

Aspectos geohidrológicos de la ciudad de México¹

Juan Manuel Lesser Illades
Felipe Sánchez Díaz
David González Posadas

Lesser y Asociados

Bajo el Valle de México se encuentra uno de los acuíferos más importantes del país, tanto por su magnitud como por el destino de sus aguas. De él se extraen alrededor de 500 millones de m³ anuales de agua mediante más de 100 pozos, tanto particulares como municipales. De acuerdo con su constitución y su funcionamiento hidrológico, el valle se divide en tres subsistemas acuíferos: el granular de la zona metropolitana de la ciudad, que incluye la Formación Tarango de las lomas del poniente y los materiales granulares permeables del valle; el localizado en el área de Xochimilco-Tláhuac-Chalco, que incluye un paquete acuífero de basaltos y aluviones en su parte central, y de basaltos y piroclásticos en las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin; y el correspondiente al Lago de Texcoco donde se cuenta con escasa información; aparentemente, el agua se encuentra estática o con movimiento muy reducido hacia el oeste. La cuantificación del acuífero actualizada hasta octubre de 1987 arrojó los datos siguientes (expresados en millones de metros cúbicos por año): la entrada por flujo subterráneo fue de 384, la infiltración de 83, la salida subterránea por flujo hacia Azcapotzalco ascendió a 24, la extracción por bombeo fue de 476 y el cambio de almacenamiento fue negativo y llegó hasta 33. El abatimiento anual de los niveles estáticos varía de 0 a 3 m y los mayores se localizan en Azcapotzalco y Tlalpan, donde se han formado conos piezométricos. La sobreexplotación de los acuíferos ha ocasionado la deshidratación y compactación de las arcillas que cubren el valle y el asentamiento o hundimiento del terreno, que en ocasiones alcanza hasta 50 centímetros anuales.

Geohidrología de la ciudad de México

La ciudad de México está emplazada dentro de una antigua cuenca lacustre cerrada en la que actualmente el drenaje se lleva a cabo en forma artificial hacia el norte. Los materiales que constituyen el subsuelo corresponden a depósitos de aluviones y sedimentos lacustres. Los primeros provienen de las laderas y fueron transportados hacia el centro de la zona por corrientes fluviales; los segundos a veces sobreyacen a los aluviones y se interdigitan con ellos a profundidad. En los flancos del valle y limitándolo, principalmente hacia el sur, oriente y poniente, se encuentran elevaciones topográficas constituidas por rocas volcánicas que en su mayor parte se comportan como permeables. Por su posición topográfica, estas rocas funcionan como zona de recarga natural del acuífero.

En las estribaciones de la Sierra de Las Cruces hay una serie de antiguos depósitos volcánicos y fluviales conocida como Formación Tarango, que constituye las lomas del poniente, donde primordialmente se encuentran arenas, conglomerados, cenizas volcánicas, piroclásticos y aglomerados de mediana a baja permeabilidad. Los materiales volcánicos, en especial las lavas y los piroclásticos de tipo basáltico, forman la parte sur de la zona, y hacia sus estribaciones están interdigitados con los materiales aluviales y lacustres.

Funcionamiento del acuífero

El acuífero de la ciudad de México se recarga básicamente a partir de la infiltración de agua de lluvia que se precipita sobre los flancos de las sierras del poniente, sur y oriente, de donde fluye hacia

el centro. En los flancos de la Sierra de Santa Catarina, ubicada en la porción central sur del Distrito Federal, también existe una recarga hacia el valle. De acuerdo con la constitución del subsuelo y con el funcionamiento geohidrológico, el valle se puede dividir en tres subsistemas acuíferos.

El primero de ubica en la zona metropolitana. En general, está constituido por materiales granulares de permeabilidad media y baja, y es recargado principalmente por la sierra del poniente y por los alrededores de la Delegación de Tlalpan. En el oriente, a la altura del aeropuerto, hay un flujo subterráneo que corre en dirección este-oeste, hacia el centro de la zona metropolitana. En la parte central de la ciudad existen un cono y un domo piezométrico; el primero corresponde a una salida de agua hacia el área de Azcapotzalco, provocada por la intensa explotación que se hace del acuífero en esa zona; el segundo, se localiza entre las delegaciones Venustiano Carranza y Cuauhtémoc, y aparentemente es el resultado de varios factores como el tipo y la distribución de materiales que constituyen el subsuelo; la extracción diferencial de agua subterránea; las fugas en las redes de distribución de agua potable y la presencia de grietas que facilitan el paso del agua al acuífero.

El segundo subsistema corresponde a la zona sur del Valle de México, entre Xochimilco, Tláhuac y Chalco. Es recargado por la infiltración del agua de lluvia en las estribaciones de las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin, mismas que lo limitan al norte y al sur. El flujo subterráneo se establece hacia el centro de los valles de Xochimilco y Chalco, donde antiguamente ocasionaba un nivel freático somero. En la actualidad, el agua se extrae a través de pozos y el nivel ha ido descendiendo.

El último subsistema acuífero corresponde al área del Lago de Texcoco, donde la información geohidrológica es escasa. Existe una recarga procedente de la sierra del oriente, la cual fluye en dirección al vaso del Lago de Texcoco. No hay datos sobre el movimiento del lago, pero aparentemente el agua se encuentra estática. Los materiales que constituyen esta zona son de baja permeabilidad; no existen extracciones considerables y el gradiente es casi nulo. En la porción occidental del vaso, a la altura del Aeropuerto Benito Juárez, se vuelve a detectar el flujo subterráneo en dirección este-oeste, se incrementa el gradiente y se pasa al primero de los subsistemas comentados.

