

**ESTUDIO GEOELECTRICO DEL SISTEMA ACUIFERO
DE LA CUENCA DE MEXICO**

R. RODRIGUEZ C.*
C. OCHOA A.**

RESUMEN

La parametrización geoelectrica de un sistema acuífero con un marco geológico complejo como el de la Cuenca de México, donde predominan dos grupos geoelectricos cuyos rangos resistivos dificultan la identificación geológica de sus componentes, requiere de una buena correlación entre la estratigrafía y los valores resistivos.

La Cuenca está definida por un paquete sedimentario (depósitos lacustres, aluviones, cenizas, arenas, gravas) en un contenedor de material ígneo (basaltos, riolitas, dacitas).

En el área de estudio, con una superficie de más de 9 000 km², fueron caracterizadas geoelectricamente doce unidades geológicas relacionadas con el acuífero, a través de un macroperfil geoelectrico W-E integrado por 70 sondeos eléctricos verticales SEV's, con distancias electródicas AB = 1.2, 1.6 y 2.0 km, distribuidos en la parte central-norte de la Cuenca.

ABSTRACT

The geoelectrical characterization of an aquifer system with a complex geological framework such as the Basin of Mexico requires a good correlation between the stratigraphy and the resistivity values. Two geoelectric groups prevail, whose resistivity ranges difficult the geological identification of its components.

* Instituto de Geofísica, UNAM, MEXICO.

** Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, MEXICO.

The basin fill is composed of sedimentary material (lacustrine sediments, alluvia, ashes, sands and gravels) within a container of igneous material (basalt, rhyolite, dacite).

In the study area 12 geological units, all of them related to the aquifer system, were characterized geoelectrically. This was achieved through a geoelectrical profile W-E consisting of 70 VES's with electrodistances AB = 1.2, 1.6 and 2.0 km. The VES's were distributed in the central part of the basin investigated along 105 km.

INTRODUCCION

Una de las alternativas más rentables para el futuro abastecimiento de agua en una de las más grandes metrópolis, la ciudad de México, depende del conocimiento que se tenga del agua subterránea en la Cuenca de México. Esto implica dos situaciones en las que los métodos eléctricos juegan un papel importante: el proceso de modelación matemática, que requiere de la geometría del sistema para poder predecir la evolución espacial y temporal de un acuífero complejo; la localización y diseño de pozos de producción.

En la primera es necesario conocer la distribución de las unidades geológicas y definir condiciones de frontera; en la segunda, la profundidad y espesor de las formaciones saturadas. Para una real contribución de los métodos, en estos problemas es necesario modelar los sondeos eléctricos verticales con algoritmos eficientes y adecuada información geológica (litología, secciones geológicas) y/u otra clase de datos geoelectrónicos (registros eléctricos en pozos, tablas con los rangos resistivos de las formaciones geológicas de la zona en estudio).

En general no es fácil obtener tablas con rangos resistivos locales, sobre todo en países en vías de desarrollo, donde el papel de la prospección geofísica es poco entendido y por lo tanto, escasamente incorporado a estudios hidrogeológicos, siendo los métodos eléctricos los de más amplia implementación, aunque sus resultados son limitados ya que pocas veces se puede pasar de una sección geoelectrónica a una geológica.

Los rangos resistivos de las principales unidades geológicas sedimentarias de carácter acuífero son muy similares, dificultando su identificación geológica. Los sistemas acuíferos desarrollados en medios arcillosos con distintos grados de saturación (debido a la variación de granulometría y cementación de los sedimentos) con aguas de diferente mineralización, poseen un comportamiento conductivo poco diferenciable, con valores resistivos entre 5 - 50 ohm-m, lo que significa un corto y bajo rango resistivo para un amplio repertorio de rocas sedimentarias. Por otro lado, las rocas

ígneas presentan tendencias inversas, esto es, pueden poseer un rango amplio y alto (100 - 3 000 o más ohm-m) para pocos tipos de roca; la variación depende básicamente del grado de fracturamiento y de la mineralización del agua saturante. La Cuenca de México presenta este cuadro geoelectrico.

MARCO GEOLOGICO DE LA CUENCA DE MEXICO

La cuenca de México está localizada en la parte central del Eje Transvolcánico Mexicano a una altitud promedio de 2 000 m.s.n.m. y un área aproximada de 9 000 km², de los cuales 2 400 corresponden al área urbana.

