

Hidrología e Hidrogeología en la cuenca de Chalco

Descripción y Perspectivas

Christophe Bouvier*, Emmanuel Didon*,
Henryk Niedzielski†, Rafael Huizar‡

Introducción

La zona de Chalco, situada en la periferia suroeste de la Cd. de México (véase ilustración 1), sufre desde hace una decena de años, una fuerte expansión demográfica y urbana. Este acelerado crecimiento ha dado origen a la realización del proyecto "Valle de Chalco: Medio Ambiente, Sociedad y Territorio", el cual fué llevado a cabo por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco y el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM), y fue financiado por la Comunidad Económica Europea.

Dentro de este proyecto, las investigaciones fueron orientados hacia el estudio y manejo de los recursos hídricos, los cuales constituyen actualmente uno de los factores de mayor importancia, no únicamente para la Cuenca de Chalco, sino también para la Cd. de México que se encuentra tan próxima.

Este trabajo presenta una síntesis de lo que se ha logrado dentro del proyecto, en los campos de Hidrología Superficial y Subterránea. La documentación completa se encuentra disponible para su consulta en los archivos de la UAM-Xochimilco en los siguientes trabajos y anexos:

Bouvier, Didon (1991); Huizar, Niedzielski (1990); Chávez y al. (1990).

Características de la Cuenca de Chalco

Morfometría y topografía

La Cuenca de Chalco cubre una superficie de 1,185 Km. Anteriormente, la parte inferior de esta cuenca estaba constituida por un lago con una superficie del orden de 100 Km y una

profundidad media de unos 2 metros. La salida de la cuenca estaba en la orilla oeste, cerca de Tláhuac, donde el excedente del lago se vaciaba en el lago vecino de Xochimilco. Desde el inicio del siglo XX se ha estado secando progresivamente el Lago de Chalco por el desvío de canales y bombas.

La zona de planicie se encuentra a una altura media de 2,240 m. Aguas arriba, encontramos una zona intermedia de bajo monte o piemonte, y luego montañas de origen volcánico que rodean la Cuenca. Los principales relieves son: al sur, la Sierra Chichinautzin; al este, la Sierra Nevada, donde los volcanes, Popocatepetl e Iztlazihuatl, culminan con más de 5,000 m de altura (véase ilustración 2).

Hidrografía

La Cuenca es drenada artificialmente en su parte inferior: una parte de los escurrimientos se drena por el oeste hacia el Lago de Xochimilco a través del Canal de Amecameca, y otra por el noroeste hacia el Lago de Texcoco a través del Canal de la Compañía. De esta manera, la cuenca topográfica de Chalco se divide artificialmente en sus subcuencas. La zona de planicie, cuya altura en la mayoría de los casos se encuentra por debajo de la de estos canales, es drenada artificialmente con bombas hacia cualquiera de ellos.

Los cursos de agua representados en la ilustración 2 son casi todos intermitentes. No es raro encontrar zonas endorreicas, como minas de tabicón por ejemplo, que pueden drenar superficies hasta de algunas decenas kilómetros cuadrados.

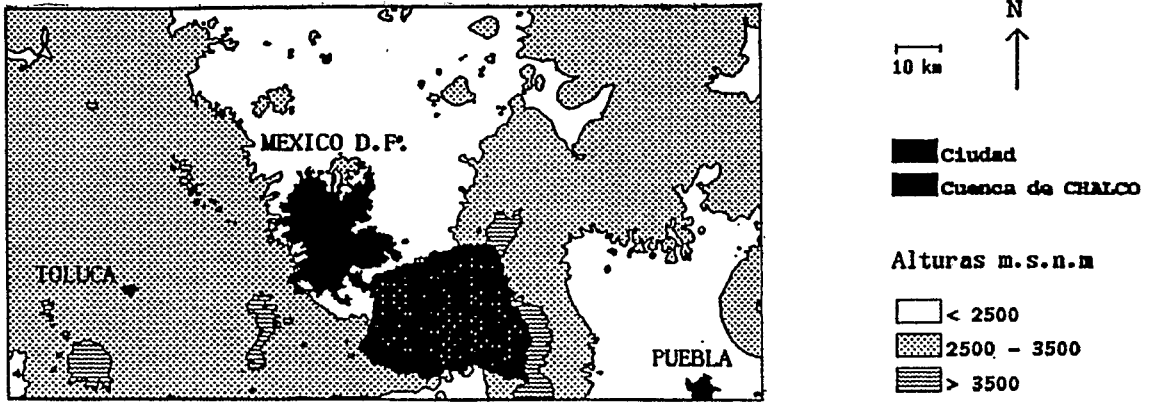
Uso del suelo

La cuenca de Chalco abarca 4 tipos principales de uso de suelo, vinculándose fuertemente con la altura (véase ilustración 3):

