

Hidrogeoquímica del acuífero de la ciudad de México¹

Juan Manuel Lesser Illades

Felipe Sánchez Díaz

David González Posadas

Lesser y Asociados

El agua que forma el acuífero de la ciudad de México proviene fundamentalmente de la lluvia, parte de la cual se infiltra y circula a través de las rocas, con lo que disuelve las sales existentes e incrementa su contenido salino conforme avanza. La cantidad y el tipo de sales disueltas están en relación directa con el tipo y solubilidad de las rocas con las cuales tiene contacto. En el Valle de México las rocas existentes, volcánicas y sedimentarias continentales y lacustres, proporcionan las sales que se encuentran disueltas en el acuífero. Se efectuó una interpretación hidrogeoquímica de éste, analizando 240 pozos y con información de 30 años. Aunque la concentración salina del agua subterránea es en general baja, con sólidos totales disueltos entre 200 y 400 ppm existen puntos aislados con concentraciones mayores, principalmente al centro de la zona. Con el estudio se ratificaron importantes aspectos geohidrológicos, como la recarga de agua al acuífero en el centro del área metropolitana; se delimitaron zonas con agua incrustante y se analizó la variación de la calidad química del agua en relación con el tiempo.

Análisis químicos

La información procesada consistió en los análisis químicos de 240 pozos con información de 1984 y 1985, y de otros 100 con análisis anuales de 1955 a 1985, que incluyen las determinaciones de calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, carbonatos, cloruros, sulfatos, conductividad eléctrica, potencial hidrógeno, sólidos totales disueltos, alcalinidad total, fierro, manganeso, cuenta estándar, nitritos, nitratos, flúor, arsénico, cadmio, zinc, cobre, cromo, mercurio, plomo y selenio.

Sólidos totales disueltos

Los sólidos totales disueltos corresponden a la suma de elementos en solución que el agua ha incorporado en su trayectoria.

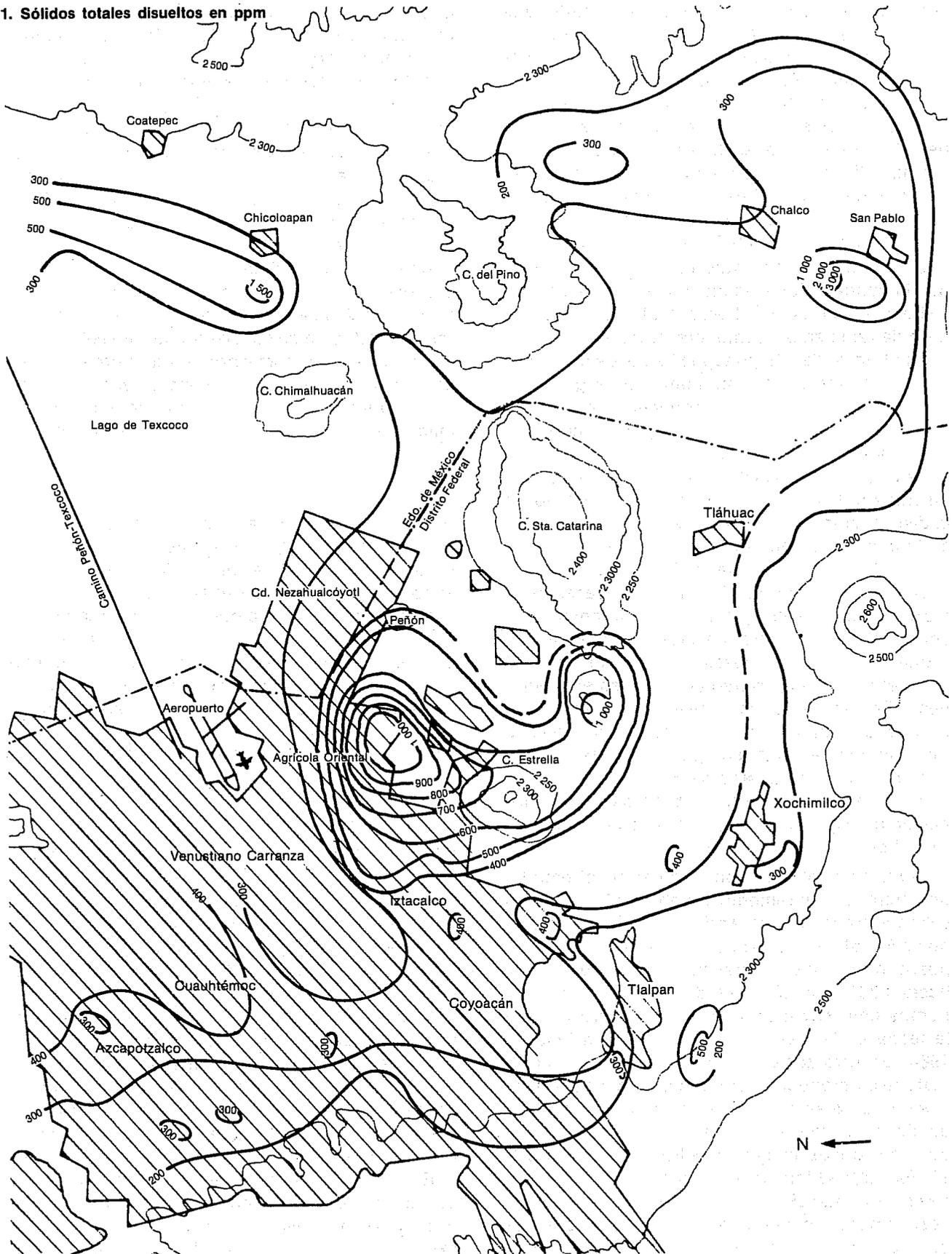
Cuando la lluvia se precipita sobre la corteza terrestre, arrastra una cierta cantidad de partículas que se encuentran suspendidas en la atmósfe-

ra, además de incorporar gases como el bióxido de carbono; por ello el agua contiene una determinada cantidad de sales disueltas, entre las que predominan el sodio y los bicarbonatos en concentraciones bajas. Al entrar en contacto con la superficie terrestre, el agua, que además posee ácido carbónico, disuelve las sales y minerales que forman las rocas, con lo que incrementa su contenido salino, el cual será mayor conforme el agua circule por el subsuelo o permanezca un mayor tiempo en contacto con las rocas; la cantidad y el tipo de elementos disueltos dependerá de la composición y solubilidad de éstas.

En la ilustración 1 se muestra la distribución de los sólidos totales disueltos en el agua subterránea de la ciudad de México, y se observa que los valores más bajos, menores de 200 ppm, se localizan al poniente, al sur y al surponiente del área, zonas que coinciden con las estribaciones de las sierras, lo que indica que estas áreas corresponden a zonas de recarga del acuífero.

