en la porción norte correspondiente a Azcapotzalco, el cual está delimitado por las curvas 2180 y 2190 msnm.

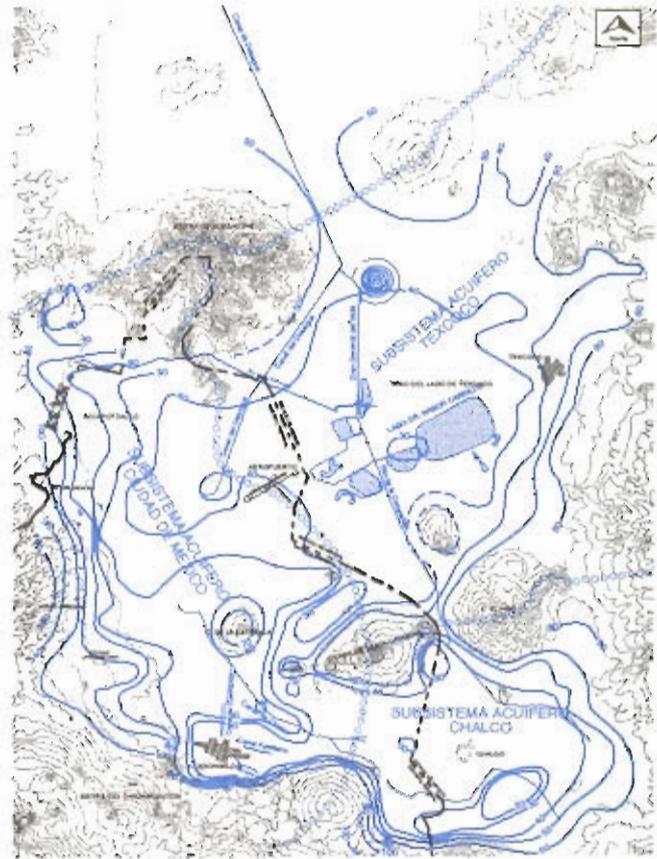


Fig 2
Profundidad
al nivel
estático
(1997)
(curvas en
metros)

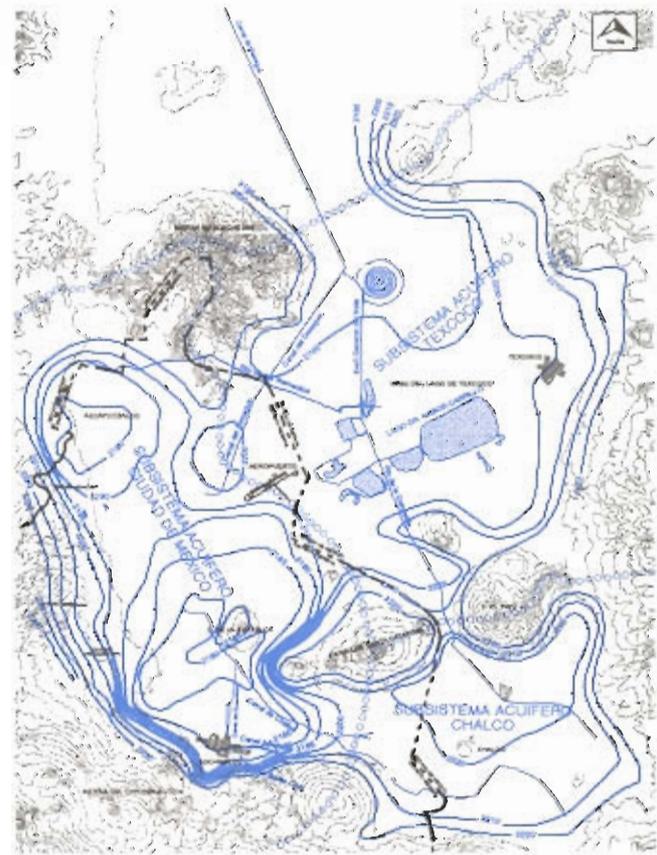


Fig 3
Elevación
del nivel
estático
(1997)
(curvas en
msnm)

El segundo cono piezométrico abarca prácticamente toda la porción central y sur de la ciudad de México, estando delimitado por las curvas 2185 y 2190 msnm. Hacia la porción central de este cono piezométrico se trazó la curva 2180 msnm.