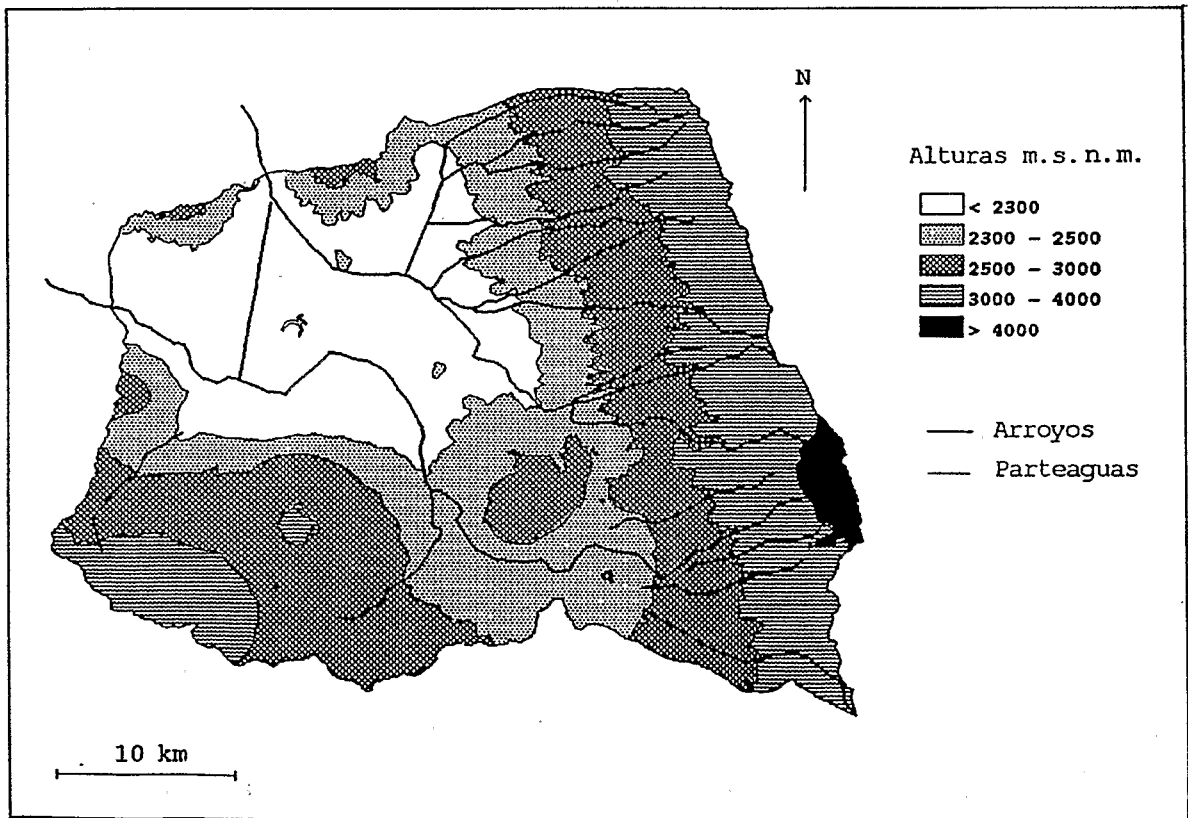
*ORSTOM.

†Departamento IPH, UAM-I.

‡Instituto de Geología, UNAM.



1. Ubicación de la Cuenca de Chalco.



2. Geomorfología de la Cuenca de Chalco.

- la *zona urbana* de Chalco, situada en la planicie, está constituida por el antiguo pueblo y una zona más reciente que se ha desarrollado desde hace unos diez años. Esta zona reciente se ubica sobre el fondo del antiguo lago, y cuenta ahora con más de 400,000 habitantes;
- la *zona agrícola* cubre una parte de la planicie y casi la totalidad de la zona pie monte, alcanzando alturas de 2,500 a 3,000 m. Aquí se encuentran principalmente cultivos de maíz, alfalfa, frijol y trigo. Algunas zonas se dedican también a la ganadería;
- la *zona forestal* representa la mayor parte de la zona montañosa, entre 2,500 y 4,000 m. En su mayoría son bosques de pinos, encinos y eucaliptos;
- la *zona de alta montaña*, arriba de 4,000 m no tiene vegetación, y los suelos son generalmente cubiertos con nieve.

De las cartas del uso del suelo del INEGI, escala 1:50,000, las proporciones del uso del suelo son 50% para la agricultura, 28% para los bosques, 12% para los pastizales. La zona urbana más grande es Chalco y además cuenta con unos treinta pueblos, siendo los más importantes: Amecameca, Milpa Alta, San Rafael, Ixtapaluca.

Cabe señalar que las últimas cartas de uso del suelo datan de 1977. Dada la evolución reciente de la cuenca, estamos buscando una evolución más precisa de las proporciones del uso del suelo, utilizando la teledetección e imágenes SPOT de 1986 y 1990. Estos resultados se publicarán al inicio de 1992 y precisarán la evolución sufrida de las zonas urbanas, agrícolas, de riego y de la cobertura vegetal entre los años 1977 y 1990.

Edafología

Los tipos de suelo se han estudiado de las cartas edafológicas 1:50,000 del INEGI. Los suelos principales son los Feozems (23%), los Andosols (19%), los Litosols (17%), y los Fluvisols (13%). Se encuentran también Solonchaks (4%) y Gleysols (3%), que se ubican en el lugar del lago antiguo.

En relación con la permeabilidad, hay que distinguir dos tipos de suelos: los Solonchaks

y los Gleysols de la zona de planicie, poco permeables, y todos los otros, muy permeables.

Geología

Desde el punto de vista geológico, el relieve de la Cuenca de Chalco está constituido por rocas volcánicas de las cuales se distinguen dos tipos principales:

- los basaltos y andesitas basálticas que forman las Sierras Chichinautzin y Santa Catarina;
- las andesitas y dacitas que integran las Sierras Nevada y de Río Frío.

El relleno de la planicie de Chalco reposa sobre un basamento del Cretácico Superior (Oviedo, 1970; PEMEX, 1986), conocido de la base de los pozos Texcoco no.1 a 2,065 m., Tulyehualco no.1 a 2,100 m. Encima, una sucesión de derrames de lava y productos piroclásticos y una secuencia de depósito fluvio-lacustre (Schlaepfer, 1968), (Mooser, 1975), (Huizar, 1989).