El bajo contenido de sales encontrado en las

1. Sólidos totales disueltos en ppm



estribaciones serranas indica, por una parte, que el agua que recarga al acuífero corresponde a la infiltración de la lluvia, y por la otra, que no deben de existir rocas que incluyan minerales o sales de fácil disolución. Además, los materiales lávicos y piroclásticos que forman las estribaciones de las elevaciones topográficas tienen una permeabilidad alta que permite un flujo rápido, lo que impide que el agua tenga suficiente tiempo para incrementar su contenido salino; esto es especialmente visible en la Sierra del Chichinautzin.

El análisis de los datos manejados demuestra que la concentración salina tiende a incrementarse hacia la parte central del área, lo que indica un flujo de agua en la misma dirección; por ejemplo, de las Lomas de Chapultepec hacia los alrededores de Azcapotzalco, este aumento es gradual.

En esta parte central homogénea se encuentra una zona con una composición química con sólidos totales entre 300 y 400 ppm, de donde se deduce que en el subsuelo no existen sales de fácil disolución. Un aspecto importante detectado en la distribución de estos sólidos, es la disminución en la concentración salina entre las delegaciones Benito Juárez y Venustiano Carranza.

Como ya se mencionó, una de las bases de la hidrogeoquímica es que el agua incrementa su contenido salino conforme circula en el subsuelo y que no existen procesos naturales que provoquen el fenómeno inverso (salvo raras excepciones). Por lo tanto, la causa más común que origina la disminución del contenido salino es la dilución debida a una recarga o al aporte de agua con un menor contenido salino. Este efecto fue observado prácticamente en todas las distribuciones de hidrogeoquímica y ratificado por piezometría (Lesser y Sánchez, 1985).

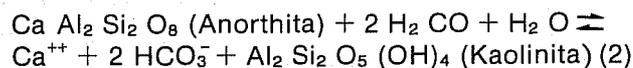
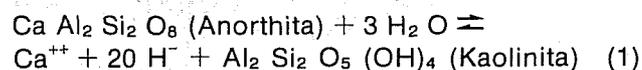
Pero, en contraste con lo anterior, el estudio demostró un incremento notable del contenido salino entre la colonia Agrícola Oriental, el Cerro de La Estrella y la Sierra de Santa Catarina; en los pozos de la colonia mencionada se detectaron hasta 1 200 ppm de sales disueltas —fueron los puntos con mayor salinidad del muestreo total y la fecha de la medición correspondió a julio de 1984. En esta zona el acuífero se localiza entre materiales granulares con algunos horizontes de basalto. Un efecto similar se presentó en la Sierra de Santa Catarina, donde se detectaron 1 400 ppm de sólidos totales disueltos en el pozo SC-12. Esta alta salinidad es ocasionada por dos factores: la influencia de zonas volcánicas, algunas posiblemente activas, que han impregnado las rocas del subsuelo con emanaciones gaseosas y

emplazamientos de sales de tipo hidrotermal y la presencia de horizontes de sedimento lacustres con materia orgánica en descomposición. En la distribución destacan claramente las áreas de la Agrícola Oriental y Santa Catarina como focos locales de contaminación salina natural.

En la porción sur del valle, área de Xochimilco-Tláhuac-Chalco, los pozos presentan un bajo contenido salino, característico de agua de lluvia de reciente infiltración, que indica que este acuífero debe recargarse sobre la sierra. Aquí, las concentraciones salinas son de 200 a 300 ppm, con excepción de los pozos al norte y oriente de San Pablo Atlazalpan, donde se registraron valores de 3 000 ppm de sólidos totales disueltos, considerándose que corresponden a puntos locales. El incremento salino que se marca en la configuración muestra una distribución general muy similar a la circulación del flujo subterráneo.

Calcio

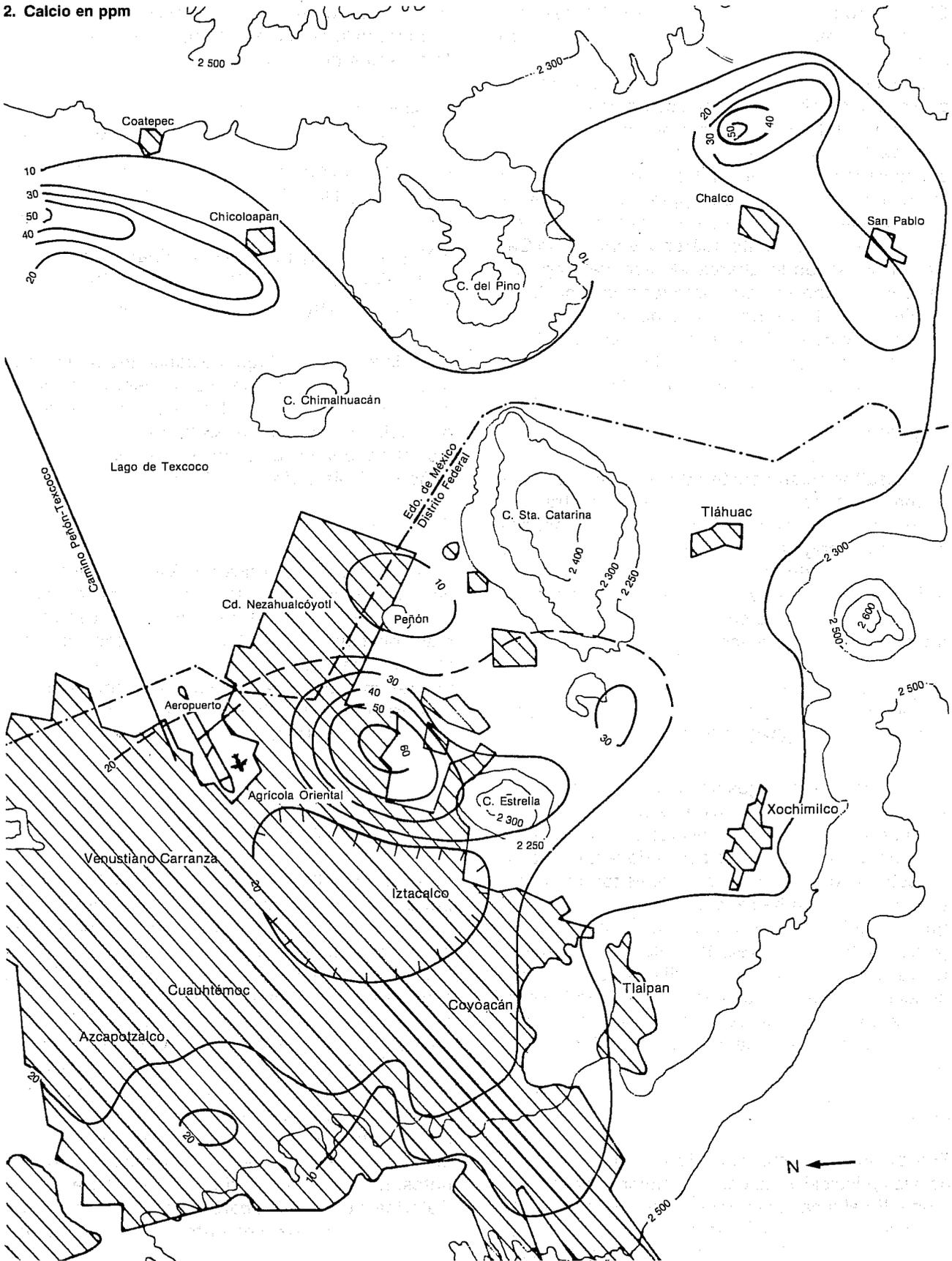
El calcio es un ión divalente de carga positiva que forma parte de la mayoría de las rocas que constituyen la corteza terrestre, por lo que es común encontrarlo disuelto en el agua. Dentro del área estudiada se considera que este elemento proviene de la disolución de los feldespatos cálcicos que conforman las rocas volcánicas. A continuación se mencionan las reacciones químicas características de la disolución de la anorthita.