Profundidad del nivel estático

Con los valores de profundidad del nivel estático

en 209 pozos particulares registrados en la zona metropolitana, así como en 249 del Departamento del Distrito Federal y en 242 pozos agrícolas de la porción oriental, se trazó una configuración de la profundidad del nivel estático para septiembre de 1987 (véase ilustración 1). En el poniente de la zona, la profundidad se incrementa hacia la sierra y se detectan valores entre 70 y 180 m. Hacia la parte central de la ciudad, el gradiente es muy suave; la profundidad varía de 20 m en el Aeropuerto Benito Juárez a 50 m en el flanco poniente de la ciudad.

En la porción suroccidental, entre Coyoacán y el Cerro de La Estrella, la profundidad del nivel del agua permanece muy similar, entre 40 y 50 metros.

En la zona sur, entre Xochimilco y Chalco, los niveles son someros; se encuentran profundidades de 10 m al suroeste de Chalco que llegan hasta 40 m en toda la parte plana y baja de la zona. Hacia las sierras, la profundidad al nivel del agua tiende a incrementarse y se registran valores de hasta 70 metros.

En los alrededores del Vaso de Texcoco, el nivel estático está muy cercano a la superficie, 5 m aproximados en la parte central del lago; se profundiza desde la parte central de dicho vaso hasta el aeropuerto, incluyendo ciudad Nezahualcóyotl, con profundidades someras de entre 5 y 20 metros.

Elevación del nivel estático

Actualmente, se cuenta con una red de observaciones piezométricas para la ciudad de México que incluye 320 aprovechamientos; las configuraciones de la elevación del nivel estático abarcan de 1983 a 1987. Con objeto de mostrar la distribución de la superficie piezométrica y comparar su evolución respecto al tiempo, se presentan las configuraciones de octubre de 1985 y marzo de 1987 (véanse ilustraciones 2 y 3).

Zona metropolitana

En la ciudad de México, el acuífero se recarga por el poniente, el sur y el oriente y presenta un flujo radial que, en forma general, tiende a circular hacia el valle. En la parte central norte de la ciudad destacan un cono y un domo piezométrico y en la porción suroccidental, un cono. El cono del norte se ha formado por la extracción de agua que se realiza en esa zona, donde existen numerosas industrias, entre otras, las instalaciones de la Refinería Azcapotzalco de Petróleos Mexicanos, que cuenta con varios pozos que extraen aproximadamente 300 l/s.

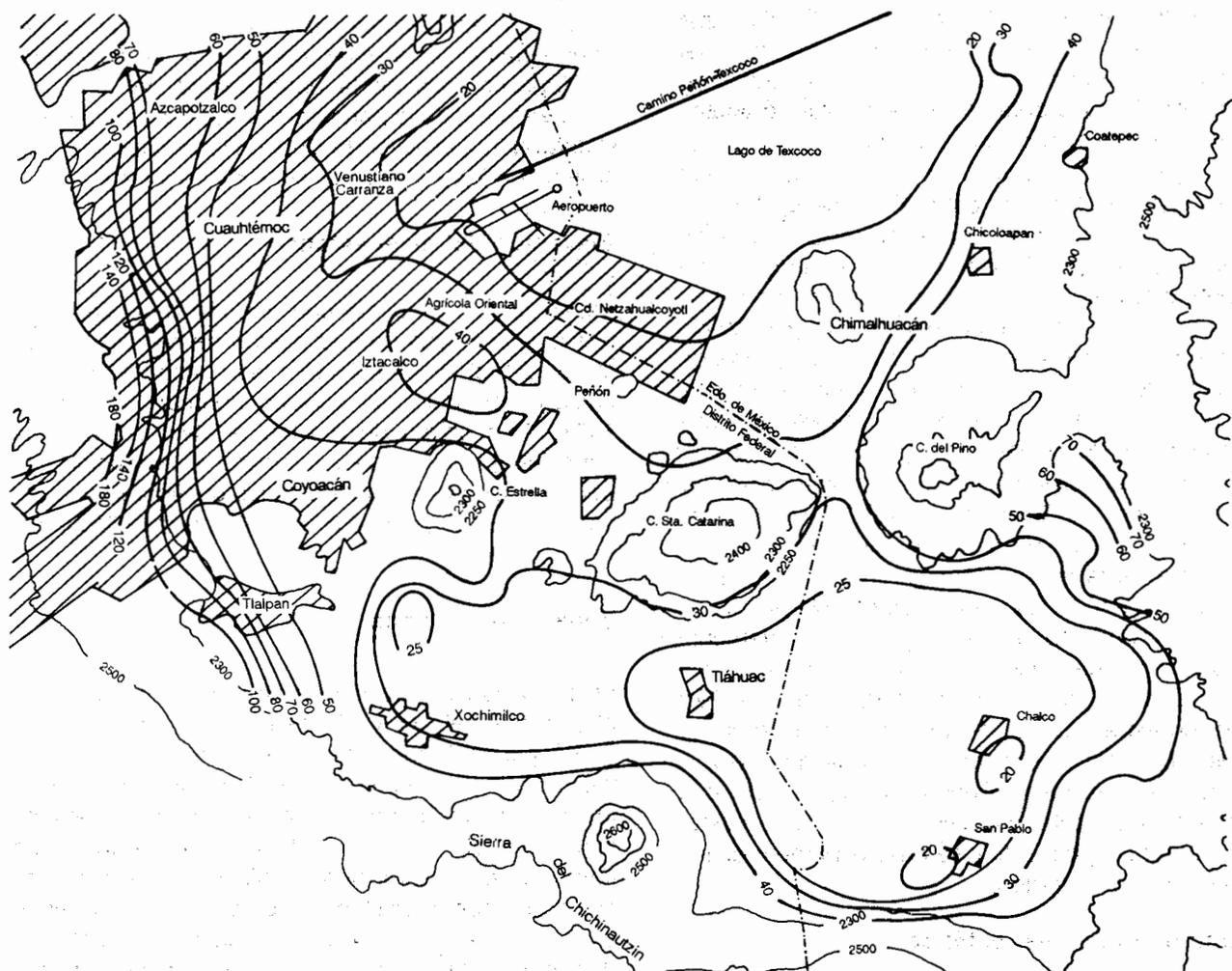
Los principales cambios en las configuraciones, de agosto de 1985 a marzo de 1987, se detectaron en el área de Tlalpan-Xotepingo, donde se observa la aparición de un nuevo cono piezométrico ocasionado por la extracción de agua subterránea en volúmenes mayores a la alimentación natural que recibe el acuífero. Esta área tiene las siguientes características geohidrológicas e hidrogeoquímicas (véase ilustración 4) que incluye la sección oeste-este a lo largo del cono y del domo piezométrico. En la parte A se muestran las características geohidrológicas del subsuelo, observándose que en la porción superior se encuentran arcillas lacustres de reducida permeabilidad, las que funcionan como un acuitardo. Debajo de las arcillas, hay materiales granulares de permeabilidad media, en los cuales se aloja el acuífero que es explotado por medio de pozos para el abastecimiento de la ciudad de