Es una cuenca endorreica de tipo tectónico-volcánico que albergó un sistema lacustre en el centro y sur. Está limitada al sur por la Sierra de Chichinautzin, al norte por la Sierra de Pachuca que la separa de la Cuenca de Tula, al este por la Sierra Nevada y al oeste por la Sierra de Las Cruces que también define a la Cuenca de Toluca.

La geología de la Cuenca está compuesta básicamente de rocas volcánicas (que definen el contenedor) y sedimentos de origen lacustre. Las primeras fueron originadas por varios aparatos volcánicos en diferentes períodos de actividad. Encontramos rocas del Mioceno-Pleistoceno (andesitas, dacitas, riocitas) en la Sierra de Las Cruces y Nevada y en el Cerro Ajusco; del Plioceno-Pleistoceno (basaltos, andesitas) en el núcleo de la Sierra de Santa Catarina; del Cuaternario (basaltos, andesitas) en la Sierra de Chichinautzin. En el entorno de las Sierras existen alternancias de derrames lávicos, piroclastos y cenizas.

Los sedimentos presentes en la Cuenca son de origen volcánico y lacustre, encontrándose en los márgenes de la Cuenca sedimentos de ambos tipos interdigitados, disminuyendo los primeros y aumentando los segundos hacia las partes centrales de la Cuenca.

El paquete granular más antiguo y profundo corresponde a piroclastos del Plioceno que se encuentran a 100 - 200 metros de profundidad en la mayor parte de la Cuenca. Generalmente les sobreyace la formación Tarango constituída por abanicos aluviales, conglomerados, pómez y suelos del Oligoceno-Mioceno con piroclastos del Plioceno.

La Formación Becerra, que también aparece en las partes superficiales, la definen

aluviones, suelos limonítico-arcillosos, fragmentos líticos, calizas y areniscas lacustres marginales de diversa composición.

En la zona centro-NW se encuentran sedimentos lacustres formados por material arcilloso con intercalaciones de ceniza volcánica, pómez y arenas. En los sedimentos del vaso del ex-lago de Texcoco se ubica la llamada "capa dura", que corresponde a depósitos tobáceo-arcillosos, producto de un evento volcánico. Hacia las márgenes se encuentran sedimentos aluviales consistentes de material piroclástico de acarreo escasamente re TRABAJADO e interdigitado con aluviones y cenizas volcánicas recientes.

EL SISTEMA ACUIFERO

La Cuenca de México se encuentra dividida superficialmente en once subcuencas (Xochimilco, Cuautitlán, Texcoco, Tochac, Churubusco, Pachuca, Chalco, Tecomulco, ciudad de México, Teotihuacan, Apan), siendo además compartida por cinco entidades políticas (los Estados de Hidalgo, México, Tlaxcala, Puebla y el Distrito Federal).

El contenedor impermeable lo constituyen rocas volcánicas y calizas, en tanto que el paquete sedimentario da origen a un sistema acuífero complejo formado por tres grandes cuerpos: en la parte superior, un paquete arcilloso de alta porosidad, baja permeabilidad y gran heterogeneidad en su constitución, que forma un acuitardo de espesor variable y que actúa como semiconfinante en el centro de la cuenca, jugando un papel muy importante, en este contexto, la capa dura por su carácter permeable; bajo este paquete se encuentra el acuífero actualmente en explotación, formado por material granular más grueso que el del acuitardo, esto es, piroclastos, conglomerados y otro tipo de material de origen volcánico. Su espesor es variable (generalmente mayor de 200 m) así como sus propiedades hidráulicas; le subyacen rocas volcánicas fracturadas, cuya base llega a estar a los 2 000 m en el centro, disminuyendo hacia las márgenes de la Cuenca.

Las tres unidades presentan un amplio rango en sus parámetros hidrodinámicos (permeabilidad, coeficiente de almacenamiento, transmisibilidad) (Lesser, 1984). Están comunicadas hidráulicamente, sobre todo las dos últimas. La interrelación de la primera con la segunda ha quedado demostrada por la subsidencia que afecta a la ciudad de México.