La distribución de este elemento se muestra en la ilustración 2; las concentraciones más bajas se localizan en las porciones poniente, sur y oriente de la ciudad de México, lo que ratifica la existencia de una importante zona de recarga hacia las sierras. En los pozos de la colonia Agrícola Oriental, se detectaron más de 60 ppm de este material. Al poniente de este sitio, entre las delegaciones de Iztacalco, Benito Juárez y Venustiano Carranza, se encontró una clara disminución en los valores, que corresponde al área donde se ha inferido la existencia de un aporte por infiltración vertical.

En la porción suroriental del valle de Xochimilco-Tláhuac-Chalco, la concentración de calcio en el agua es muy baja, alrededor de 15 ppm, con excepción de la parte localizada al sureste de

2. Calcio en ppm

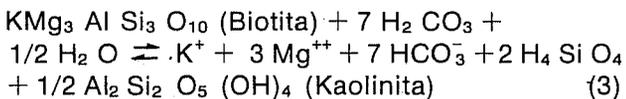


Chalco, donde existen algunos aprovechamientos que incrementan ligeramente su contenido salino a 20 ppm.

Existen tres áreas o subsistemas acuíferos en que se puede dividir a la zona estudiada: el primero corresponde a la zona metropolitana de la ciudad de México, donde las concentraciones de calcio varían de 10 ppm en las estribaciones de la sierra, hasta máximos de 60 ppm al centro, detectándose también una área de valores bajos entre las delegaciones Benito Juárez y Venustiano Carranza. El segundo abarca el vaso del Lago de Texcoco donde el agua prácticamente no tiene movimiento y la información geoquímica es reducida. El tercero engloba la zona sur de la capital y presenta una concentración salina muy baja del agua, con cerca de 15 ppm de calcio.

Magnesio

Los basaltos están constituidos por minerales ferromagnesianos entre los que se encuentran los piroxenos y los anfíboles, los cuales son atacados por el agua originando la presencia del magnesio en solución. Este elemento también proviene de la disolución de otros minerales, como la biotita, la cual se transforma en kaolinita como se muestra en la siguiente reacción:

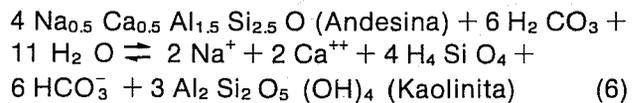
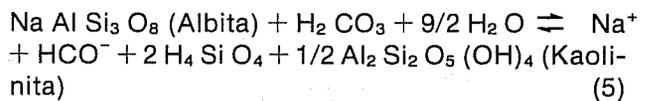
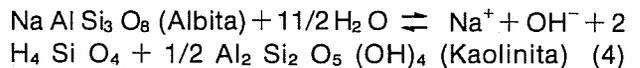


Los valores más bajos de magnesio, menores a 10 ppm, se localizan al pie de las sierras, así como en la porción nororiental del área de trabajo; esto corrobora la existencia de zonas de recarga hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas, y se incrementan hacia la porción central, con lo que se ratifica el flujo subterráneo. Entre las delegaciones Benito Juárez, Iztacalco y Venustiano Carranza, se presenta una disminución en las concentraciones, ocasionada por un aporte vertical de agua hacia el acuífero, el cual aparentemente corresponde a la infiltración de fugas de la red de distribución de agua potable.

Sodio

El sodio, junto con el calcio y el magnesio, corresponde a los principales cationes encontrados en la naturaleza. En el área estudiada los tres provienen de la disolución de los minerales que forman las rocas, como los feldespatos sódicos, que son un constitu-

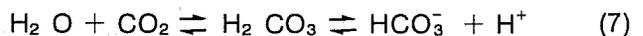
yente de las formaciones volcánicas. A continuación se muestra la reacción de la disolución de la albita y la andesina por el agua.



En la zona de trabajo las concentraciones más bajas, menores de 5 ppm, se encuentran al pie de las sierras que limitan al área en sus porciones oriental, sur y poniente, en tanto que las más altas, alrededor de 20 ppm, se localizan entre El Peñón del Marqués y el Cerro de la Estrella.

Bicarbonatos

A diferencia de los iones analizados, que provienen principalmente de la disolución de las rocas, el bicarbonato se produce a consecuencia de reacciones químicas debidas a la interacción entre el agua, los gases y las rocas. Así, una de las fuentes más comunes de este elemento es la incorporación de bióxido de carbono en el agua, lo cual forma ácido carbónico, que a su vez se disocia en bicarbonatos e hidrógeno como se muestra en la siguiente reacción:



Otras posibilidades para su formación corresponden a la disolución de los minerales de las rocas ígneas, como se indicó en las reacciones químicas anteriores aquí mostradas.

La concentración de bicarbonatos en el agua está sujeta a los cambios de temperatura y presión, así como a procesos biológicos y a la concentración total de sales en solución. Los valores menores de 100 ppm se presentan en las estribaciones de las sierras del poniente, sur y oriente, áreas de recarga por lluvia, en tanto que conforme el agua subterránea circula hacia el centro de la ciudad se incrementa su contenido de bicarbonatos. En la colonia Agrícola Oriental y en Santa Catarina vuelven a aparecer las anomalías comentadas para los elementos tratados anteriormente.