México. El espesor de las arcillas no se conoce con exactitud en toda su extensión, pero fluctúa entre 30 y 70 m. La posición de las superficies piezométricas del acuitardo y acuífero y el espesor de las arcillas pueden tener variaciones.

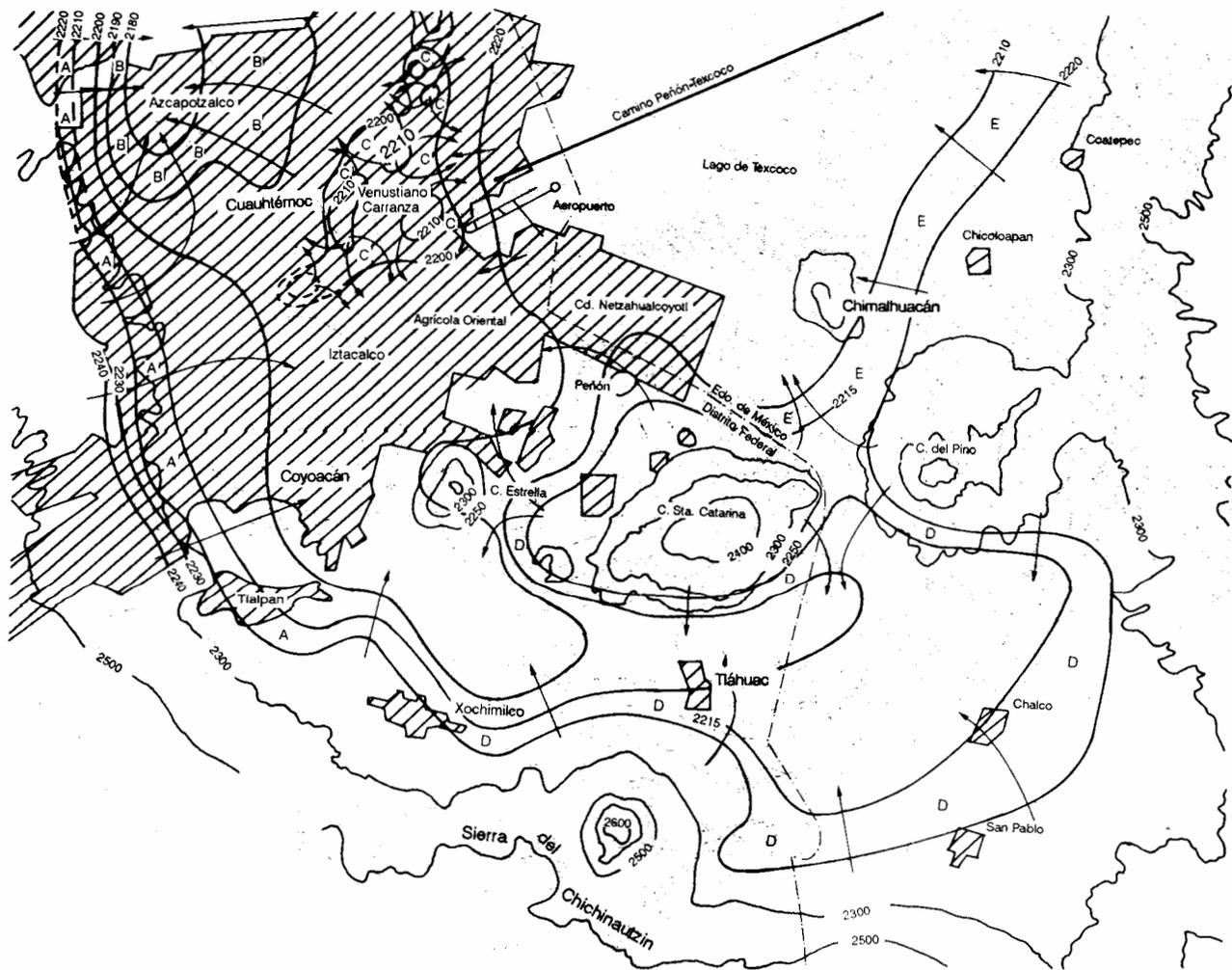
En la parte B, hacia la zona del cono piezométrico, el acuífero está sujeto a una fuerte extracción de agua subterránea; el abatimiento anual de la superficie piezométrica es de hasta 4 m y los asentamientos del terreno son moderados. Hacia la zona donde se ha detectado el domo piezométrico, la extracción es reducida; el abatimiento anual de la superficie piezométrica varía de 2 a 4 m; los asentamientos del terreno son muy reducidos. La transmisibilidad de las arcillas lacustres es de $1 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$, mientras que la de los materiales granulares es de $6 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$.