Este multiacuífero es recargado por infiltraciones de la precipitación, actuando como áreas de recargas más importantes las sierras circundantes. La precipitación media anual varía entre 600 mm en el norte de la Cuenca hasta más de 1 200 mm en las sierras del Sur. El régimen de flujo es controlado por la extracción, la cual es del orden de 50 m³/s, a través de más de 27 000 obras hidráulicas, predominando pozos con profundidades menores o iguales a 100 m. La extracción de agua subterránea de la Cuenca representa cerca del 80% del abastecimiento. En el período 1960 - 1980 los niveles piezométricos tuvieron una evolución negativa, del orden de 5 - 8 m en el centro de la zona metropolitana a más de 30 m en el área de Atzacapotzalco.

La mineralización del agua subterránea oscila entre 200 - 400 mg/l de sólidos totales disueltos (Lesser, 1986), con excepciones locales que van de 1 200 mg/l, en la Colonia Agrícola Oriental, a más de 20 000 mg/l en Sosa Texcoco.

MACROPERFIL GEOELECTRICO W-E

En la porción central-norte de la Cuenca (figura 1) se definió un perfil geoelectrico al integrar 70 sondeos eléctricos verticales SEV's distribuidos en ocho líneas (ECASA, 1983, IGF-UNAM, 1987 y 1988). Los SEV's cubren una distancia de investigación de 105 km. El dispositivo electródico implementado fue el de Schlumberger.

El procesamiento de la información geoelectrica consistió en el análisis morfológico de las curvas SEV's a fin de adecuar un criterio uniforme para el manejo de traslapes y obtener la curva continua para su interpretación. Se elaboraron también seudosecciones de resistividad aparente. Los SEV's fueron interpretados mediante un programa basado en el algoritmo propuesto por O'Neil que considera un modelo unidimensional estratificado.

El macroperfil se dividió en tres perfiles constituidos, respectivamente, por 4, 2 y 3 secciones (figuras 2 y 3). Esta división se efectuó con base en los cambios relativos de dirección del macroperfil. Los perfiles se muestran en forma isométrica y consideran el relieve topográfico.

La correlación geológica de los perfiles geoelectricos se logró mediante la asociación de rangos resistivos con la estratigrafía de pozos del área. Fueron analizados también registros eléctricos en pozos y análisis químicos de muestras de agua del sistema acuífero.

PERFIL ZUMPANGO-HUEHUETOCA

Al inicio del perfil se detectó (figura 2) un paquete de material granular con un espesor medio de 120 m en tanto que entre los SEV's 8 y 16 se evidenció un derrame de basalto cuyo espesor oscila alrededor de los 30 m y que puede tener carácter de confinante a semiconfinante. Se asocia a la formación El Pino. Entre los SEV's 14 y 18 se encontró otro derrame basáltico de mayor espesor que el anterior y con el mismo carácter hidráulico, relacionándose éste con el Cerro Chiconautla. El acuífero lo forman piroclastos del Plioceno que subyacen a estas capas superiores, siendo aquéllos de grano fino al inicio y final del perfil y de grano grueso en el centro.

En la zona inferior se identificaron grandes cuerpos ígneos del Mioceno con una interrelación de bloques y piroclastos de la misma edad. Por su carácter resistivo (180 - 250 ohm-m) se infiere que en la parte superior deben estar fracturados y por lo tanto, parcialmente saturados.