El flujo subterráneo se marcó a partir de la configuración de la elevación del nivel estático, el cual, se establece en la ciudad de México de la periferia hacia el centro, concentrándose hacia los dos conos piezométricos mencionados en párrafos anteriores y que corresponden, el primero al área de Azcapotzalco y el segundo a la porción central-sur donde se ubican los pozos de Tlalpan y Xotepingo.

En relación con el subsistema acuífero de Texcoco, el esquema de flujo muestra elevaciones de la superficie piezométrica que van de 2195 msnm en la parte central-norte, alrededor del caracol de Texcoco y que se incrementan hacia las estribaciones del valle para alcanzar hasta 2240 msnm al oriente y suroriente de Texcoco.

A partir de las elevaciones anteriores se trazó la dirección del flujo subterráneo, el cual va de las porciones topográficamente altas correspondientes a la Sierra de Guadalupe, la Sierra Nevada, la Sierra de El Pino, el Cerro del Chimalhuacán y parte de la Sierra de Santa Catarina, hacia el centro del exlago de Texcoco.

Dentro del exlago de Texcoco existe una tendencia de flujo hacia el norte, con un gradiente sumamente bajo pero observándose que aparentemente el agua fluye y podría existir descarga y conexión hacia el norte, pasando entre las Sierras de Guadalupe y Chiconautla.

El subsistema acuífero de Chalco se encuentra limitado por elevaciones topográficas. Al pie de dichas elevaciones se trazaron las curvas equipotenciales 2210 y 2220 msnm, las cuales corresponden a los valores más altos registrados hacia este subsistema. En la parte baja y plana del valle, fue factible delimitar la curva 2200 msnm en la parte central-norte.

Con las equipotenciales mencionadas se trazó la dirección del flujo subterráneo, la cual es perpendicular a las curvas. Se observa un flujo radial a partir de las elevaciones topográficas y que circula hacia el centro del valle de Chalco.

► Evolución del nivel estático

La explotación a que se encuentra sujeto el acuífero a través de varios cientos de pozos es irregular. En ciertas zonas como Tlalpan y Xotepingo, así como al pie de la Sierra del Chichinautzin, se concentran extracciones fuertes de agua subterránea.

Otras áreas de fuerte extracción corresponden a la batería de pozos de Xotepingo y Mixquic-Santa Catarina. En contraste, existen áreas donde la cantidad de extracción de agua del subsuelo es menor, como dentro de la zona central de Xochimilco, al centro del valle de Chalco, en la zona federal del lago de Texcoco, así como en la porción del centro histórico de la ciudad de México. La irregular distribución de la extracción de agua subterránea, aunada a que el subsuelo presenta variaciones en cuanto a su transmisibilidad, provoca que existan fluctuaciones en el nivel estático.

Los valores de la evolución del nivel estático registrados en los pozos de la red piezométrica de 1985 a 1997, fueron vaciados sobre un plano, en el que se trazó una configuración de las curvas de igual evolución (figura 4). En el subsistema acuífero de la ciudad de México, se observa que en la porción norte correspondiente a Azcapotzalco se presentan evoluciones positivas de entre 0 y 2 metros, lo cual aparentemente ha sido el resultado de la suspensión del bombeo de la exrefinería de Azcapotzalco.

Un efecto similar con recuperaciones de la superficie piezométrica para el periodo estudiado de 1995 a 1997, se registró en los alrededores de la Ciudad Universitaria en el sur-oeste de la ciudad, donde se llegaron a registrar entre 0 y 2 metros de recuperación del nivel estático. En el resto de la ciudad la evolución sufrida por el acuífero fluctúa alrededor de menos un metro al año.