En la parte C, se observan otros aspectos sobre el funcionamiento geohidrológico y geoquímico de la

1. Profundidad al nivel estático en metros (1987)



2. Elevación del nivel estático en metros (octubre-1985)



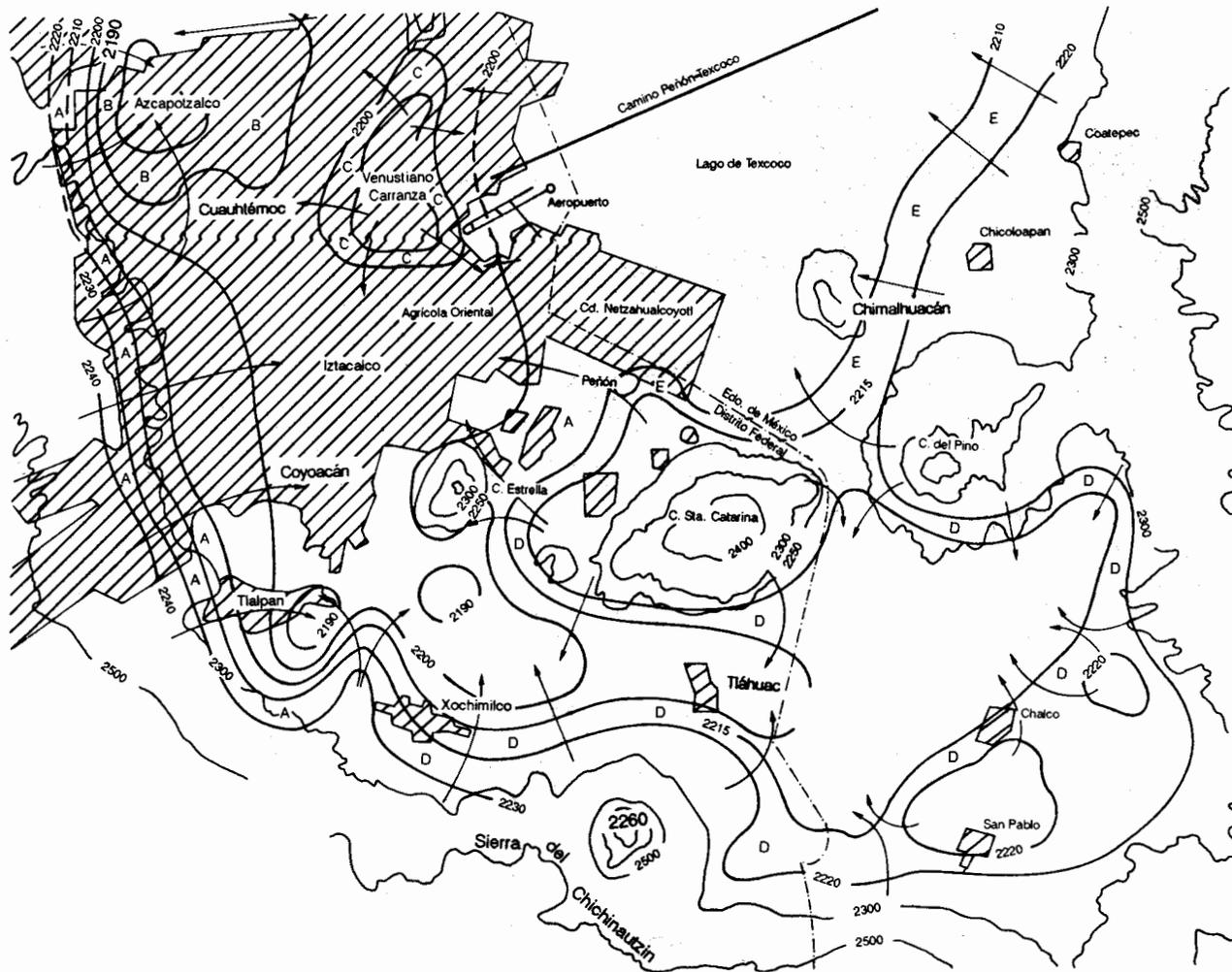
sección a lo largo del cono y el domo piezométrico. Se marcó el probable nivel freático de las arcillas (acuitardo) y la zona saturada dentro de ésta, que aportan agua al acuífero en forma de goteo.