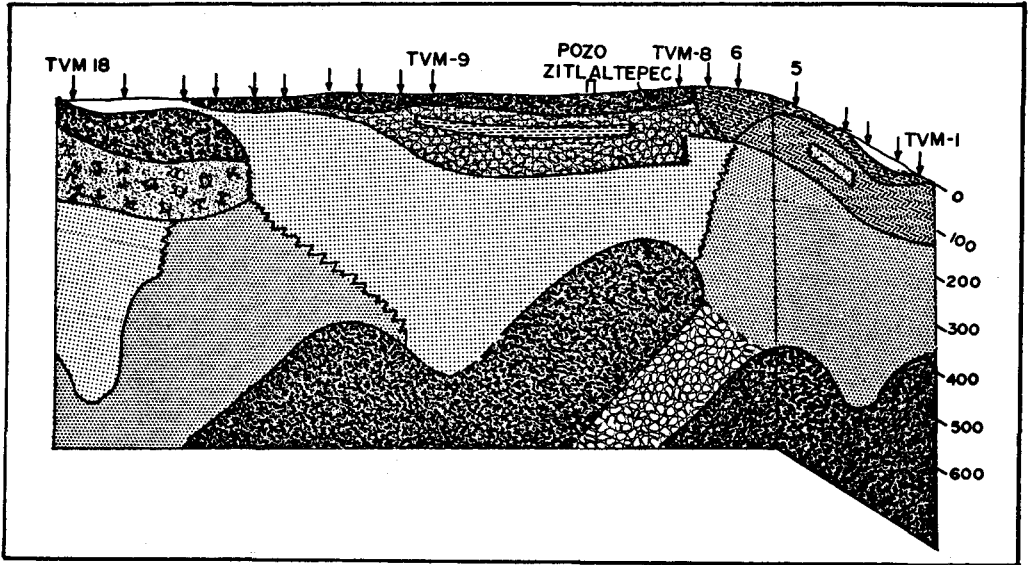


Fig. 2. Sección isométrica perfil Zumpango-Huehuetoca.

PERFIL OTUMBA-TECAMAC

El derrame basáltico asociado al Cerro Chiconautla (Ruiz, 1988) se continúa hasta la estación 25 aumentando su espesor hasta más de 200 m.

En la parte central superior se encuentran tobas saturadas subyaciendo a paquetes limo-arcillosos resultado de los procesos de sedimentación de remanentes del Lago de Texcoco. Al final del perfil se detectó una formación ígnea (lavas fenobasálticas del grupo Chichinautzin), de resistividad variable debido a su grado de fracturamiento (figura 3).

Las tobas superiores y los piroclastos del Plioceno constituyen el acuífero principal. Los piroclastos se extienden a todo lo largo del perfil, siendo la capa superior de grano grueso y de grano fino la inferior. En la parte central-inferior se encontró un cuerpo ígneo del Mioceno, de carácter intrusivo.

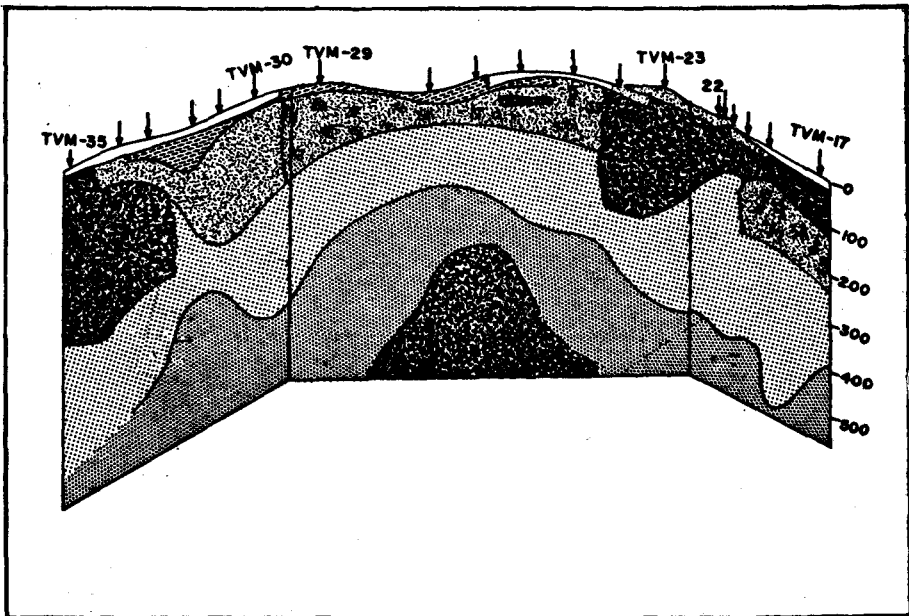


Fig. 3. Sección isométrica. Área: Otumba-Tecamac.

PERFIL OTUMBA-APAN

En la primera sección del perfil predomina una serie de derrames basálticos (sanos y fracturados) que descansan sobre piroclastos del Plioceno, que son los que constituyen el acuífero principal (figura 4).

En la sección central el acuífero es definido por piroclastos del Plioceno Inferior con predominio de material de grano grueso (arenas, gravas, pómez) de la Formación Calpulalpan. Inmerso en este paquete se detectó un derrame de basaltos fracturados con interdigitaciones de escoria cuya probable fuente de emisión fue el Cerro Zon-tepec.

Los piroclastos del Plioceno de la parte inferior se encuentran localmente intrusio-nados por el centro emisor del gran cuerpo ígneo descrito al inicio del perfil.