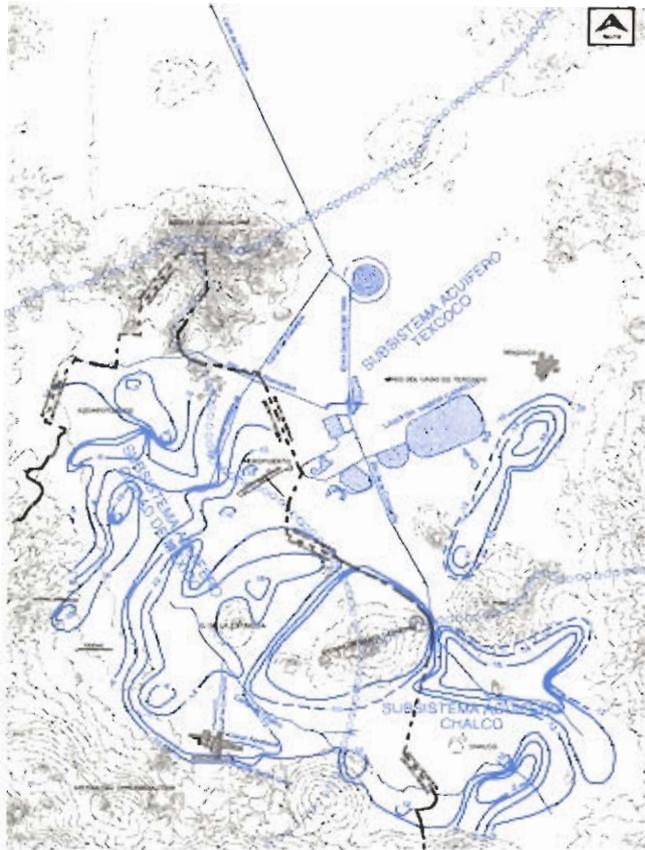


Fig 4

Hacia el área de Texcoco, las principales evoluciones se registran en las zonas donde existe explotación de agua para riego, correspondiente a Texcoco y Chicoloapan de Juárez, donde los abatimientos fueron de entre -2 y -3 metros para los dos años estudiados.

El resto del área presenta poca información y en general valores alrededor de -2 metros de evolución al año. Por lo que respecta al acuífero del valle de Chalco, es donde se presentan mayores abatimientos los cuales llegan a alcanzar hasta 4 metros.

Aproximadamente el 40% de la superficie del valle se encuentra con abatimientos mayores de -3 metros y comprende al poblado de Chalco. Hacia las orillas del valle y en el área de pozos de Míxquic-Santa Catarina, las fluctuaciones varían entre -1 y -2 metros.

► **Hidrógrafos de pozos**

Los hidrógrafos muestran la variación del nivel estático respecto al tiempo. En ellos se observa que en general en el subsistema acuífero ciudad de México tiene un abatimiento gradual en la mayor parte de los pozos, un ejemplo de ellos se presenta en la figura 5. Destacan algunas áreas donde en los últimos años se han detectado recuperaciones del nivel piezométrico, principalmente el área de Azcapotzalco. Los pozos de esta zona presentan una recuperación en los niveles a partir del año 1991. Como ejemplo en la figura 6 el pozo 269 de la empresa Coca Cola, ubicado en la zona de Azcapotzalco.

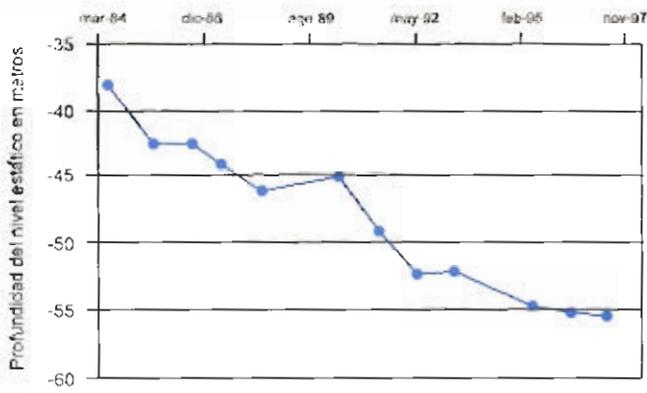


Fig 5
Variación de la profundidad al nivel estático en el pozo 2161, estudios Churubusco.