Conforme a los datos sobre la química del agua, los análisis efectuados de 1955 a 1987 indican un incremento salino del poniente al oriente, o sea, hacia el cono piezométrico y, posteriormente, una disminución de la salinidad hacia la zona donde se ubica el domo piezométrico. La única posibilidad para lograr una disminución salina a lo largo de un flujo subterráneo es mediante la dilución o mezcla con otro tipo de agua. Si la zona central del área metropolitana es recargada por el flujo proveniente del poniente, debería presentar entre 300 y 400 ppm de sales, ya que el agua aumenta su contenido salino conforme circula en el subsuelo. Sin embargo, la presencia en el domo de concentraciones salinas

bajas, menores de 200 ppm, indica la existencia de una recarga o alimentación al acuífero con agua de muy buena calidad.

Por otra parte, el análisis de la variación respecto al tiempo de los diferentes parámetros químicos, indica que éstos se han mantenido constantes desde 1955 hasta 1987, con excepción de los cloruros, los cuales en la zona del domo, presentan un incremento paulatino. Aparentemente, la formación del domo piezométrico es el resultado de varios factores como el tipo y la distribución de materiales que constituyen el subsuelo; la extracción diferencial de agua subterránea; las fugas de las redes de distribución de agua potable y la presencia de grietas que facilitan el paso del agua al acuífero. La posible existencia de material con permeabilidad menor en el área del domo y mayor hacia los flancos, podría ser una causa de la distribución de la actual superficie

3. Elevación del nivel estático en metros (septiembre-1987)



piezométrica.

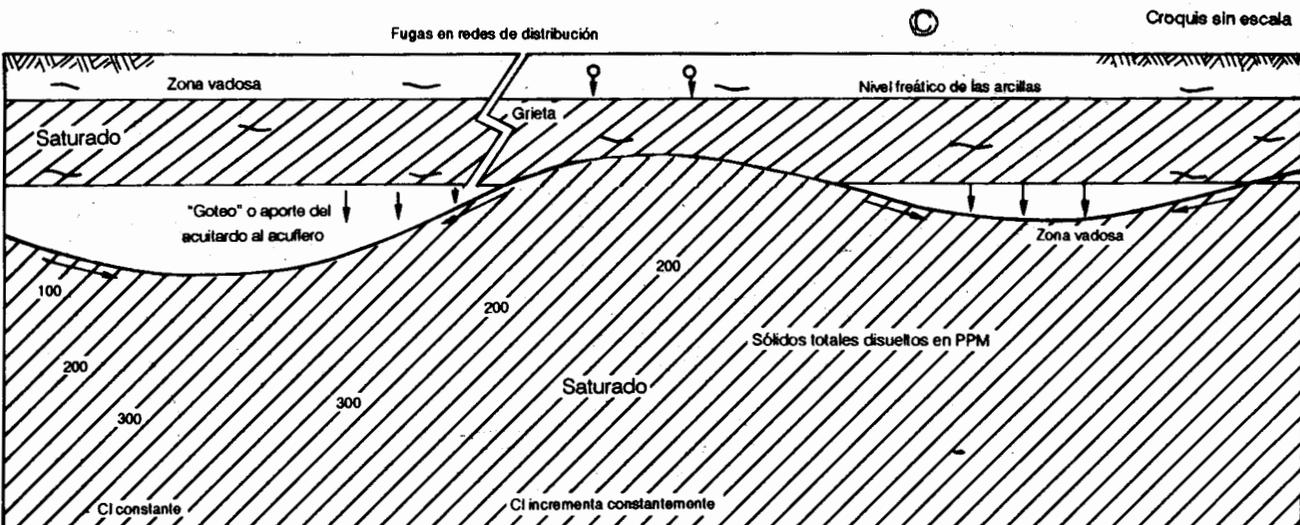
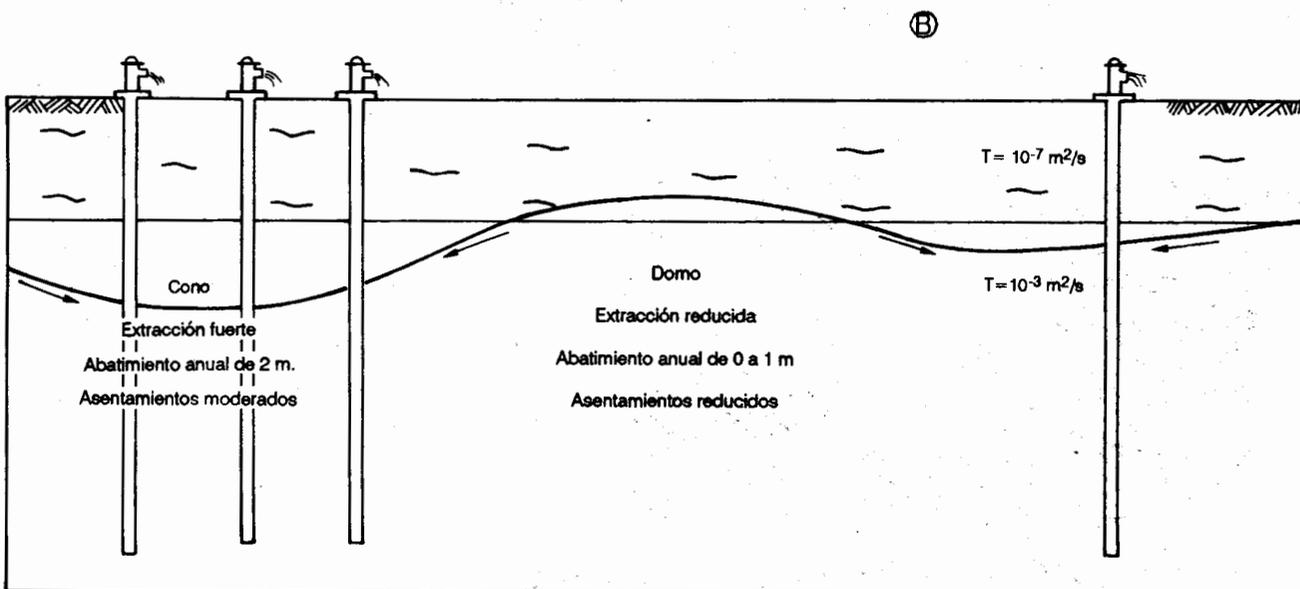
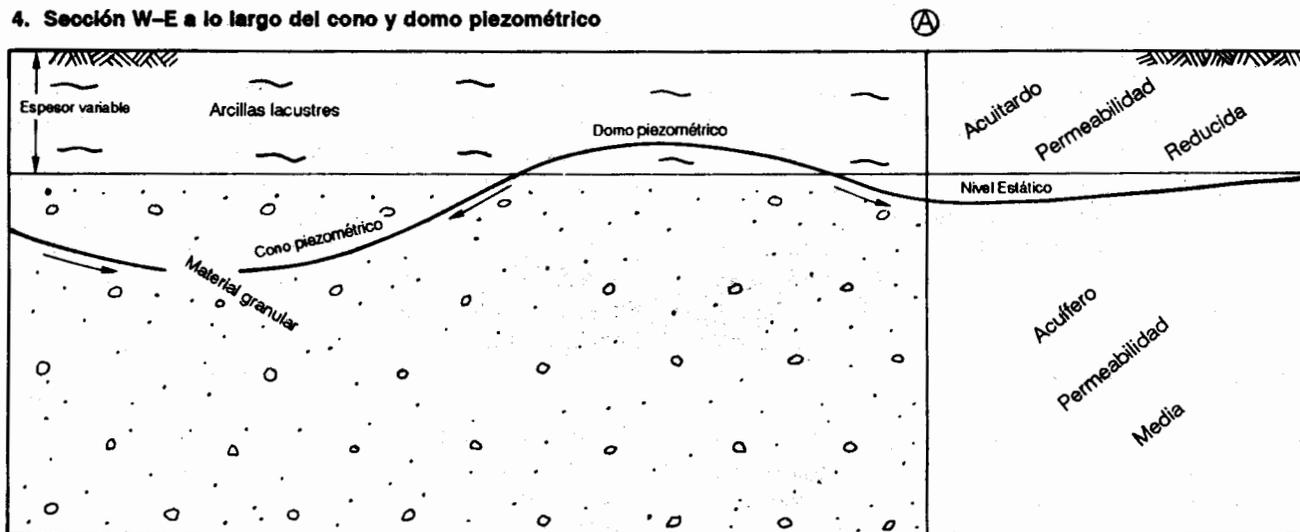
La extracción general de agua subterránea es menor en el área del domo piezométrico, aunque localmente el domo no se encuentra *circundado* por pozos con extracción fuerte. Al tratar de identificar una fuente de recarga con agua de buena calidad, surge la idea de la posible fuga de agua a partir de las redes de distribución; aunque hidráulicamente su funcionamiento no es sencillo, de plantear esto se explicaría la disminución salina. Además, es necesario determinar cuál es la fuente adicional de cloruros en el agua en la zona del domo. La única explicación que se ha podido dar es la recarga al acuífero por fugas en la red de distribución, la cual contiene el cloro que se añade al agua con objeto de desinfectarla. La constante incorporación de este elemento podría constituir la fuente adicional que se ha detectado en los análisis realizados en