Desde el punto de vista tectónico, la actividad volcánica surgió a través de una red de fracturas de dirección E-W y NW-SE, originados por los movimientos tectónicos que formaron el sistema volcánico transversal (Mooser, 1975).

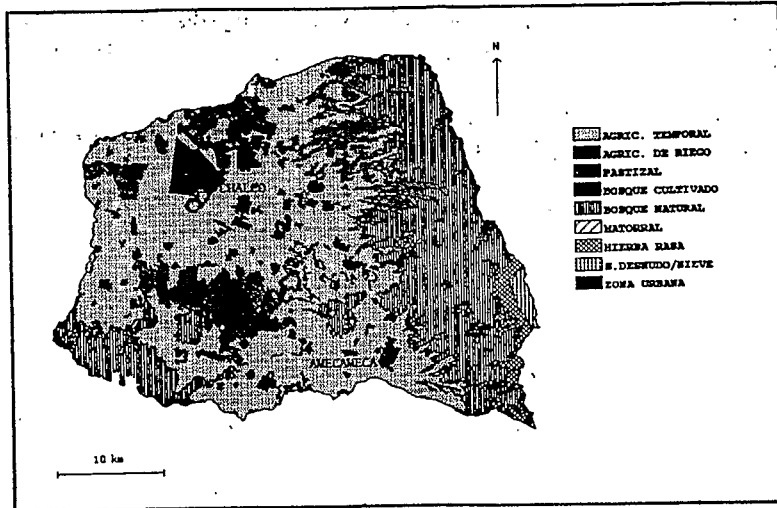
Climatología de la Cuenca

La cobertura de aparatos de medición climática en la Cuenca de Chalco consta de 15 estaciones (véase ilustración 4). Los datos que utilizamos se han integrado en un base de datos, que maneja el sistema Pluviom (Orstom, 1989a).

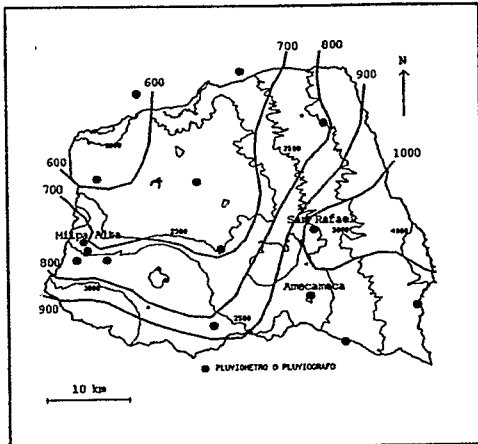
Precipitaciones

Las lluvias en la Cuenca de Chalco se caracterizan sobre todo por una variabilidad espacial muy grande: así los valores anuales varían en promedio de 600 a 1,100 mm. en el conjunto de las estaciones estudiadas. Estas variaciones dependen directamente de la altura. Además, por altura igual, las precipitaciones aumentan del oeste al este, según dos corrientes circulares periféricas que convergen hacia la zona de San Rafael. Tomando en cuenta estos efectos, proponemos un mapa de los isohietas anuales medias (véase ilustración 4), del cual sacamos una evolución de la lluvia anual promedio en la cuenca, 810 mm.

Los registros de lluvias anuales mas largos (San Rafael, 60 años, y Amecameca, 41 años) permiten

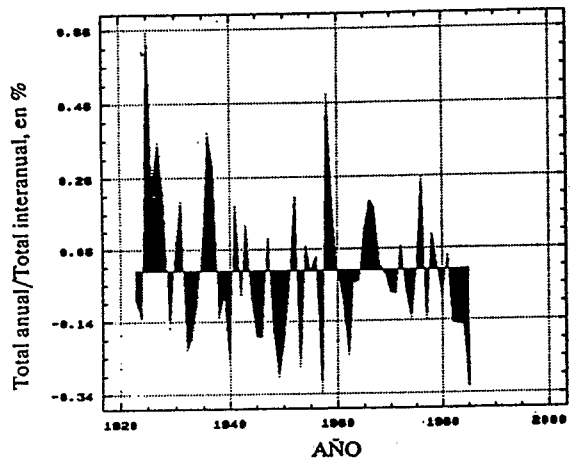


3. Uso del suelo en la Cuenca de Chalco.

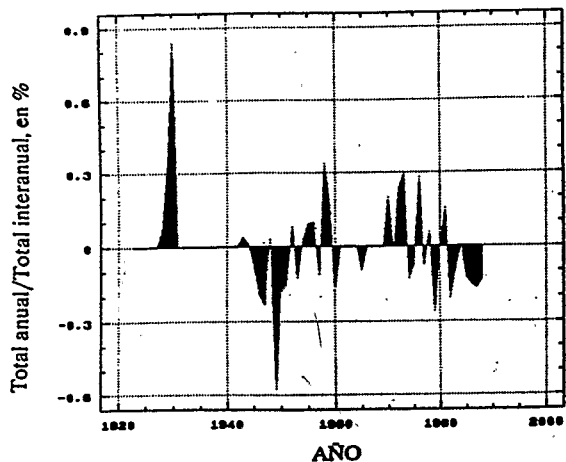


4. Pluviómetros e isohietas anuales en la Cuenca de Chalco.

Estación SAN RAFAEL



Estación AMECAMECA



5. Variaciones de las lluvias anuales.

caracterizar las variaciones cronológicas en la cuenca (véase ilustración 5): parece aleatoria la distribución de los años secos y húmedos. Sin embargo existe desde 1982 un periodo seco, que es el más largo que se ha podido observar hasta ahora: hay que observar con mucha atención la evolución de este periodo.