En la tercera sección del perfil se encuentran, en las capas superiores, sedimentos aluviales, predominando a la altura de los SEV's 56 - 64 arcillas con arenas y tobas, en tanto que hacia el final del perfil, las arcillas se encuentran más limpias. En las in-mediaciones del SEV 58 se detectaron basaltos fracturados del Cuaternario de la Formación El Pino, cuya fuente de emisión fue el Cerro San Pedro.

La formación acuífera definida por los piroclastos del Plioceno se encuentra intru-sionada por derrames ígneos cuya geometría fue controlada por los eventos volcáni-cos que le dieron origen; se asocia a andesitas del Plioceno, siendo su centro emisor el Cerro San Pedro.

PARAMETRIZACION GEOELECTRICA

El proceso de correlación geológica-geoeléctrica permitió asociar rangos resistivos a unidades geológicas, lográndose parametrizar resistivamente doce de ellas.

Los resultados de esta parametrización se resumieron en la Tabla 1. La amplitud de los rangos resistivos de algunas unidades está en función del origen de la Cuenca, ya que los diferentes períodos de actividad volcánica ocurridos desde el Terciario han originado que, hacia las márgenes de la Cuenca, se interdigiten rocas sedimentarias con ígneas, teniendo las primeras una granulometría variable y las segundas di-versos grados de fracturamiento. El carácter tectónico-volcánico de la Cuenca ha

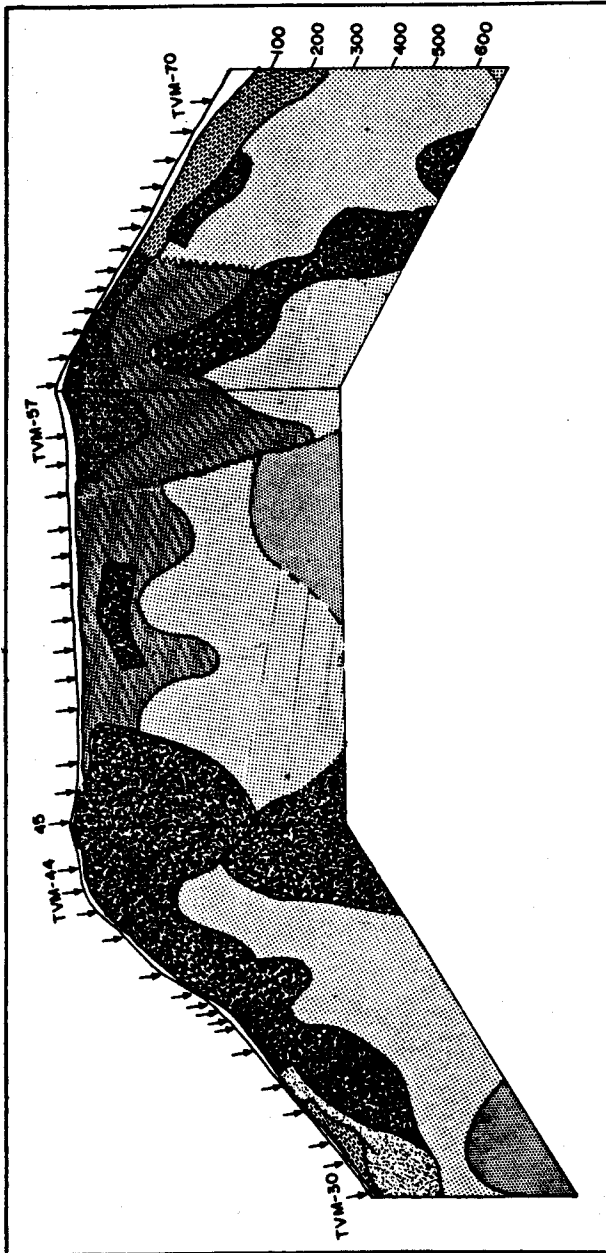


Fig. 4. Sección isométrica. Área: Otumba-Apan.

provocado que los procesos sedimentarios (sedimentación lacustre, acarreo, erosión) se enmarquen en una irregular distribución espacial y temporal. Los sedimentos de la zona presentan, sólo de manera local, una estratigrafía regular. Por lo general su geometría es controlada por la topografía del ambiente de sedimentación y ésta a su vez por la tectónica regional.