los últimos 20 años. Por otro lado, se sabe de la existencia de grietas dentro de las arcillas lacustres, que se han formado por el abatimiento de los niveles piezométricos y los asentamientos del terreno. Estas grietas podrían constituir conductos preferentes de circulación de agua a través de las arcillas hacia el acuífero.

En el Valle de Xochimilco-Tiáhuac-Chalco, el acuífero es recargado desde el noreste, norte y sur; su circulación es hacia el centro del valle, donde cambia su curso rumbo al poniente. Al norte de Xochimilco, este subsistema acuífero descarga hacia el subsistema de la zona metropolitana. El gradiente indica que el aporte de agua es mínimo, tal vez nulo, de un subsistema acuífero a otro.

Por lo que se refiere al subsistema acuífero del Vaso del Lago de Texcoco, se detectó un flujo piezométrico del este al oeste. Existen datos

4. Sección W-E a lo largo del cono y domo piezométrico



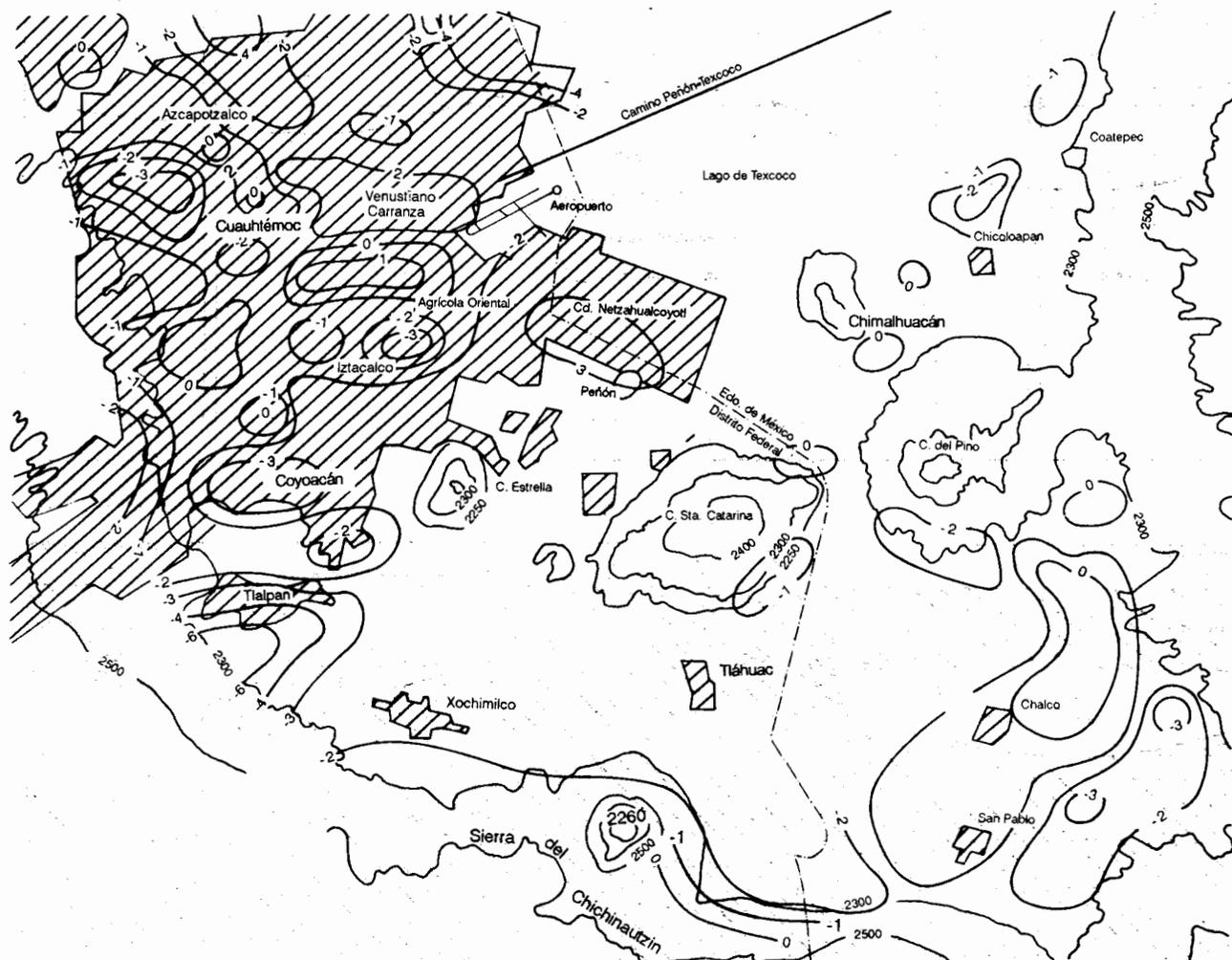
piezométricos en los alrededores de Chicoloapan; sin embargo, hacia el poniente la información geohidrológica es escasa. Se lograron detectar las curvas 2210 en la porción oriental y 2200 metros sobre el nivel del mar en la porción occidental, a la altura del Aeropuerto Internacional, o sea una variación de 10 m en una distancia de 13 km, lo que da un gradiente bajo, de 0.00076, a partir de lo cual se infiere que el agua en esta región tiene un movimiento muy reducido.

Evolución del nivel estático

Con las medidas piezométricas obtenidas en mayo de 1985 y en marzo de 1987, correspondientes a un periodo de prácticamente dos años, se dedujo la evolución del nivel estático y se configuró la evolución de la superficie piezométrica (véase ilustración 5).

En el área de Azcapotzalco, la evolución varía de cero en algunos puntos locales aislados, a menos de 4 m en la porción norte y predominan valores de alrededor de menos 2 m. Esta evolución es el reflejo de la explotación general de agua subterránea en el valle, así como de la fuerte extracción local en la zona industrial de Azcapotzalco, que incluye, entre otras, a las instalaciones de la Refinería de Pemex. En el área de la Delegación Venustiano Carranza, donde se ha formado el domo piezométrico, la evolución del nivel estático para el periodo estudiado, es ligeramente menor que en el resto de la zona metropolitana, con valores que varían de 0 a menos 2 m. En el área de Tlalpan-Xotepingo, la evolución varía de menos 2 a menos 6 m, encontrándose valores de entre menos 4 y -6 en la porción extrema sur (al sur del Anillo Periférico), lo cual ha sido ocasionado por la fuerte extracción de agua subterránea.