Cloruros

Por lo general, los cloruros se encuentran en concentraciones bajas en terrenos volcánicos, como en el subsuelo de la ciudad de México, con excepción de algunos sitios donde hay horizontes salinos depositados en antiguas cuencas lacustres. Los valores bajos al poniente, sur y oriente ratifican que dichas regiones corresponden a zonas de recarga.

Sulfatos

Los sulfatos forman parte de diferentes minerales que constituyen las rocas ígneas, sin embargo, las concentraciones provenientes de éstas, en general son bajas; otros posibles orígenes corresponden a la descomposición de materia orgánica en los sedimentos lacustres y a la disolución de horizontes de azufre que comúnmente se encuentran asociados a centros eruptivos, que al oxidarse pasan en solución al agua, formando sulfatos.

Respecto a la presencia de sulfatos en el acuífero capitalino se puede decir lo siguiente: las concentraciones más bajas, menores de 10 ppm, se encuentran en las elevaciones de las elevaciones topográficas hacia el poniente, oriente y sur, ratificando la existencia de zonas de recarga por agua de lluvia en esos lugares; hacia el centro de la zona metropolitana existe un incremento en las concentraciones producido principalmente por el flujo de agua subterránea; en los alrededores del Cerro de La Estrella hay concentraciones salinas altas, ocasionadas por la existencia de horizontes salinos dentro de los materiales granulares que constituyen el acuífero; al oriente de Chalco se encuentra una zona con magnitudes que alcanzan hasta 100 ppm posiblemente ocasionados por la utilización de agua en riego que produce evaporación y reconcentración de sales (véase ilustración 3).

Fierro y manganeso

El fierro es un elemento común en rocas y suelos, de donde es fácilmente disuelto o acarreado por las aguas, en especial si son ácidas. Las aguas naturales en general presentan concentraciones inferiores a 1 ppm y rara vez sobrepasan los 5 ppm, pero aquéllas con un pH bajo contienen más fierro que las alcalinas. Las concentraciones altas de este elemento se pueden deber, por otra parte, a la ausencia de oxígeno.

En el agua subterránea este material se disuelve y se convierte en bicarbonato ferroso (HCO_3)₂, estado en el que no tiene coloración alguna. Cuando el líquido se extrae de un pozo, absorbe oxígeno del aire y el bicarbonato en solución se convierte en hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ que es insoluble; en estas condiciones, parte del bióxido de carbono libre escapa y el pH se eleva. El hidróxido férrico tiene un color café rojizo y se encuentra suspendido, o bien se precipita en concentraciones bajas (0.3 ppm), reacción que se lleva a cabo con gran facilidad. Aunque esta concentración ocasiona algunos problemas en el uso y aspecto del agua no llega a ser tóxica, pero si sobrepasa los 0.5 ppm produce incrustaciones visibles en los ademes y tuberías y disminuye el rendimiento de los pozos (véase ilustración 4).

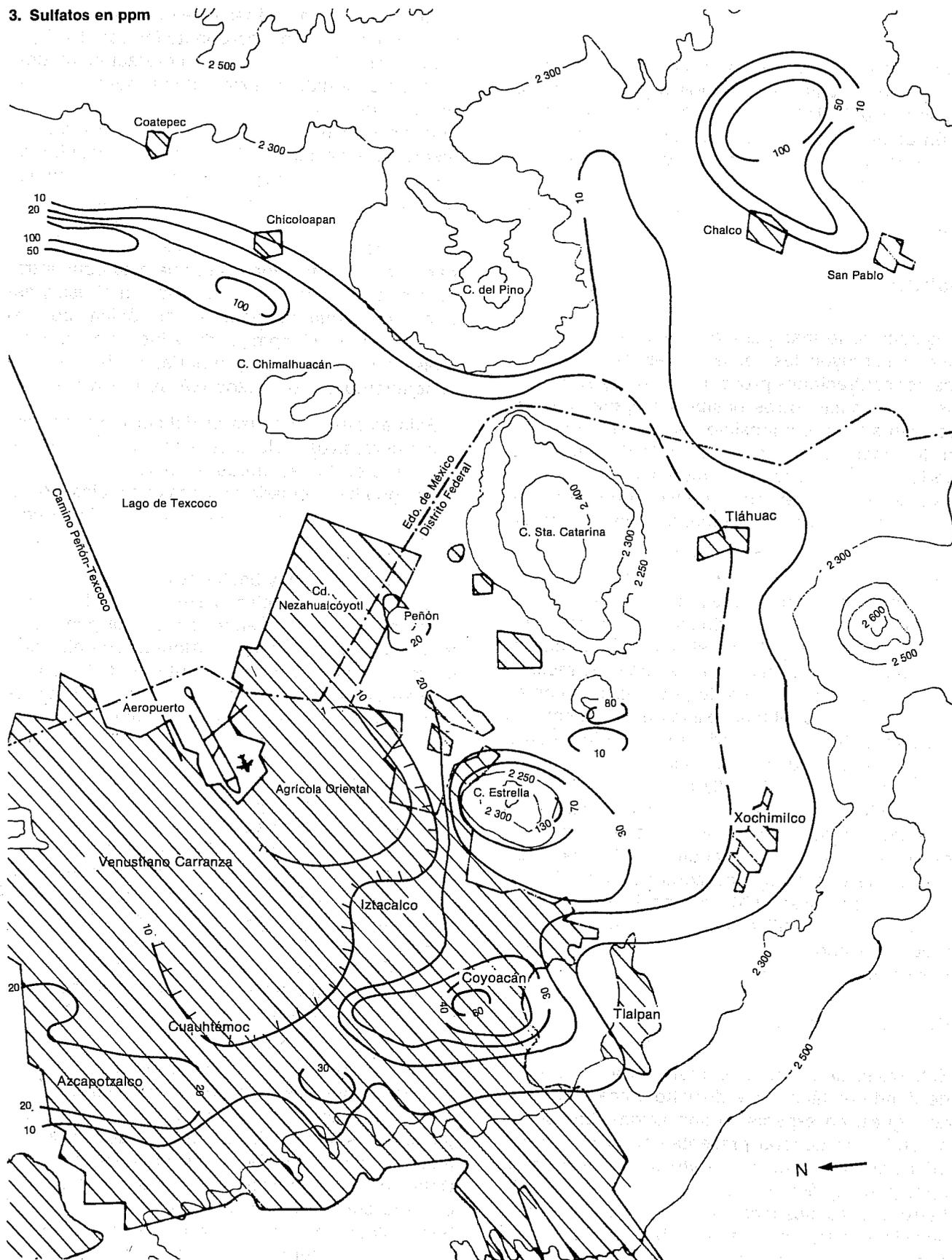
Existen otros compuestos del fierro que actúan como corrosivos incluso cuando no existe oxígeno, como en los acuíferos de cierta profundidad cuya agua ha circulado grandes distancias, como el óxido de fierro (FeO), de color amarillo y con un pH bajo.