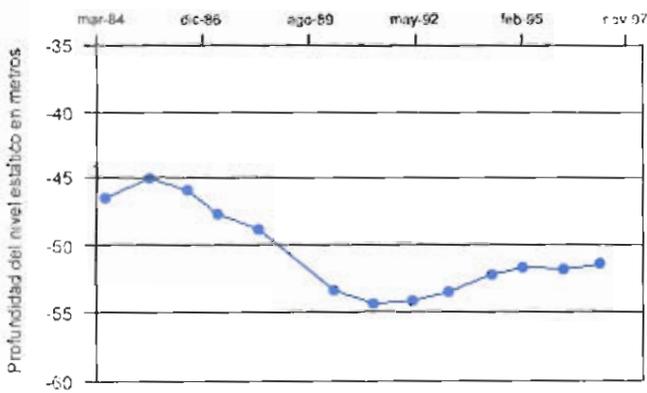


Fig 6
Variación de la profundidad al nivel estático en el pozo 269, Azcapotzalco.

► **Balance de agua subterránea**

De acuerdo a la división del sistema acuífero comentada anteriormente, se calcularon las entradas y salidas de agua subterránea para cada subsistema, así como el diferencial entre entradas y salidas, al que corresponde al cambio de almacenamiento. En los siguientes párrafos se describen los datos del cálculo y sus resultados.

Para el balance del acuífero se estableció la ecuación general de balance de agua subterránea, en donde se establece que las entradas de agua al sistema son iguales a las salidas menos el cambio de almacenamiento.

Las entradas de agua al sistema corresponden al aporte por flujo subterráneo o entrada subterránea, proveniente de las infiltraciones que se generan en las zonas de recarga del acuífero. Hacia la parte plana de los valles, la infiltración vertical de agua de lluvia es inapreciable debido, por una parte, a la existencia de la mancha urbana y por otra parte, la presencia de arcillas lacustres que corresponden al sedimento de los antiguos lagos de México, por lo que la infiltración en el valle no se consideró para el balance; sin embargo, las arcillas lacustres forman un acuitardo que se encuentra saturado y que presenta un drenado vertical que alimenta al acuífero.

Cada uno de los subsistemas acuíferos estudiados se comporta como independiente. Entre la ciudad de México y el exlago de Texcoco existe conexión y podría existir flujo de agua de un subsistema a otro; sin embargo, la red de flujo marca un gradiente muy bajo, por lo que, en caso de existir paso de agua de un sitio a otro, este debe de ser muy reducido. Efecto similar se observa en el área entre Xochimilco y Chalco, así como entre una posible conexión del valle de Texcoco hacia el norte, entre las Sierras de Guadalupe y Chiconautla.

La salida más importante de agua en todos y cada uno de los subsistemas acuíferos, corresponde a la extracción por bombeo.

El diferencial entre las entradas de agua a cada subsistema acuífero y la salida se refleja en la fluctuación del nivel estático. Esta variación corresponde al cambio de almacenamiento.

► Cálculo de entradas por flujo subterráneo

El flujo subterráneo se calculó utilizando la Ley de Darcy, en donde se establece que el caudal que pasa a través de una sección de terreno es igual a la transmisibilidad del material por la longitud del área considerada y por el gradiente hidráulico.

Se trazaron celdas utilizadas en el cálculo de la entrada de agua subterránea, correspondiendo cada una de ellas al área delimitada entre dos curvas equipotenciales y dos líneas de corriente. De esta manera, se marcaron 15 celdas para el subsistema acuífero del valle de México las cuales se identificaron con la letra A y un número en orden progresivo del A-1 al A-15. Su localización se muestra en la figura 3. Para el valle de Chalco las celdas se marcaron con la letra B, del B-1 al B-8 y para el valle de Texcoco las celdas utilizadas se identificaron con la letra C, habiéndose diferenciado 11 celdas que van de la C-1 a la C-11.