Durante el año, las lluvias definen tres temporadas: la lluviosa, que se presenta entre los meses de junio a septiembre, constituyendo los 71% de las lluvias anuales; la seca, entre los meses de noviembre a abril, conformando un 12% de la lluvia anual; y la de transición en los meses de mayo y octubre, que representa el 17% de la lluvia anual.

En el cuadro 1 se presentan resumidos los tratamientos estadísticos hechos a las lluvias

Frecuencia al no-rebasamiento						
	0.02	0.05	0.10	0.90	0.95	0.98
Periodo de revuelta (años)						
	50	20	10	10	20	50
P _{anual} (en milímetros)						
San Rafael	747	794	840	1380	1506	1669
Amecameca	723	756	789	1176	1266	1383
P _{max(24h)} (en milímetros)						
San Rafael				66	73	81
Milpa Alta				59	67	76

1. Ajustes estadísticos de las lluvias.

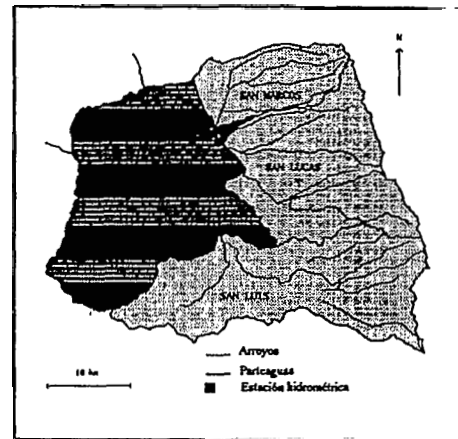
anuales y máximas diarias. En ambos casos, la distribución de Gumbel da ajustes e intervalos de confianza aceptables.

Climatología general.

La climatología de la Cuenca ha sido analizada en la estación Milpa Alta, que reúne datos de lluvia, temperatura, evaporación, evapotranspiración, humedad, horas de sol y vientos. El análisis de estos datos muestra dos ciclos distintos: la evaporación, las horas de sol y la humedad relativa son mínimas en septiembre (resp. 110 mm, 141 h y 46%) y máximas (202 mm, 263 h y 70%), mientras que la evapotranspiración y la temperatura son mínimas en enero (70mm y 12.7°C) y máximas en mayo (130 mm y 17.9°C). Los vientos dominantes vienen del sur, excepto durante los meses lluviosos en los cuales la dirección más frecuente es el noroeste. Cabe señalar que estos valores no deben ser considerados como representativos de la totalidad de la Cuenca: como lluvias, pues los efectos del relieve afectan mucho los datos climatológicos. Para una mejor evaluación, se utilizarán datos de la CNA, disponibles para las estaciones de la ilustración 4.

Hidrología en la Cuenca

El estudio de los regímenes hidrológicos se refiere a las tres subcuencas San Marcos, San Lucas y San Luis, cuyas superficies son a 123, 290 y 338 Km, respectivamente. Estas tres cuencas se ubican en la parte natural de la Cuenca de Chalco (véase ilustración 6). Recogimos para cada subcuenca registros de gastos horarios, proporcionados por la CNA. Los registros cubren



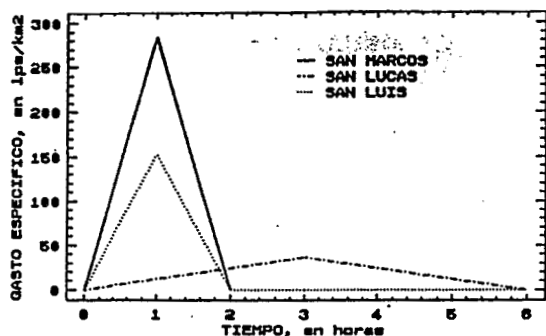
6. Ubicación de las subcuencas.

en promedio veinte años, desde el año 1960. Todos estos datos han sido integrados en una base de datos hidrométricos que maneja el sistema Hydrom (Orstom, 1989b).

Los gastos anuales promedios para las cuencas San Marcos, San Lucas y San Luis son 58, 197 y 165 lps respectivamente. Los coeficientes de escurrimiento anual son muy parecidos para las tres cuencas, siendo en promedio del orden de 2% de las lluvias.

En lo que se refiere a las avenidas, las características de las cuencas son mucho más distintas, según que se trate de San Marcos y San Luis o de San Lucas:

- para las cuencas San Marcos y San Luis, las avenidas encuentran su origen en escurrimientos superficiales que llegan rápidamente a la salida. No hay gasto permanente en San Marcos, y hay poco en San Luis. Los tiempos de acceso generalmente son inferiores a una hora. La duración característica de escurrimiento (definida como el tiempo durante el cual el gasto exceda la mitad del gasto de pico) es del orden de una hora. Evaluamos los gastos específicos de pico con periodo de retorno de 10 años como 284 lps/Km para San Marcos, y 152 lps/Km para San Luis. En este caso, la diferencia se explica probablemente por las formas espaciales de la red hidrográfica de las cuencas;
- para la cuenca de San Lucas, al revés, las avenidas son muy aplastadas, y la mayoría del escurrimiento corresponde a la existencia de un gasto base, poco variable en el



7. Avenidas-tipos con Q_{max} (10 años).

tiempo. Los tiempos de acceso exceden frecuentemente 3 horas, mientras que la duración característica de escurrimiento varía entre 2 y 3 horas. El gasto específico de pico con periodo de retorno de 10 años es de 36 lps/Km.