La arcilla de la Cuenca está relacionada con procesos lacustres, presentando una resistividad de 18 - 19 ohm-m en las zonas de Otumba, Teotihuacan y Apan con máximos locales de hasta 30 - 32 ohm-m cuando se encuentran mezclados parcialmente con tobas. El rango resistivo de los aluviones (10 - 37 ohm-m) presenta valores representativos de 15 - 17 ohm-m en la mayor parte de la Cuenca, con máximos de 28 - 30 en la zona de Irolo y Apan, en donde se encuentran alternados con cenizas y piroclastos finos de origen volcánico.

Los sedimentos con mayor resistividad en el área son las arenas basálticas, saturadas con agua de baja mineralización, 65 - 85 ohm-m. La compactación de las mismas provoca variaciones en la saturación y, en consecuencia, en su carácter resistivo.

Las capas formadas por arenas, gravas y pómez ofrecen un rango resistivo de 12 - 16 ohm-m, no pudiéndose determinar el por qué de su carácter conductivo, ya que se encontraron saturadas con aguas de baja mineralización (300 - 400 mg/l), lo que les daría una resistividad media de 30 - 40 ohm-m.

Las rocas ígneas presentan un amplio rango resistivo (50 - 3 000 ohm-m), con mínimos de 48 - 70 en la zona de Otumba, debiéndose su conductividad al intenso fracturamiento y alta saturación con agua de buena calidad. La alternancia de bloques sanos con cenizas y/o escorias da lugar a resistividades de 200 - 450 ohm-m.

Los basaltos sanos, esto es, no alterados, presentaron valores resistivos de 500 a 3 000 ohm-m, con máximos en la zona de Teotihuacan. Las andesitas ofrecieron resistividades menores que los basaltos, definiéndose mínimos de 100 ohm-m en la parte superior de un cuerpo andesítico de Apan, debido a su fracturamiento, aumentando la resistividad hasta 330 a medida que disminuyó aquél.

Los piroclastos del Plioceno presentan un rango resistivo de 10 - 55 ohm-m, correspondiendo los mínimos de 10 - 14 ohm-m a los constituídos por material de grano fino que se encuentran por lo general subyaciendo a los integrados por material de grano grueso cuyos valores oscilan entre 25 - 55 ohm-m. Los piroclastos del Mio-

Tabla 1

Valores representativos de las formaciones geológicas relacionadas con unidades acuíferas.

ROCA	RANGO	UBICACION
Arcilla	8-16 Ω -m 19-30 Ω -m 18-32 Ω -m	HUEHUETOCA-ZUMPANGO OTUMBA-TEOTIHUACAN APAN
Arenas, Gravas Pómez	12-16 Ω -m	HUEHUETOCA
Arenas, Tobas Arcillas, gra- vas	4-20 Ω -m 30-35 Ω -m 60-66 Ω -m	HUEHUETOCA IROLO-APAN APAN
Aluviones	10-24 Ω -m 17-31 Ω -m 15-28 Ω -m 12-24 Ω -m 16-37 Ω -m 8-17 Ω -m	TEOTIHUACAN OTUMBA-PACHO2 IROLO APAN ZUMPANGO HUEHUETOCA
Limos	16-38 Ω -m	ZUMPANGO-TECAMAC
Arenas Basal- ticas	62-85 Ω -m	ZUMPANGO-HUEHUETOCA
Basaltos (sanos)	500-3000 Ω -m 3000 Ω -m	PACHO2 TEOTIHUACAN
Basaltos (frac- turados)	119-455 Ω -m 151-400 Ω -m 300 Ω -m 200-585 Ω -m 48-70 (saturados) 132-230 Ω -m	ZUMPANGO-HUEHUETOCA ZUMPANGO-TECAMAC-TEO- TIHUACAN TEOTIHUACAN PACHO2 PACHO2 IROLO
Andesitas	102-334 Ω -m 137-250 Ω -m 185 Ω -m	APAN ZUMPANGO HUEHUETOCA
Piroclastos del Plioceno (grano fino)	>10 Ω -m >14 Ω -m	OTUMBA-TEOTIHUACAN- TECAMAC-ZUMPANGO APAN
Piroclastos del Plioceno (grano grosso)	26-45 Ω -m 24-55 Ω -m	OTUMBA-TEOTIHUACAN- TECAMAC-ZUMPANGO-HUE HUETOCA PACHO2-IROLO-APAN
Piroclastos del Mioceno	22-39 Ω -m	HUEHUETOCA

ceno poseen un rango resistivo de 22 - 39 ohm-m, que cae en el rango de los anteriores. Las variaciones se deben principalmente a la granulometría, aunque no se descarta la hipótesis de que los piroclastos del Plioceno de grano fino deban su baja resistividad a un aumento en la mineralización del agua subterránea.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Dado que la Cuenca de México reviste un carácter político-administrativo complejo es difícil tener acceso a la información generada por los más de 27 000 pozos existentes en la Cuenca, por lo que la correlación geológico-geohidrológica efectuada en este trabajo se realizó a nivel de paquetes y no de una definición estratigráfica de detalle que, además, geoelectricamente, no es factible.