La transmisibilidad es la capacidad de un medio para permitir el flujo de agua bajo un gradiente unitario. Este dato se obtiene de pruebas de bombeo y se caracteriza por presentar valores del orden de $0.011 \text{ m}^2/\text{seg}$ para materiales piroclásticos y basálticos como por ejemplo los observados en las Sierras del Chichinautzin y Santa Catarina. Hacia los materiales aluviales de los valles, las transmisibilidades obtenidas a través de pruebas de bombeo varían alrededor de 0.005 a $0.008 \text{ m}^2/\text{seg}$.

Los valores de transmisibilidad correspondientes a las celdas letra A de la ciudad de México, varían de 0.003 a $0.011 \text{ m}^2/\text{seg}$, como se observa en las tablas 1 a 3. En las celdas B correspondientes a Chalco, la transmisibilidad va de 0.004 a $0.011 \text{ m}^2/\text{seg}$ y, por lo que respecta al lago de Texcoco las celdas marcadas con la letra C presentan una transmisibilidad que va de 0.005 a $0.010 \text{ m}^2/\text{seg}$.

El ancho de cada una de las celdas utilizadas para el cálculo del flujo subterráneo se obtuvo directamente del plano de elevación del nivel estático, donde se delimitan las celdas. Los anchos de cada una de ellas se incluyen en las tablas 1 a 3.

El gradiente hidráulico es igual a la diferencia entre las equipotenciales que limitan a cada celda divididas entre

CELDA	LARGO km (l)	ANCHO km (b)	GRADIENTE HIDRAULICO (i) X E-03	TRANSMISIBILIDAD m2/seg (T)	CAUDAL m3/seg Q=Tbi	VOLUMEN E+06 m3/año
A-1	0.933	12.700	5.4	0.005	0.343	10.812
A-2	0.600	9.50	8.3	0.006	0.473	14.917
A-3	1.000	6.400	10.0	0.006	0.384	12.108
A-4	0.875	7.800	12.5	0.006	0.585	18.445
A-5	0.500	7.800	20.0	0.006	0.936	29.512
A-6	0.600	1.500	16.6	0.003	0.075	2.355
A-7	0.400	6.666	25.0	0.011	1.833	57.799
A-8	0.366	6.600	27.3	0.011	1.982	62.492
A-9	1.500	1.500	3.3	0.007	0.035	1.093
A-10	0.550	6.800	18.2	.008	0.990	31.217
A-11	0.666	4.700	15	.008	0.564	17.783
A-12	1.133	4.400	8.8	.008	0.31	9.767
A-13	1.200	4.600	4.2	0.006	0.116	3.655
A-14	1.800	5.300	2.8	0.005	0.074	2.340
A-15	1.000	4.300	5.0	0.005	0.108	3.389
SUMA						277.683

Tabla 1

CELDA	LARGO km (l)	ANCHO km (b)	GRADIENTE HIDRAULICO (i) X E-03	TRANSMISIBILIDAD m2/seg (T)	CAUDAL m3/seg Q=Tbi	VOLUMEN E+06 m3/año
B-1	0.800	4.700	12.5	0.011	0.646	20.376
B-2	2.166	1.466	4.6	0.01	0.067	2.126
B-3	0.900	9.000	11.11	0.011	1.100	34.680
B-4	1.333	6.000	7.50	0.009	0.405	12.770
B-5	1.200	9.000	8.33	0.004	0.300	9.455
B-6	0.700	12.75	14.3	0.004	0.729	22.995
B-7	0.500	6.300	20.0	0.005	0.630	19.864
B-8	0.600	6.500	16.67	0.008	0.867	27.331
SUMA						149.597