Por otra parte, hay bacterias como la *Crenotrix* o la *Gallionella* que utilizan a este mineral en solución como fuente de energía y dan origen a una tonalidad rojiza en el agua. Algunas colonias que crecen y se desarrollan en el interior de los pozos forman costras gelatinosas o lamosas que tapan las ranuras de los ademes y también disminuyen el rendimiento.

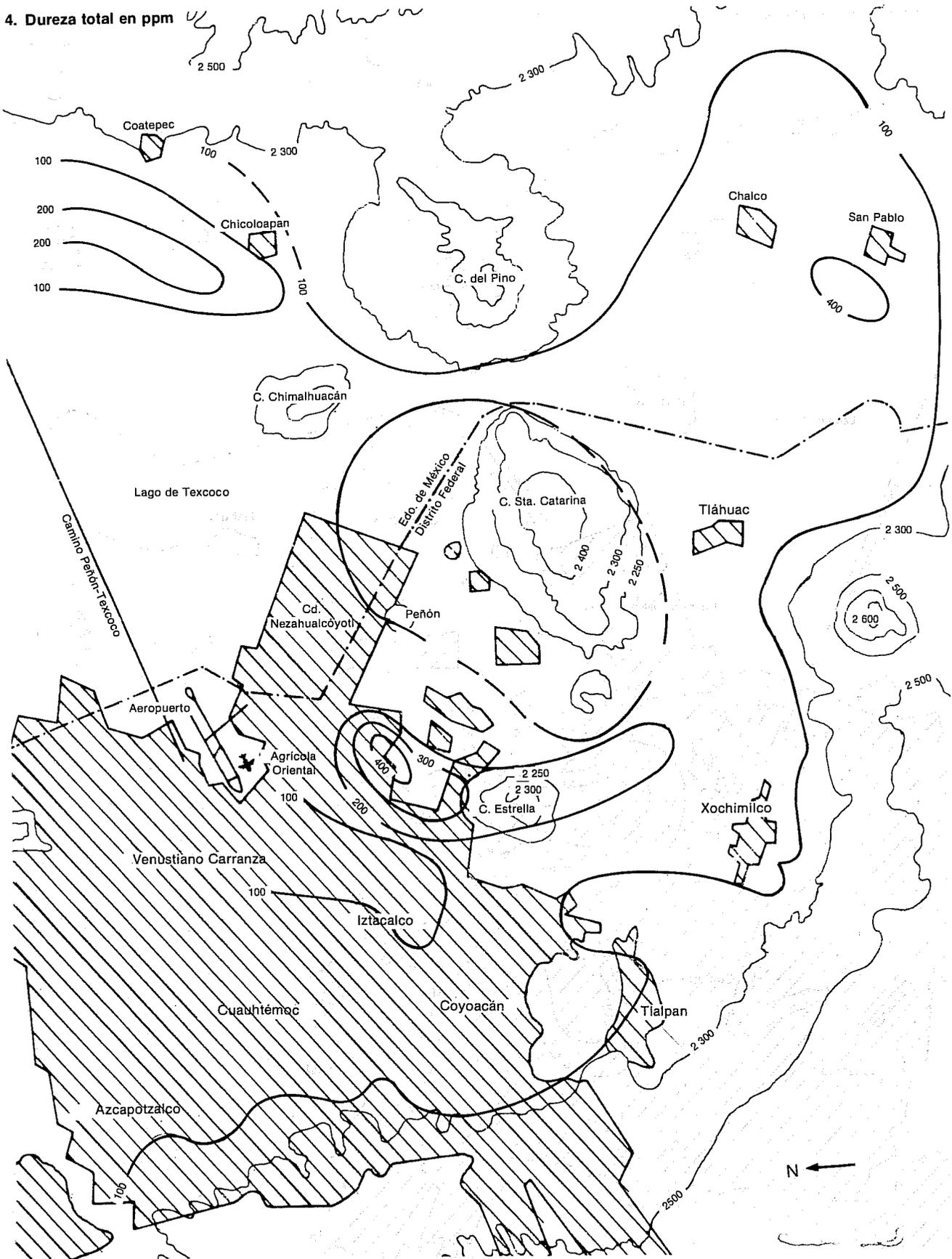
En los análisis químicos del agua se acostumbra reportar al fierro junto al manganeso por las semejanzas que hay entre ellos, pero tienen también grandes diferencias; el segundo también forma parte de rocas y suelos, pero además se encuentra en la materia orgánica ya que es uno de los nutrientes de las plantas. En las aguas naturales la concentración de manganeso es en general inferior a 0.02 ppm y puede circular grandes distancias porque no se oxida con facilidad. Está presente en las aguas que contienen fierro pero en una proporción menor.

En el área estudiada ambos elementos están prácticamente ausentes (véase la ilustración 5), aunque la proporción del fierro sobre la del manganeso es superior. Los puntos donde fueron detectados corresponden a los alrededores de la Delegación Azcapotzalco, a la parte comprendida entre la colonia Agrícola Oriental y la Sierra de Santa Catarina con una prolongación rumbo al poniente y a algunos pozos del sistema sur.

3. Sulfatos en ppm



4. Dureza total en ppm



5. Hierro + manganeso en ppm



Principales procesos químicos en el agua subterránea

Los iones disueltos en el agua subterránea tienen propiedades para entrar en reacción formando compuestos o disociándose; las reacciones químicas producidas se acompañan de un cambio de energía, lo cual a su vez provoca otro tipo de reacciones químicas, en una cadena muy compleja, cuyo cálculo, sin embargo, ya se ha adaptado a programas de computadora que simplifican su aplicación.

Metodología

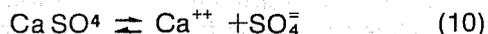
Se utilizaron aquellos recursos que sirven para evaluar las condiciones químicas del agua respecto al equilibrio químico, o sea su capacidad para precipitar o disolver una sal. El trabajo fue complejo y requirió de un largo tiempo, tanto por el índice de muestras de agua como por la cantidad de reacciones por estudiar; para realizarlo se utilizó el programa computarizado denominado WATEQ, que fue elaborado y publicado por el Departamento de Geología de los EUA (U.S. G.S.).