La ubicación y geometría del perfil las definieron trabajos anteriores realizados por ECASA e Instituto de Geofísica en 1983 y 1986-1987, lográndose cubrir 105 km de investigación con SEV's efectuados en el marco del Proyecto Aquifer Development.

De los doce paquetes identificados, los primeros seis corresponden a material granular con resistividades que oscilan entre 10 - 60 ohm-m, siendo los grados de saturación y cementación los principales factores de variación de la conductividad.

La matriz porosa en la que se encuentra albergado el acuífero en explotación presenta inhomogeneidad y anisotropía debido principalmente a que los procesos naturales de sedimentación han sido alterados por la alternancia de material ígneo, producto de la intensa actividad volcánica de la Cuenca. Lo anterior complica una correlación de rangos resistivos con la mineralización del agua, no pudiéndose discernir, además, entre la conducción electrolítica de la corriente y la de tipo electrónico. A esta situación habría que agregar los fenómenos de membrana debidos a la presencia de arcilla.

Las arcillas presentan una resistividad media de 18 - 19 ohm-m en la parte central del perfil; sin embargo, habría que tomar en cuenta la calidad del agua saturante (300 - 400 mg/l) ya que en la Subcuenca de Chalco se encontraron valores de 2 - 5 ohm-m (Rodríguez, 1986) para arcillas, aunque aquí la mineralización es considerablemente mayor (1 100 mg/l).

Los piroclastos del Plioceno que definen el acuífero principal llegan a presentar

mínimos relativos de resistividad en el entorno de las rocas ígneas (estaciones 39 - 44), debiéndose quizás este efecto al enriquecimiento de minerales en el agua, ya que los derrames basálticos actúan como confinantes del acuífero. La calidad del agua de la zona es ligeramente distinta de la del entorno. Habría que tomar en cuenta el diseño de los pozos, puesto que el agua extraída no es totalmente representativa de alguna capa.

Los basaltos sanos presentaron resistividades del orden de 3 000 ohm-m, pudiendo disminuir su valor hasta 100 debido al fracturamiento y/o tectonismo que presenta, lo que se traduce en un mayor o menor grado de saturación de agua.

Las variaciones de resistividad, por lo tanto, son controladas en los sedimentos por la granulometría y en las rocas ígneas por el fracturamiento, lo que provoca, en ambos casos, variaciones en el grado de saturación. La mineralización del agua juega un papel secundario, ya que sólo localmente presenta máximos en su contenido de sólidos totales disueltos.

BIBLIOGRAFIA

- ESTUDIOS Y CONSTRUCTORES ALAS, S. A. (ECASA), 1983. Perfiles Geofísicos en Diversas Zonas de la Cuenca de México. Comisión de Aguas del Valle de México de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Reporte No. 83418, México, D. F.
- LESSER, I. J. *et al.*, 1984. Actividades Geohidrológicas en el Valle de México. Reporte Técnico 4-33-1-676 D.D.F., Tomos I-III, México, D. F.
- LESSER, I. J. *et al.*, 1986. Hidrogeoquímica del Acuífero de la Ciudad de México. *Revista Ingeniería Hidráulica de México, Sep., Dic., 1986.*
- RODRIGUEZ, R. *et al.*, 1986. Perfiles Geofísicos al Sur del Valle de México, IGF-UNAM, CAVM-SARH, 279 pp.
- RODRIGUEZ, R. *et al.*, 1987. Perfiles Geofísicos en Pachuca-Teotihuacan, Apan-Otumba en el valle de México. IGF-UNAM, CAVM-SARH, 110 pp.
- RUIZ, V. M., E. VAZQUEZ y R. JAIMES, 1988. Modelo Geológico de la Cuenca de México. IGF-UNAM, México, D. F. (en este mismo volumen).