Tabla 2

CELDA	LARGO km (l)	ANCHO km (b)	GRADIENTE HIDRAULICO (i) X E-03	TRANSMISIBILIDAD m2/seg (T)	CAUDAL m3/seg Q=Tbi	VOLUMEN E+06 m3/año
C-1	1.000	5.000	5.00	0.006	0.150	4.730
C-2	0.866	6.800	5.77	0.006	0.235	7.423
C-3	1.000	5.700	10.0	0.008	0.456	14.378
C-4	0.533	8.800	18.76	0.005	0.825	26.026
C-5	0.600	8.600	16.66	0.005	0.716	22.587
C-6	0.600	6.00	16.66	0.005	0.500	15.759
C-7	0.900	7.700	11.1	0.005	0.427	13.474
C-8	1.000	8.700	10.00	0.007	0.809	19.202
C-9	0.800	7.700	12.5	0.007	0.674	21.243
C-10	1.500	4.300	6.67	0.007	0.201	6.330
C-11	1.200	5.800	8.33	0.010	0.483	15.233
SUMA						166.385

Tabla 3

la longitud de la misma. Los valores de cada celda obtenidos del plano de elevación del nivel estático para el subsistema acuífero de la ciudad de México variaron de 0.0028 a 0.0273. Para el valle de Texcoco el gradiente varía de 0.005 a 0.0018 y para el valle de Chalco el gradiente calculado va de 0.0046 a 0.020 (tablas 1 a 3).

El cálculo del agua que fluye en una celda se calcula por medio de la Ley de Darcy, que indica que el caudal de agua que pasa a través de ella es igual a la transmisibilidad por el largo de la celda y multiplicado por el gradiente hidráulico. Los datos del presente cálculo se incluyen en las tablas 1 a 3. La suma del flujo que pasa a través de las celdas marcadas con la letra A y que corresponden a la entrada por flujo subterráneo hacia la ciudad de México, asciende a 277.68 Mm³/año; para el valle de Chalco el volumen de flujo calculado en las 8 celdas fue de 149.59, mientras que en el valle de Texcoco éste ascendió a 166.38 Mm³/año para las 11 celdas marcadas.

La principal salida de agua de los acuíferos corresponde a la extracción por bombeo. Se utilizó el valor registrado por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica para el año de 1995. A dichos volúmenes se le sumó la extracción realizada por organismos operadores, así como datos de la Comisión Nacional del Agua y de pozos de riego. Se obtuvo un volumen de extracción anual (que corresponde a la salida de agua subterránea del sistema), de 358 Mm³/año para la ciudad de México, lo que equivale a 11.35 m³/seg. En el valle de Chalco la extracción o salida de agua subterránea fue de 178.8 Mm³/año equivalente a 5.67 m³/seg y; por lo que respecta al valle de Texcoco la extracción fue de 254 Mm³/año que equivale a 8.06 m³/seg.

El diferencial entre la entrada de agua subterránea a los subsistemas acuíferos y su salida se refleja en el cambio en el nivel estático.

Se calculó el cambio de almacenamiento de la evolución sufrida en el periodo 1995-1997, la cual se obtuvo multiplicando el área entre las curvas, por el abatimiento registrado. La suma de ellas (áreas multiplicadas por evolución), dio un volumen de la variación del nivel estático de 1995 a 1997. Dicho volumen se dividió entre 2 para obtener el volumen anual.

Por otra parte, del volumen obtenido una parte corresponde a los sólidos que constituyen el medio y otra parte al agua que contenían los intersticios. El porcentaje que corresponde a intersticios y que equivale a la cantidad de agua, se denomina coeficiente de almacenamiento, el cual es deducido a partir de pruebas de bombeo, así como de los tipos de rocas y de las condiciones en que se encuentra el acuífero. Los acuíferos semiconfinados, debido a que se encuentran sujetos a presión, presentan coeficientes de almacenamiento bajos del orden de 0.007, mientras que en acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento es del orden de 0.03.

La variación de almacenamiento se calculó multiplicando el volumen de la evolución del nivel estático por el coeficiente de almacenamiento, el cual resultó para la ciudad de México de -4.10 Mm³/año equivalente a -0.13 m³/seg; para el Valle de Chalco el cambio de almacenamiento fue negativo de -8.83 Mm³/año equivalentes a -0.280 m³/seg; para el valle de Texcoco el cambio de almacenamiento fue también negativo de -21.43 Mm³/año equivalente a -0.67 m³/seg.