El equilibrio químico se basa en la ley de acción de masas, la cual indica que cuando en una reacción química los reactantes A + B son iguales a los productos C + D y la reacción es reversible, entonces la constante de actividad iónica *Kai* es igual a las actividades de los productos entre la de los reactantes:

$$\text{Ley de acción de masas: } A + B \rightleftharpoons C + D \quad (8)$$

$$Kai = \frac{[C] [D]}{[A] [B]} \quad (9)$$

Los paréntesis indican la actividad del índice que encierran. Por ejemplo, en el caso de la anhidrita, ésta se disocia de acuerdo con la siguiente reacción:



Aplicando la ley de acción de masas la constante de actividad iónica es:

$$Kai (\text{Anhidrita}) = \frac{[Ca^{++}] [SO_4^-]}{[CaSO_4]} \quad (11)$$

La actividad de los compuestos es igual a 1, por lo que:

$$Kai (\text{Anhidrita}) = [Ca^{++}] [SO_4^-] \quad (12)$$

Las actividades iónicas se obtienen multiplicando el coeficiente de actividad "γ" de cada elemento, por su concentración en moles por litro "m".

$$[Ca^{++}] = \gamma_{Ca} \cdot m_{Ca} \quad (13)$$

$$[SO_4^-] = \gamma_{SO_4} \cdot m_{SO_4} \quad (14)$$

El coeficiente de actividad iónica "γ" se calculó mediante la fórmula de Debye-Hückel:

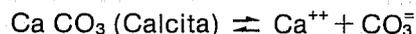
$$-\log \gamma_i = \frac{Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + Bai \sqrt{I}} \quad (15)$$

donde *Z* es la carga del ión; *A* y *B* son constantes dependientes de la temperatura (en nuestro caso a 25° C, *A* = 0.05085 y *B* = 0.3281 × 10⁻⁸); *a* es una constante relacionada con el tamaño y carga del ión, e *I* es la fuerza iónica calculada por la fórmula:

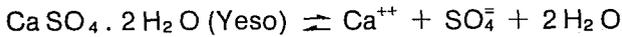
$$I = \sum \frac{m_i z_i^2}{2} \quad (16)$$

Para encontrar el grado de saturación del agua respecto al mineral estudiado se compara la constante de actividad iónica *Kai*, con la constante de equilibrio *Ke*. Para valores de *Kai* mayores que *Ke*, la muestra se encuentra sobresaturada y para valores de *Kai* menores que *Ke*, está insaturada; cuando las constantes son iguales entonces se dice que existe equilibrio químico. El hecho de que determinada agua se encuentre sobresaturada de un compuesto implica que existirá precipitación de éste y por lo tanto habrá incrustaciones en ademes y tuberías; cuando está insaturada, tiene la propiedad de disolver una mayor cantidad de sales y se comporta como corrosiva respecto a la sal o mineral estudiados.

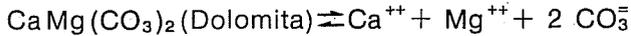
En párrafos anteriores se mostró la reacción química y la constante de actividad iónica de la anhidrita. A continuación se presentan las reacciones de disolución de la calcita, el yeso y la dolomita, por ser las que ocurren en la naturaleza con más frecuencia:



$$Kai (\text{Calcita}) = [Ca^{++}] [CO_3^-] \quad (17)$$



$$\text{Kai (Yeso)} = [\text{Ca}^{++}] [\text{SO}_4^-] \quad (18)$$



$$\text{Kai (Dolomita)} = [\text{Ca}^{++}] [\text{Mg}^{++}] [\text{CO}_3^-]_2 \quad (19)$$

Las constantes de equilibrio *Ke* de los minerales anteriores son las siguientes:

$$\text{Ke (Yeso)} = 10^{-4.75} \quad (20)$$

$$\text{Ke (Calcita)} = 10^{-8.47} \quad (21)$$

$$\text{Ke (Dolomita)} = 10^{-17.02} \quad (22)$$

$$\text{Ke (Anhidrita)} = 10^{-4.54} \quad (23)$$

Resultados

El valor de la presión del bióxido de carbono (PCO_2) en el agua que se encuentra en contacto con la atmósfera y en equilibrio es de 0.316×10^{-3} , pero los valores observados para el agua del acuífero de la ciudad de México fueron mayores que el punto de equilibrio, de donde se deduce la existencia de una fuente adicional de bióxido de carbono en el agua.

El grado de saturación de la anhidrita, calcita y yeso se obtuvo comparando el valor calculado para cada muestra (*Kai*) con la constante de equilibrio (*Ke*). Para ello se dividió *Kai/Ke*, y si el cociente resultante es igual a la unidad, se dice que existe equilibrio químico. Si dicho cociente es menor que 1, el agua tiene capacidad para disolver una mayor cantidad de sales, se considera insaturada y se puede clasificar como agua corrosiva. Si el resultado es mayor de 1 entonces se encuentra sobresaturada, y por lo tanto, tiene la propiedad de precipitar la sal por lo que se denomina agua incrustante. Se calculó el grado de incrustación del agua respecto a la anhidrita y al yeso; los resultados indican que se está muy lejos del límite de equilibrio y por lo tanto es una agua con alta capacidad de disolución de anhidrita.

En la zona estudiada, el grado de incrustación del agua respecto a la calcita arrojó valores por arriba de 1 000 milésimas (que en algunos casos llegan incluso a las 5 000 milésimas) en las posiciones central y oriente de la ciudad, entre las delegaciones de Iztacalco e Iztapalapa, en el Cerro de La Estrella y en San Lorenzo Tezonco, por lo que dichas aguas incrustantes de calcita pueden provocar taponamientos en ademes, columnas de bombeo u otros materiales con los que

están en contacto. En el resto del área analizada los valores son menores de 1 000 milésimas, excepto en algunas puntas locales (véase ilustración 6).