En la figura 10 representamos muy esquemáticamente avenidas asociadas con el gasto específico de pico, con periodo de retorno de 10 años, utilizando formas trianguladas por razones de conformidad: este esquema no es más que un medio para comparar los regímenes de avenidas en las 3 subcuencas, y para ilustrar las diferencias registradas.

En lo que se refiere al diseño de obras hidráulicas, estas diferencias tienen mucha importancia. Además, estas mismas diferencias limitan las posibilidades de extensión regional de los regímenes hidrológicos, aunque se podrían considerar estas 3 cuencas como representativas de una región bastante grande, incluyendo los Valles de México, Puebla, Toluca y otras partes del Altiplano Mexicano. Este estudio comprueba que no se pueden considerar así, por lo tanto, no se conoce el origen de aquellas diferencias.

Entonces, planteamos una nueva campaña de medición en 1991, con el objetivo de conseguir un mejor conocimiento de los regímenes hidrológicos de la Cuenca de Chalco, y de los factores que intervienen en la formación de las avenidas. Por eso decidimos seguir el estudio de las cuencas San Marcos y San Lucas, con la instalación de una red pluviográfica más densa en estas cuencas.

Condiciones Hidrogeológicas

Las condiciones hidrogeológicas en el Valle de Chalco, nunca han sido objeto de una investigación completa. De los datos fragmentarios existentes, como cortes litológicos imprecisos, resultados de aforo, piezometría, análisis químico del agua subterránea y geología superficial de la cuenca, se puede solamente deducir un modelo preliminar.

El área de la cuenca, desde el punto de vista geomorfológico, se puede dividir en términos generales, en planicie y montañas que la rodean. El relleno de la planicie constituye, en general, material granular de depósito fluviolacustres, en las laderas sur y norte predominan los basaltos del grupo chichinautzin, y en laderas orientales: las andesitas y dacitas en el material granular de tipo piemonte. Así pues, con relación al tipo de rocas, podemos distinguir tres acuíferos: el intergranular, en la planicie; el fisurado en las laderas sur y norte, y el mixto en las laderas orientales (véase ilustración 8).

El acuífero intergranular ocupa un área de 240 Km, limitada por la elevación 2,300 m.s.n.m. aproximadamente. El espesor del acuífero se desconoce, únicamente he sabido que hasta la profundidad de 400 m no se ha encontrado el sustrato impermeable. Así que, la zona saturada tiene un espesor mayor a 300 m.

El tipo Acuífero es parcialmente libre y parcialmente confinado. Como capa confinante funciona el primer estrato arcilloso, desde la superficie. El espesor del confinante, deducido por Niedzielski (1991) varía de menos 20 m a más de 58 m. En las zonas donde la capa arcillosa es delegada el nivel del agua es piezométrico. Desde hace muchos años el acuífero es objeto de explotación excesiva que se refleja en el continuo descenso del nivel del agua. El acuífero consta de sedimentos muy variados incluyendo rocas basálticas, por eso se debe considerar como heterogéneo y anisótropo. Sobre el coeficiente de permeabilidad horizontal determinado por el autor anteriormente, citado con base en los afloros de los pozos de 400 m de profundidad del ramal Sta. Catarina varía de 2.4×10^{-5} m/s a 1.3×10^{-4} , con el valor medio $k=5.45 \times 10^{-5}$ m/s, lo que se clasifica como permeabilidad mediana. La transmisividad según la clasificación de Krásny (1980) es alta y muy alta, debido al gran espesor del acuífero y varía de 7.4

$\times 10$ a 2.2×10 m/s. Consecuentemente los gastos de los pozos, por lo menos al inicio, han sido grandes, entre 150 y 174 lps con un abatimiento de 10 a 40 m. El gasto específico para un abatimiento de 1 m varía de 3.1 a 17.3 lps. El valor medio para el acuífero es de 7.5 lps. La porosidad efectiva media es de 0.144.

El *acuífero fisurado* de basaltos, desde el punto de vista científico es muy poco reconocido. Prácticamente se sabe que presenta un acuífero de grandes recursos y no sólo en la zona de Chalco, sino también en otras partes de la República (De O Carreño, 1957).

El *acuífero de basaltos* ocupa un área de la subcuenca de 265 km aproximadamente. El espesor del acuífero es desconocido. El nivel del agua, de los pocos datos que se pudieron conseguir, se deduce que está ligeramente inclinado de acuerdo con las vertientes. Esto significa que hacia la cima de las montañas crece rápidamente la profundidad del nivel del agua. Por eso la mayoría de los pozos que explotan el acuífero fisurado se ubican en las faldas de las montañas volcánicas. Es muy probable que anteriormente, en las condiciones naturales, al rededor del valle brotaban manantiales, los cuales desaparecieron como resultado de la explotación excesiva.

Desafortunadamente faltan los registros de las oscilaciones del nivel del agua en el acuífero fisurado. Se cuenta solamente con un piezómetro (No. 537) ubicado casi a la orilla sur del Valle (véase ilustración 8). Las oscilaciones en este piezómetro sugieren que el descenso del nivel del agua es menor que en acuífero intergranular. Según los resultados de aforo del pozo Xico 2, el coeficiente de permeabilidad K , vale 4.7×10^{-5} m²/s, la transmisividad, T , 0.02 m²/s y el caudal específico medio, q , 22.77 lps/m, lo cual indica la gran capacidad productiva del acuífero.