La ecuación de balance volumétrico en el subsuelo indica que las entradas (entrada por flujo subterráneo y drenado vertical de las arcillas) son iguales a las salidas (extracción por bombeo) menos el cambio de almacenamiento. En la figura 6 se muestran los datos del balance; para cada uno de los subsistemas acuíferos en que se dividió la zona metropolitana. En ellos se observa que, para la ciudad de México (figura 7), la entrada por flujo subterráneo fue de 277.68 Mm³/año que equivale a 8.81 m³/seg. La extracción por bombeo fue de 358 Mm³/año que equivale a 11.35 m³/seg. El cambio de almacenamiento calculado fue de -4.10 Mm³/año que equivale a -0.13 m³/seg. De lo anterior se deduce un drenado vertical de la arcilla que asciende a 76.22 Mm³/año que equivale a 2.42 m³/seg.

Para el subsistema acuífero del valle de Texcoco las entradas por flujo subterráneo ascendieron a 166.38 Mm³/año que equivalen a 5.29 m³/seg. Las salidas por bombeo fueron de 254 Mm³/año que equivalen a 8.06 m³/seg. El cambio de almacenamiento calculado fue de -21.43 Mm³/año equivalentes a -0.67 m³/seg. De lo anterior se dedujo un aporte del acuífero por drenado vertical de 66.19 Mm³/año que equivalen a 2.10 m³/seg.

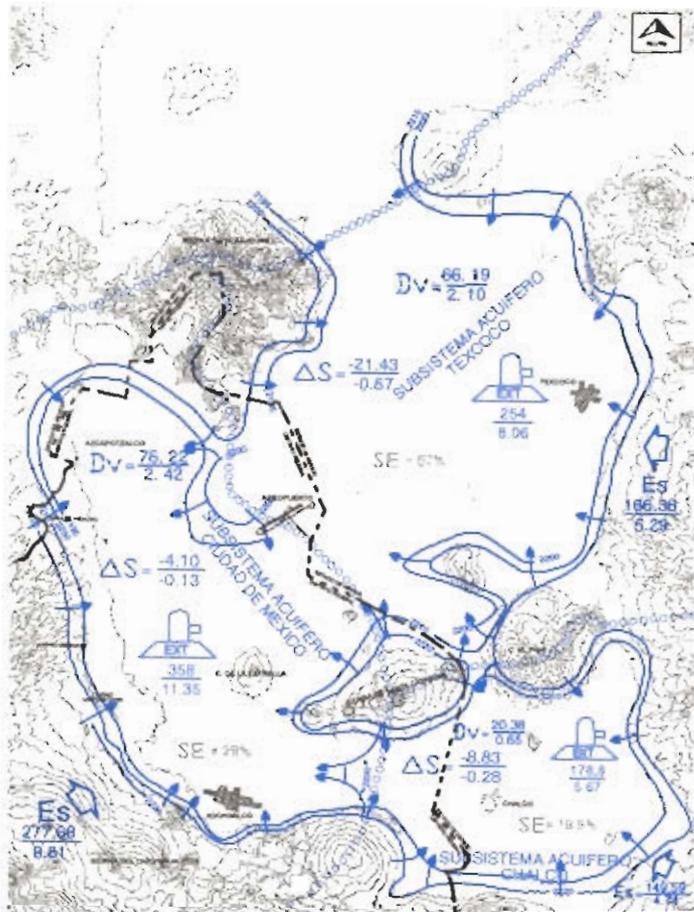


Fig 7
 Balance de
 agua
 subterránea
 ciudad de
 México,
 Chalco y
 Texcoco
 (1997)
 (Valores en
 $\frac{Mm^3/año}{m^3/seg}$).