Variación de la salinidad respecto al tiempo

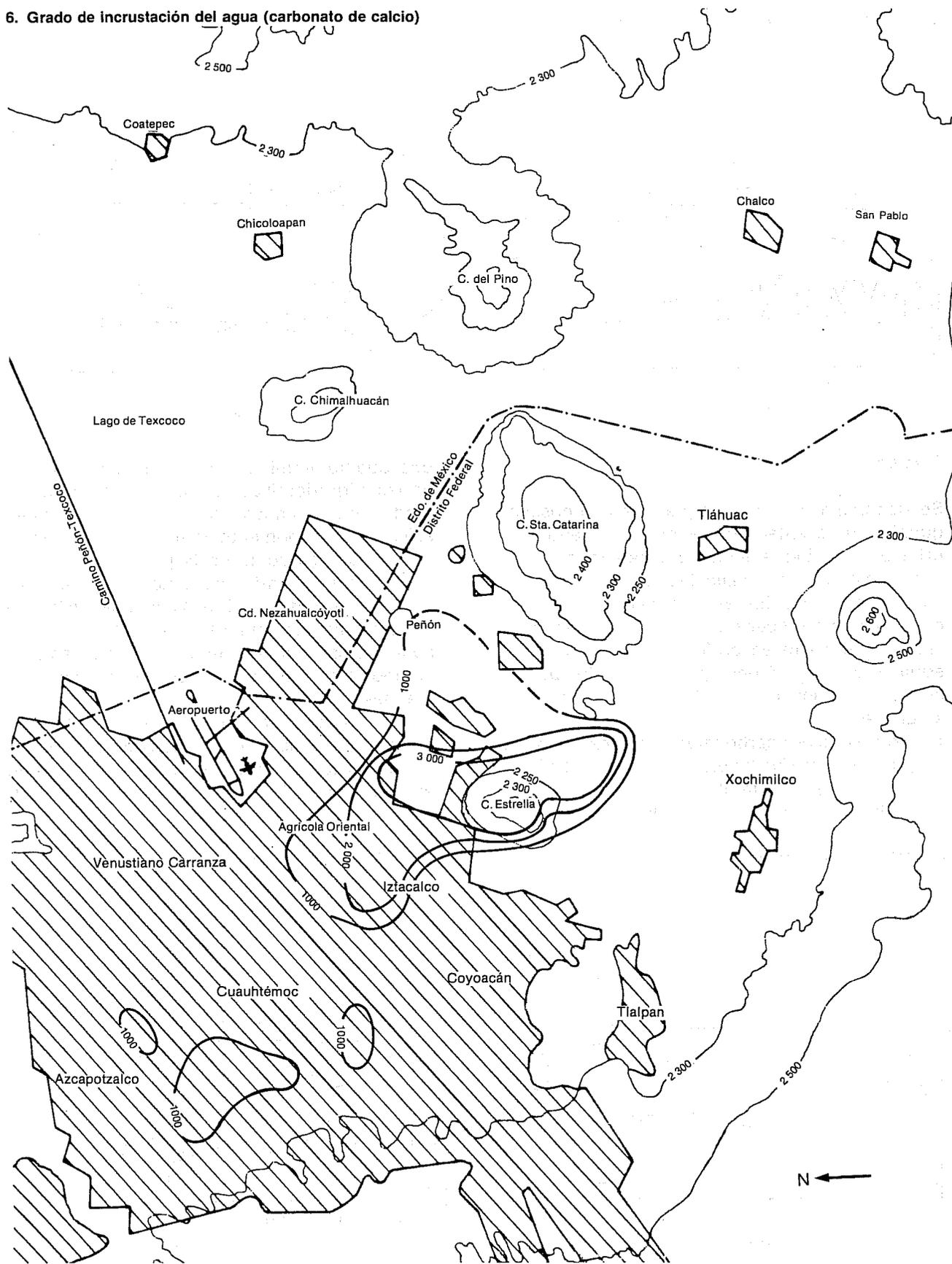
Información disponible

De los análisis químicos efectuados en los pozos municipales durante el periodo de 1955 a 1985 se seleccionaron los parámetros siguientes para su estudio detallado: sólidos totales disueltos, dureza total, cloruros, nitratos, fierro y manganeso. Los sólidos totales disueltos se eligieron porque indican el grado de salinidad del agua; la dureza total por ser un índice de calidad; los cloruros, debido a que se encuentran prácticamente ausentes en rocas volcánicas; los nitratos por indicar la contaminación orgánica; y el fierro y el manganeso, porque se han detectado en concentraciones nocivas en algunos puntos locales.

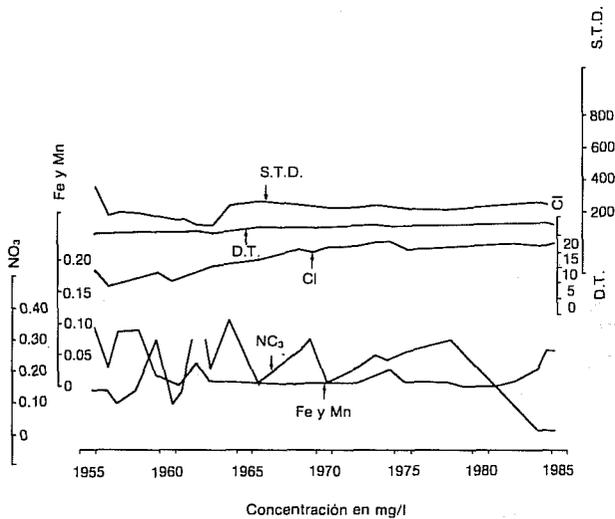
El estudio de la variación de la salinidad respecto al tiempo se efectuó en 100 pozos distribuidos en toda la zona metropolitana, de los cuales 30 no mostraron cambio alguno. A continuación se describen los principales efectos observados:

- Se notaron incrementos notables de cloruro en 17 pozos ubicados en el centro de la ciudad, y que coinciden con la zona donde se ha detectado una recarga al acuífero procedente de fugas de la red de distribución. El incremento se debe al cloro que se aplica al agua potable que se infiltra y alimenta al acuífero, como se muestra en el Pozo No. 15 (véase ilustración 7).
- En los 30 años analizados sólo se registró un aumento de fierro y manganeso en 5 pozos que corresponden a Santa Catarina y a la porción central de la zona urbana (Pozo 42, véase ilustración 8).
- El incremento de nitratos fue evidente en 29 de los 100 pozos graficados que se localizan principalmente en una franja al pie de los lomeríos del poniente de la ciudad. Se considera que ello se debe a la falta de saneamiento de los lomeríos (Pozo 26, véase ilustración 9).
- Los incrementos en casi todos los parámetros mencionados se dieron en 10 pozos; aquéllos más obvios presentan valores que varían entre 0.5 y 4.5 miligramos en el periodo de 30 años, lo que corresponde a un aumento anual entre 0.025 y 0.225 ppm (Pozo 83, véase ilustración 9).