Esto lo confirman los caudales específicos de otros pozos perforados en los basaltos, tanto de la zona sur (San Luis, Milpa Alta, Tlachique), como en el norte (Sta. Catarina), aunque al parecer, a medida que pasa el tiempo, se reduce esa capacidad.

Por ejemplo, los 9 pozos perforados en las zonas mencionadas se caracterizan por su inmenso caudal específico medio, $q = 403$ lps/m, mientras que los 6 pozos perforados en la zona sur, entre 1982 y 1986 tiene un caudal específico medio de 31 lps/m.

Las conexiones hidráulicas entre los acuíferos intergranulares y fisurados no son claros, aun cuando se supone que la conexión es directa.

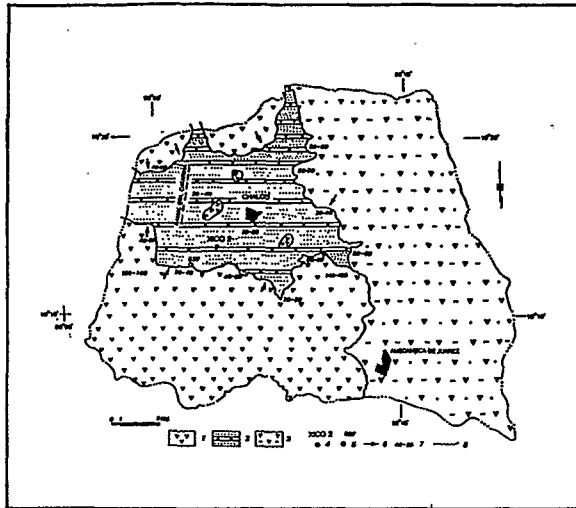
El *acuífero mixto* se presenta como una incógnita. Ocupa la mayor parte de la subcuenca, de la Sierra Nevada y de Río Frío escurren tres corrientes perennes: Amecameca, La Compañía y San Francisco. Indudablemente durante periodos de sequía, el agua que corre en estas corrientes tiene origen subterráneo, así, existen condiciones para almacenar el agua precipitada. También en los pies de dichas montañas existen pozos que atraen buenas cantidades de agua. Por eso se cree que existe importante escurrimiento subterráneo de Sierra Nevada y Río Frío hacia el Valle.

Ahora bien, considerando el problema del acuífero como un conjunto de los tres acuíferos: intergranular, fisurado y mixto, los cuales supuestamente tienen conexiones hidráulicas entre sí y sus recursos dependen de las condiciones climatológicas de la subcuenca, es muy probable que los acuíferos fisurados y mixtos se recargen únicamente por infiltración de lluvias, mientras que el acuífero intergranular también o quizá en mayor parte lo logra por escurrimiento subterráneo de los dos anteriormente mencionados. En las condiciones naturales de la infiltración directa de las precipitaciones y del escurrimiento superficial en el acuífero intergranular obstaculiza la capa de arcillas que cubre el Acuífero. Por esta razón, también, en la planicie del Valle se forman encharcamientos expuestos a intensiva evaporación lo cual aumenta significativamente las pérdidas en el balance de agua.

Piezometría

Uno de los elementos importantes que caracterizan el régimen del acuífero es el tipo de nivel del agua; (libre o piezométrico), su profundidad y sus oscilaciones durante el año. Desafortunadamente, los datos de nivel de agua sufren varias imprecisiones, debido tanto a la concepción de los pozos como a la metodología de toma de datos (Niedzielski, 1991). Sería conveniente para el futuro instalar más piezómetros (pero no multipiezómetros), y asegurar con más frecuencia y regularidad la toma de los datos.

Sin embargo, se estimó con base en 23 pozos pilotos, que el nivel del agua bajó continuamente con una velocidad media de 0.88 m/año durante un periodo de 1972 y 1987.



1. Acuífero fisurado en basaltos
2. Acuífero intergranular en el relleno de la planicie
3. Acuífero mixto en andesitas y material granular de piedemonte
4. Pozo
5. Multipiezómetro
6. Dirección del flujo
7. Profundidad del nivel del agua
8. Parteaguas

8. Esquemas hidrogeológico de la Cuenca de Chalco.

En el área de estudio existe también una red de piezómetros que consta de 12 pozos. En cada pozo perforado a percusión se han instalado de 5 a 8 piezómetros (multipiezómetros) que llegan a diferentes profundidades. De los 12 pozos en los cuales hay instalados piezómetros se pudieron seleccionar 7, donde los piezómetros más profundos reflejan supuestamente las oscilaciones del nivel de acuífero explotado. De los 7 multipiezómetros seleccionados, solamente uno, el No. 537 atraviesa el acuífero fisurado en basaltos y los demás están ubicados dentro de la planicie del Valle.

Los datos de siete piezómetros (véase cuadro 2), aunque no proporcionan suficiente material para el estudio estadístico, permiten hacer algunas conclusiones.

Supuestamente el régimen de las oscilaciones del nivel del agua en el acuífero intergranular y en el fisurado de basaltos es diferente.

En el acuífero intergranular en el periodo 1973-90 el nivel del agua desciende con una velocidad promedio de 1.08 m/año, es decir, más rápido de lo que indican los datos de los pozos productivos, probablemente menos confiables. El descenso se aceleró en los últimos años (1982-90) respecto al periodo 1972-82. En general, se estima que el nivel del agua en los 17 años bajó aproximadamente 19 m.