5. Evolución del nivel estático en metros (mayo-1984 - marzo-1987)



Extracción de agua subterránea

Se han actualizado las mediciones de las extracciones de agua subterránea que se realizan a través de los diversos pozos existentes, cuyo registro se ha efectuado por medio de tubos de Prandtl y medidores de volumen. La extracción para cada uno de los tres subsistemas acuíferos considerados es como sigue:

Subsistema acuífero	Extracción x 10 ⁶ m ³ /año
Zona metropolitana	243
Zona sur	195
Vaso del Lago de Texcoco	38

Cuantificación preliminar del agua subterránea

Se efectuó una cuantificación del flujo subterráneo, basada en la configuración de la elevación del nivel estático de septiembre de 1987 (véase ilustración 3). Sobre el plano se marcaron las celdas y se calculó la cantidad de agua subterránea que pasa a través de ellas. El cálculo se efectuó a partir de la Ley de Darcy, la cual establece que la velocidad de flujo a través de un medio poroso es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la longitud de la trayectoria del flujo. Matemáticamente, la Ley de Darcy se expresa de la siguiente manera:

$$V = \frac{h}{L} = Ki$$

donde, V es la velocidad media del flujo; h , la pérdida de carga en la distancia L ; i , el gradiente hidráulico y K , el coeficiente de permeabilidad. Considerando tanto la ley de continuidad como la de Darcy, se tiene que el caudal Q es igual a:

$$Q = Tbi$$

donde, T es la transmisibilidad y b , el ancho medio del flujo entre las líneas de corriente de cada celda.

La cuantificación se dividió en los tres subsistemas acuíferos. Se marcaron con la letra A las celdas correspondientes al flujo de entrada de agua subterránea procedente del poniente y surponiente, así como una celda en la parte norte del Cerro de La Estrella. Las celdas marcadas con la letra B corresponden al cono piezométrico de Azcapotzalco y las celdas C, al domo piezométrico del centro de la ciudad.

Zona metropolitana

El flujo subterráneo de entrada de las celdas A resultó de 172 millones de metros cúbicos anuales; la infiltración proveniente del domo piezométrico fue de 16 millones de m³ y la salida subterránea hacia el cono de Azcapotzalco fue de 24 millones. Con los datos anteriores se estableció la ecuación de balance donde las entradas son iguales a las salidas menos el cambio de almacenamiento.

$$E_s + I - S_s - E_x = \pm A_s \quad (1)$$

donde: E_s = Entradas subterráneas

I = Infiltración vertical

S_s = Salidas subterráneas (Hacia Azcapotzalco)

E_x = Extracción por bombeo

A_s = Cambio de almacenamiento

La infiltración vertical puede dividirse en:

- Infiltración en el área del domo a través de grietas o por el aporte por goteo del acuitardo al acuífero e
- Infiltración al acuífero en el resto de la zona metropolitana a través de las grietas.

Se deduce una infiltración de 70 millones de m³ anuales de los cuales 16 corresponden a la zona del domo y 54 al resto del valle.

Zona Xochimilco-Tláhuac-Chalco

Las celdas de entrada de agua subterránea se marcaron con la letra D y arrojaron un valor de 178 millones de m³ anuales. La extracción por bombeo es de 195 millones de m³ anuales lo que da un déficit de 17 millones, el cual es equilibrado por la infiltración vertical de agua de lluvia y por el cambio de almacenamiento que es negativo.

Vaso del Lago de Texcoco

En esta porción se marcaron con la letra E cuatro celdas al pie de la sierra del noreste, las cuales dan un flujo de entrada de agua subterránea de 34 millones de m³ anuales. Por otra parte, la extracción en la franja a lo largo de la carretera a Texcoco y en El Peñón de Los Baños, es de 38 millones, de donde se deduce que esta zona se encuentra cerca del equilibrio hidrodinámico.

Conclusiones

- En la zona metropolitana, el subsuelo corresponde a material granular de permeabilidad media y baja, cuya recarga proviene de la Sierra de Las Cruces; se descarga por medio de bombeo.
- En el área de Xochimilco-Chalco predominan los materiales volcánicos, principalmente lavas y escorias basálticas que forman un acuífero de alta permeabilidad; éste se recarga en la Sierra del Chichinautzin, ubicada al sur y se descarga por el bombeo de pozos ubicados en especial al pie de la sierra.
- En el Ex-Vaso del Lago de Texcoco, la información es escasa. El flujo proviene del oriente y tiene un gradiente casi nulo, por lo que su movimiento es muy reducido.
- La cuantificación del agua subterránea en el Valle de México indica que existe sobreexplotación, aunque ésta no es de gran magnitud. Se midió un cambio de almacenamiento negativo de 33 millones de m³ anuales, con un abatimiento de la superficie piezométrica entre 1 y 3 metros.
- En el esquema del flujo subterráneo, a la altura de la Delegación Venustiano Carranza, se aprecia un domo, que se forma con niveles (no freáticos) del acuífero; se considera que es ocasionado

por la conjunción de diversos factores como: tipo y distribución de materiales en el subsuelo; extracción diferencial de agua subterránea e infiltración a partir de fugas de las redes de distribución de agua potable que se incorporan al acuífero a través de grietas.

¹ El presente trabajo es parte de las actividades geohidrológicas que la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal ha venido realizando en los últimos cinco años para el control del acuífero de la ciudad de México. Manuscrito actualizado a junio de 1988.

Bibliografía

- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal. *Informes de actividades geohidrológicas en el Valle de México*, elaborados por Lesser y Asociados, 1983-1987.
- Drever, J. I. *The Geochemistry of natural waters*, 2a edición, Prentice Hall, Inc., Englewoods Cliffs, N. J. 07632, EUA, 1988.
- Freeze, R. A. y J. A. Cherry, *Groundwater*, Prentice Hall, Inc., Englewoods Cliffs, N. J. 07632, EUA, 1979.
- Lesser, J. M., Sánchez, F., González, D. "Hidrogeoquímica del acuífero de la ciudad de México", *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, sept-dic., 1986.