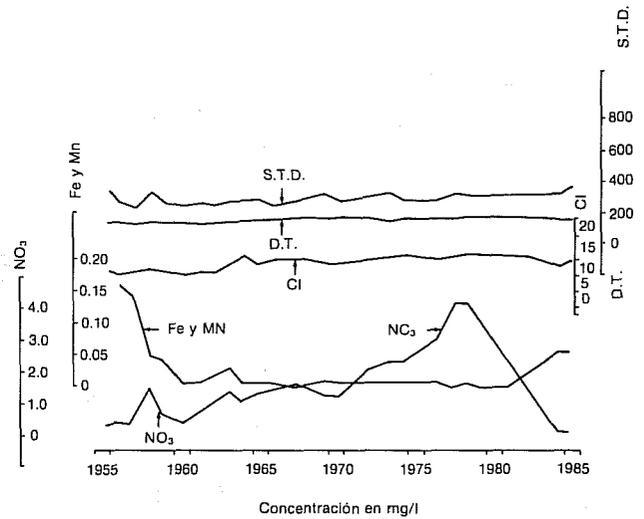
6. Grado de incrustación del agua (carbonato de calcio)



7. Pozo 15 (Albert y Berlín)



9. Pozo 26 (Axotla)



Familias de agua

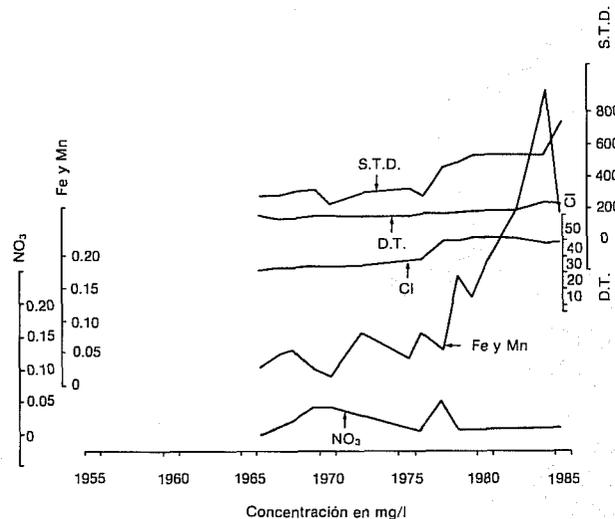
Se denomina familia de agua a la composición química representada por el principal catión y el principal anión en solución. Existen varios métodos para deducir la familia de agua a que pertenece una muestra. En este trabajo se utilizó el denominado de Piper o de Diagramas Triangulares, que consiste en graficar en dos triángulos equiláteros a los aniones y cationes principales y con cuya aplicación se obtuvieron las familias siguientes:

- Mixta sódico-bicarbonatada. Corresponde al agua de lluvia que ha disuelto poca cantidad de sales. El líquido circula a través de materiales de alta permeabilidad, como lavas y piroclásticos,

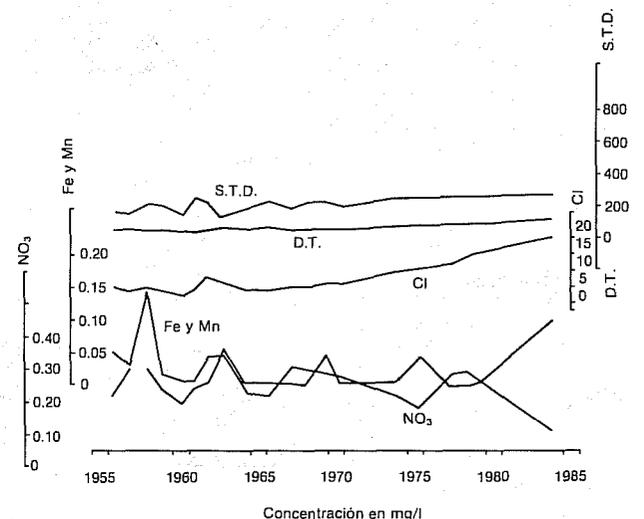
que no permiten la incorporación de cantidades significativas de sales que pudieran modificar su composición química. Esta familia se encontró al poniente, tanto al pie de la Sierra de Las Cruces como en la parte baja.

- Mixta magnesiana-bicarbonatada. Se encontró en el acuífero de tipo basáltico al pie de la Sierra del Chichinautzin. El agua de lluvia, que es sódico-bicarbonatada, modifica ligeramente su composición química al disolver el calcio y el magnesio de los basaltos, para dar origen a la familia que aquí se trata. Se detectó principalmente en la zona de los pedregales, entre Contreras y Ciudad Universitaria, así como en el extremo sur del Distrito Federal entre Xochimilco y San Juan Ixtayopan.

8. Pozo 42 (Granjas Estrella)



10. Pozo 83 (Marina Nacional 1)



- Sódico-bicarbonatada. Este tipo se detectó en las porciones central y oriental de la ciudad, y se origina por dos factores: las arcillas del subsuelo producen un intercambio catiónico mediante el cual el calcio y el magnesio tienden a permanecer dentro de la estructura de la arcilla, mientras que el sodio se incorpora al agua en solución, y la presencia de horizontes de sales de bicarbonato de sodio, que son fácilmente disueltos por el agua en los pozos de la Agrícola Oriental y de Santa Catarina.

Conclusiones

La mayor parte del agua del acuífero contiene bajas concentraciones salinas, con excepción de zonas locales donde se detectan hasta 1,200 ppm, así como en el vaso del Lago de Texcoco donde se registran más de 20 000 ppm.

La alta salinidad es ocasionada por tres factores: a) Existencia de horizontes de sedimentos evaporíticos lacustres; b) influencia de zonas volcánicas, algunas posiblemente activas, que han impregnado las rocas de subsuelo, así como emanaciones gaseosas y el emplazamiento de sales de tipo hidrotermal; c) presencia de material orgánico en descomposición entre los sedimentos lacustres.

Los puntos que destacan como focos locales de contaminación natural en el acuífero corresponden a las áreas de la colonia Agrícola Oriental y de la Sierra de Santa Catarina, así como a la parte central del Vaso de Texcoco, aunque en esta porción la información es escasa.

La salinidad del agua en los últimos 20 años ha permanecido estable con excepción de algunos pozos en ciertas zonas. Se han encontrado incre-

mentos notables de cloruros en los pozos ubicados en la parte central de la ciudad, coincidiendo con la zona en donde se ha detectado un aporte de agua al acuífero procedente de las fugas de la red de distribución. El incremento salino aparentemente es debido al cloro que se añade al agua potable que se infiltra y alimenta al acuífero.

En los pozos localizados alrededor de la Sierra de Santa Catarina y en algunos de la porción central de la zona urbana se han detectado incrementos en fierro y manganeso, efecto que podría estar relacionado con el crecimiento de bacterias que incluyen al fierro dentro de su ciclo evolutivo.

La concentración salina es baja en los alrededores del área y se incrementa hacia la parte central, en forma similar a la dirección del flujo subterráneo. Una excepción se encuentra entre las Delegaciones Benito Juárez y Venustiano Carranza, donde el agua disminuye su contenido salino por dilución con agua de fugas de la red de distribución.

Un incremento notable en nitratos ha sido detectado en pozos ubicados en una franja paralela al pie de la Sierra de Las Cruces, el cual es ocasionado por la falta de drenaje en los lomeríos de esa porción.

Referencias

Lesser y Sánchez, *Informe sobre las actividades geohidrológicas en el Valle de México, 1985.*

- ¹ Este artículo contiene en forma resumida los trabajos realizados en los dos últimos años por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal, al cual se agradecen las facilidades prestadas para su divulgación.