En el acuífero fisurado parece que el descenso 0.53 m/año es menor que en el acuífero intergranular. Aclarar esta situación sería importante, tanto desde el punto de vista práctico (mejor ma-

nejo del Acuífero) como científico (determinar las relaciones hidráulicas entre dos acuíferos).

Química del agua subterránea

De los pozos en explotación existentes en el Valle de Chalco fueron seleccionados alrededor de 60 para el muestreo del agua subterránea.

El muestreo para análisis físicos-químicos se efectúa periódicamente y no siempre en los mismos pozos.

La confiabilidad de los análisis químicos proporcionados por la Gerencia de Aguas del Valle de México, fue verificada de acuerdo a los criterios siguientes:

a) Comparando suma de aniones (an) con suma de cationes (cat) según la fórmula:

$$\text{Error (\%)} = 200(\text{an} - \text{cat})/(\text{an} + \text{cat}) \quad (1)$$

b) Comparando sumas de los aniones y cationes en mg/l con residuo seco según la relación:

$$\begin{aligned} \text{Residuo seco} + 0.5 \text{ HC03} = \\ \text{suma de aniones y cationes} \end{aligned} \quad (2)$$

Si en alguno de estos dos casos el error fue mayor a 10% se consideraba el análisis como inválido. Finalmente, conservamos 32 análisis que cubren los años 1977 (4 muestras), 1984 (13

Profundidad en m				
Acuífero	NºPozo	1973	1982	1990
Intergranular				
	519	18.0	23.6	39.3
	520	27.6	36.4	45.5
	521	9.3	15.7	19.2
	524	50.4	56.7	63.7
	526	2.3	23.2	32.6
	554	23.9	32.3	40.9
Fracturado				
	537	14.5	22.1	23.6

2. Piezometría en Chalco.

muestras), 1985 (6 muestras), 1986 (2 muestras) y 1990 (7 muestras).

En general, el agua de mayor mineralización, por encima 500mg/l, proviene de los pozos ubicados dentro de la Planicie.

Los pozos ubicados en las laderas del Valle que captan por lo general el agua del acuífero fisurado o del mixto, se caracterizan por su baja mineralización, comúnmente como agua ultradulce (mineralización general menor de 200 m/l).

El agua de alta mineralización, desde el punto de vista de los iones dominantes, presenta una amplia variedad en su composición química de biónica $\text{HCO}_3\text{-Na}$ y $\text{HCO}_3\text{-Mg}$; a través de triónica $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ y cuatriónica: $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Mg}$ o $\text{HCO}_3\text{-Na-Mg-Ca}$ hasta a multi-iónicas.

Según la clasificación de Alekin (Pazdro, 1983) doce muestras representan el agua de clase bicarbonatada (C); de grupo sódica (Na) y del tipo I, el cual se caracteriza con la relación:

$$r\text{HCO}_3\text{-} > r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+} \quad (3)$$

Este tipo de aguas se forman en las rocas ricas en minerales que contienen Na y K. En nuestro caso, la fuente de sodio y potasio podrían ser numerosas lentes de arcillas que aparecen en el acuífero intergranular, sin embargo, hay otros índices que ponen en duda esta conclusión.

Salta a la vista el hecho sorprendente de que casi en todas las muestras domina el ion Mg^{2+} sobre el Ca^{2+} . La fuente de magnesio en el

Valle de Chalco pueden ser los minerales como: biotite, piroxeno y olivio, existentes en rocas basálticas, también en estos casos por lo general el contenido de Mg^{2+} suele ser bajo y en aguas dulces no supera 40 mg/l (Matthess 1982, p.240), mientras que en Chalco tenemos muestras donde el contenido de magnesio alcanza hasta 181.9 mg/l y la dominación del Mg^{2+} sobre el Ca^{2+} llega a ser hasta de 6 veces.

Por último, la presencia de amoníaco en grandes cantidades (76 mg/l) y nitrato, no dejan lugar a dudas de que se trata de agua fuertemente contaminada. Se puede suponer que la principal fuente de contaminación son las aguas negras locales e importadas del Distrito Federal, aunque no se puede excluir alguna otra fuente.

Por ejemplo, una de las muestras representa el agua de la clase sulfatada de grupo Mg y de tipo III, el cual se caracteriza por:

$$r\text{Cl}^- > r\text{Na}^+ \quad (4)$$

Según Alekin este tipo pertenece a las aguas de los océanos y mares, o a las subterráneas conatas, metamorfizadas. No se trata de ninguno es estos casos.

Lo mismo sucede cuando se analizan los índices hidrogeoquímicos:

$$r\text{Na} + r\text{Cl}^- \text{ y } r\text{SO}_4^{2-} / r\text{Cl}^- \quad (5)$$

En general, ellos indican que las aguas subterráneas son contemporáneas, bien relacionadas con la infiltración de lluvias, aunque existen casos confusos cuando un índice es característico para el agua subterránea somera y el otro a la vez para aguas conatas. Estas anomalías fortalecen la convicción de que se trata de agua contaminada o existen algunos errores analíticos.

Las muestras del agua de los pozos localizados fuera de la planicie aunque se caractericen por tener mineralización general menor de 500 mg/l, y en varios casos llega apenas a 140 mg/l, sin embargo, muestran la semejanza de anomalías con las muestras de los pozos ubicados en el centro del Valle.

Con base en los datos citados no se puede resolver los problemas del origen del agua subterránea en el Valle de Chalco. El muestreo y análisis químico se efectúa para tener control general sobre la calidad del agua y no para investigar. Por

eso las conclusiones sobre hidroquímica se deben hacer con mucha precaución.