Para el subsistema acuífero Chalco, la entrada por flujo subterráneo fue de $149.59 \text{ mm}^3/año$ que equivalen a $4.74 \text{ m}^3/seg$. La extracción o salida de agua por bombeo del acuífero fue de $178.8 \text{ Mm}^3/año$ que equivale a $5.67 \text{ m}^3/seg$. El cambio de almacenamiento que se obtuvo fue de $-8.83 \text{ Mm}^3/año$ que equivale a $-0.28 \text{ m}^3/seg$. Con lo anterior se obtuvo una entrada de agua al acuífero por drenado vertical de las arcillas que ascendió a $20.38 \text{ Mm}^3/año$ equivalente a $0.65 \text{ m}^3/seg$.

► Sobreexplotación del acuífero

Si consideramos que la sobreexplotación del acuífero corresponde al cambio de almacenamiento y al drenado de las arcillas, este volumen dividido entre la recarga por flujo subterráneo da el porcentaje de sobreexplotación a que se encuentra sujeto. De esta manera, se obtuvo que el subsistema acuífero de la ciudad de México se encuentra sobreexplotado en un 29%, el área de Texcoco se encuentra sobreexplotada en un 52%, mientras que el valle de Chalco en un 20%.

Al comparar los resultados del balance aquí realizado con otros llevados a cabo con anterioridad, se observan diferencias, que por lo general son debidas a que se consideran áreas diferentes, por ejemplo, en el presente trabajo la extracción de agua por bombeo para la ciudad de México, en el área de balance de la figura 6, incluye sólo algunos de los pozos del sur, ya que se consideran solamente los que se ubican dentro del área de balance.

► Conclusiones

El nivel estático en el valle de México se encuentra a profundidades que van de 30 a 180 metros para la zona plana y las elevaciones topográficas, respectivamente. Los valores menores se ubican hacia la parte central norte de la ciudad, así como alrededor de Xochimilco con 30 metros.

La mayor parte del vaso del exlago de Texcoco presenta profundidades al nivel estático entre 30 y 40 metros.

En el valle de Chalco el nivel estático varía en la mayor parte el valle entre 30 y 40 metros.

El esquema de flujo indica que, en la ciudad de México, la principal recarga proviene de la Sierra de Las Cruces al oeste y de la Sierra del Chichinautzin al sur. El agua fluye hacia dos conos piezométricos, el primero formado alrededor de Azcapotzalco y el segundo en el área de Tlalpan-Xotepingo.

En Texcoco el flujo subterráneo va de las elevaciones topográficas que circundan al valle hacia el centro y el norte del exlago de Texcoco para aparentemente salir al norte en forma subterránea entre la Sierra de Guadalupe y el Cerro de Chiconautla. En Chalco existe un flujo radial que va de las elevaciones topográficas hacia el centro del valle.

La evolución del nivel estático para el periodo 1995-1997 indica recuperaciones de 0 a 2 metros en el área de Azcapotzalco y en los alrededores de la Ciudad Universitaria.

En el resto de la ciudad la evolución fluctúa alrededor de -1 metro.

Hacia Texcoco existe un abatimiento de más de 3 metros en los alrededores de la ciudad de Texcoco y Chicoloapan.

En el valle de Chalco se registran abatimientos entre -1 y

-3 metros en la mitad poniente del valle y de entre -3 y -4 metros en la mitad oriente del valle.

El flujo subterráneo en la ciudad de México se calculó a partir de 15 celdas, de donde se obtuvo un volumen de flujo subterráneo de 277.683 Mm³/año (8.81 m³/seg).

Para el valle de Chalco la entrada por flujo subterráneo ascendió a 149.597 (4.74 m³/seg) y para el valle de Texcoco a 166.385 Mm³/año (5.29 m³/seg).

La extracción de agua subterránea fue de 11.35, 8.06 y 5.67 m³/seg, respectivamente para los subsistemas acuíferos de la ciudad de México, Texcoco y Chalco.

Por lo que se refiere al cambio de almacenamiento este fue negativo en los tres subsistemas con -0.13, -0.67 y -0.28 m³/seg. El drenado vertical de las arcillas fue de 2.42, 2.10 y 0.65 m³/seg, respectivamente para los tres subsistemas mencionados.