En general, se puede decir que en el centro del Valle donde se encuentra el acuífero intergranular, el agua subterránea está altamente contaminada y muchos aniones y cationes sobrepasan las normas de calidad del agua. Es posible que las fuentes de contaminación sean los canales y encharcamientos de aguas negras, aunque faltan datos concretos al respecto.

Al parecer que en la orilla del Valle donde no hay ni canales ni encharcamientos y especialmente donde se extrae el agua directamente del acuífero en basaltos, la calidad del agua es mucho mejor, por lo menos desde el punto de vista de la mineralización general. Sin embargo, también en estas aguas se encuentran huellas de contaminación como son la presencia de nitratos, fosfatos y superación de magnesio en calcio. No es claro si estos contaminantes son locales o provienen del centro del Valle.

Conclusión

La evolución reciente de la Cuenca de Chalco (cambios en la urbanización, en las zonas agrícolas y forestales), y su proximidad con la Ciudad de México son las principales razones para cuales se inició el estudio sobre el recurso agua. Este primer trabajo ha logrado recoger y analizar los datos disponibles relativos a la geografía, la climatología, la hidrología y la hidrogeología de la Cuenca. Así se puede dar una primera evaluación del recurso agua, tanto superficial como subterráneo.

En lo que refiere a la hidrología de la Cuenca, tres subcuencas de la zona rural han sido analizadas, con superficies de 120 a 330 Km. Para cada subcuenca se puede ver que la parte del escurrimiento en el balance anual está cerca de 2% de las precipitaciones, mientras que en el mismo porcentaje se evaluó a 9% en la totalidad de la Cuenca de México (DGCOH, 1982). Más variables son las características de las avenidas, relativamente a los tiempos de acceso y los gastos de pico: en términos de gastos específicos de pico con periodo de retorno de 10 años, conseguimos así valores que varían entre 36 y 284 lps/km². La investigación está continuando para aclarar estas diferencias y para proponer un método regional de predicción de las características de las

avenidas. Por eso, se hicieron nuevas mediciones hidropluviométricas en el transcurso de 1991.

En la hidrogeología de la Cuenca el estudio subraya el descenso local del nivel piezométrico de la capa freática explotada. La velocidad promedio de dicho descenso se puede evaluar a 1 m/año en la zona de planicie entre 1973 y 1990. A pesar de la importancia de esta conclusión, las características hidrogeológicas de la Cuenca resultan muy poco conocidas, y por esta razón es muy difícil proponer un modelo de funcionamiento de la recarga subterránea. Entonces, se hace patente la necesidad de conseguir medios de investigación mucho más amplios entre cuales la instalación de una red de piezómetros es prioritaria, para un mejor conocimiento de la estructura geológica de los acuíferos, sus parámetros geométricos, hidráulicos, conexiones hidráulicas, capacidad productiva y efectos de sobreexplotación, incluyendo el posible hundimiento del terreno.

Agradecimientos

Nos es grato expresar nuestro agradecimiento a los servicios de la Comisión Nacional del Agua (CNA): Gerencia de Aguas del Valle de México, y Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, quienes pusieron a nuestra disposición los datos requeridos para este estudio.

Referencias.

- Bouvier, C. y E, Didon. *Recursos Agua en la Cuenca de Chalco - Hidrología en la Cuenca de Chalco*. UAM-Xochimilco, ORSTOM, 1991, p. 61, [inédito].
- Chavez, J.M. *Diagnóstico ambiental de la Cuenca de Chalco*. UAM-Xochimilco, ORSTOM, 1990, p. 91, [inédito].
- DGCOH. *El sistema hidráulico del Distrito Federal*. Un servicio público en Transición. DDF-SOS.1982.
- Huizar, R. *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la plaine de Chalco-Amecameca y de son Bassin Versant*. Thèse Doctorat, Université Franche-Comté, 1989, p. 158.
- Huizar, R. y H. Niedzielski. *Hidrogeología de la Cuenca de Chalco*, UAM-Xochimilco, ORSTOM, 1990, p. 58, [inédito].

De O Carreño, A. *Las provincias geohidrológicas de México*. Bol. Inst. Geol. UNAM, 56, 1951, p. 137.

Krásny, Y. *New concepts of synthetic hydrogeological maps*. Vert. Ustr. Inst. Geol. Praha, 55, 1, 1980, p. 53-62.

Matthess, G. *The properties of groundwater*. John Wiley and Sons., 1982, p. 406.

Mooser, F. "Historia geológica de la Cuenca de México". *Sistema de drenaje prof. del Distrito Federal*, México D.F., Dpto del D.F.T, 1975, p. 7-38.

Niedzielski, H., *Sección hidrogeológica a través del Valle de Chalco, México*. Geof. Inter., [en prensa].

Orstom. *Pluviom, un logiciel de gestion des données pluviométriques*. Ediciones del Orstom, 1989a, 187p.

Orstom. *Hydrom, sistema de banco de datos hidrométricos*. Ediciones del Orstom, 1989b, 96p.

Oviedo, D.L.A. El conglomerado Texcoco y el posible origen de la Cuenca de México. Rev. Inst. Mex. Petrol., 1970, p.5-20.

Pazdro, Z. *Hidrogeología ogolna*. Wyd Geol. Warszawa, 1983, p. 575.

Schlaepfer, C. *Resumen de la geología de la Hoja México D.F. y Estados de México y Morelos*. Inst. Geol. UNAM, 1968.