

## ESTUDIO CRENOLOGICO EN LA PARTE MERIDIONAL DE LA CUENCA DE MÉXICO

Jan Tomaszewski<sup>1</sup>,  
Rafael Huízar-Álvarez<sup>2</sup>,  
Salvador Marín-Córdoba<sup>2</sup> y  
Jaime Mandujano-Velázquez<sup>2</sup>

### RESUMEN

En este artículo se presenta las características generales de las diferentes clases de drenaje crenológico y potamológico existentes en los relieves volcánicos del sur de la Cuenca de México, así como de los tipos de acuíferos que los recargan.

Los manantiales y escurrimientos fueron divididos en diferentes tipos, considerando los siguientes parámetros: fuerzas que causan el movimiento (gravedad y presión), tipo de acuífero que los origina, origen y composición química del agua, régimen de gasto, morfología, clima y tectonismo del área.

Las características de estas formas de descarga del agua hacia la superficie, fueron descritas con base en el esquema general de circulación de las aguas subterráneas propuesto para la zona estudiada. Desde el punto de vista hidroquímico, posee poca mineralización, lo que permite clasificarla como dulce. Lo antes dicho permitió conocer que el agua que recarga la mayor parte de los acuíferos es principalmente de origen meteórico.

La hidrodinámica de los manantiales y áreas de drenaje se analizó con base en mediciones hidrológicas efectuadas e información estadística existente. Éstas mediciones permitieron conocer que los manantiales del área de estudio pertenecen a las clases V, VI y VII de la clasificación de Meinzer (1927).

Palabras clave: hidrogeología, manantiales, acuíferos, Cuenca de México.

### ABSTRACT

In this paper, the general characteristics of the different kinds of crenologic and potamologic drainage existing in the volcanic areas of the southern part of the Basin of Mexico are given, as well as the kind of aquifers that recharge them.

The springs and runoffs were divided into several types, based on the following parameters: forces causing the movement (gravity and pressure), type of aquifer, origin and chemical composition of the water, yield variation, morphology, climate and tectonics of the area.

The characteristics of these water discharges on the surface are described on the basis of the general circulation scheme of groundwater proposed for the studied area. From the hydrogeochemical point of view, the mineral concentration is low and, therefore, the water is classified as fresh.

This allowed to infer that the water recharging the aquifer is mainly meteoric in origin.

The hydrodynamics of springs and runoff areas was analyzed on the basis of hydrologic measurements made in the field and available statistical information permitting the grouping of the springs in the studied area into classes V, VI and VII, according to Meinzer classification (1927).

Key words: hydrogeology, springs, aquifers, Basin of Mexico.

### INTRODUCCIÓN

Los manantiales, así como las diferentes formas de descarga natural que presenta el agua subterránea, son índices de suma importancia para definir la situación hidrogeológica de una zona. Aquéllos que aportan grandes gastos son de particular interés, debido a que de ellos se obtiene el agua potable para poblados, industrias y riego. Existen otros con diferentes atributos físicos (radiactividad y temperatura) y químicos, en cuyos casos se usan con fines curativos, siendo aprovechados principalmente en los balnearios.

En la Cuenca de México, es común y tradicional el aprovechamiento de los manantiales; desde tiempos remotos, los indígenas captaban el agua de ellos por medio de ingeniosas construcciones hidráulicas que, aunque algo rudimentarias,

eran muy funcionales para su época. En la Cuenca de México, el acueducto de Moctezuma, el cual captaba agua de los manantiales de la sierra de Guadalupe (Departamento del Distrito Federal, 1975) para transportarla y abastecer a la Gran Tenochtitlán, es un buen ejemplo de ello. Actualmente, el abastecimiento de agua potable de algunos poblados se realiza por medio de la captación de un manantial o de un sistema de manantiales con cisternas de concreto, a partir de las cuales el agua es conducida a través de acueductos.

En obras hidráulicas, antiguas y contemporáneas, se comprueba la habilidad de los habitantes en lo que se refiere a la planeación y construcción de las mismas, respecto al conocimiento de la ubicación de los manantiales locales, así como a la forma de aprovecharlos. En las montañas se usa el agua de los manantiales para poblados localizados en altitudes menores que éstos, conduciéndola fácilmente por gravedad, lo que resulta muy benéfico y de gran economía.

El presente artículo es el resultado de la investigación realizada sobre el comportamiento hidrogeológico de la por-

<sup>1</sup>Institut Geograficzny pl. Uniwersytecki. 50-137 Wrocław.

<sup>2</sup>Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D. F.

ción meridional de la Cuenca de México, siendo éste el primer trabajo que trata las características generales de los manantiales y otras descargas naturales de agua subterránea en esta región.

#### LOCALIZACIÓN

La superficie comprendida en el presente estudio corresponde a la porción meridional de la Cuenca de México (Figura 1); su medio natural está integrado, por una parte, por los relieves de las sierras Nevada y Chichinautzin y por la parte meridional de la sierra de Las Cruces, y por otra, por la planicie de nivel de base, que en su mayor parte corresponde a la antigua zona lacustre del sur de la Cuenca de México. La ubicación espacial del área de estudio está delimitada por las siguientes coordenadas geográficas: 19°03' a 19°25'N y 98°38' a 99°25'W.

#### INFORMACIÓN GENERAL

Por manantial se entiende la descarga natural de agua subterránea sobre la superficie del terreno en forma concentrada (Pazdro, 1977; Tomaszewski, 1977), siendo incorrecto clasificar como manantial a las descargas artificiales tales como los pozos artesianos y las descargas naturales no concentradas que ocurren en forma de goteos.

La parte de la hidrogeología que se ocupa del estudio de los manantiales y todas las descargas naturales del agua subterránea en la superficie se llama crenología (del griego *crenos* = fuente, manantial).

Es muy importante el conocimiento crenológico para el estudio hidrogeológico de una región, ya que proporciona información de las condiciones subterráneas que prevalecen en un área, indicándonos que el agua está cerca de la superficie y con tendencia natural a salir. Los manantiales y otras formas de descarga de aguas subterráneas en la superficie son considerados una forma de drenaje del acuífero; a este drenaje se puede denominar "drenaje crenológico".

Cerca de los manantiales con grandes gastos, se observa depresiones del nivel freático en los acuíferos, así como una disminución de presión en los acuíferos confinados.

En la Figura 2, a, b, c, se presenta los diferentes tipos de drenaje crenológico y potamológico, representados mediante las curvas de elevación del nivel freático, cuya configuración depende del mismo drenaje. La Figura 2, a, muestra el tipo de drenaje crenológico en condiciones semiconfinantes en el cual el arroyo originado por el manantial no tiene contacto con el acuífero (situación no frecuente); en este caso, hacia aguas arriba del manantial, se observa curvas paralelas, las cuales cambian a cóncavas hacia abajo al aflorar el manantial y hacia aguas abajo, donde corre el arroyo originado por él mismo; estas líneas vuelven a ser paralelas, lo que indica la ausencia de drenaje potamológico. Una situación más frecuente que la anterior se presenta cuando los arroyos aguas abajo del manantial están drenando también el acuífero e incrementando el caudal a las cotas más bajas. En este caso, las curvas de elevación del nivel freático tienen la misma forma presentada en la Figura 2, b. En ambos casos existen dos tipos de drenaje: el crenológico, que se refiere al gasto del manantial, y el escurri-

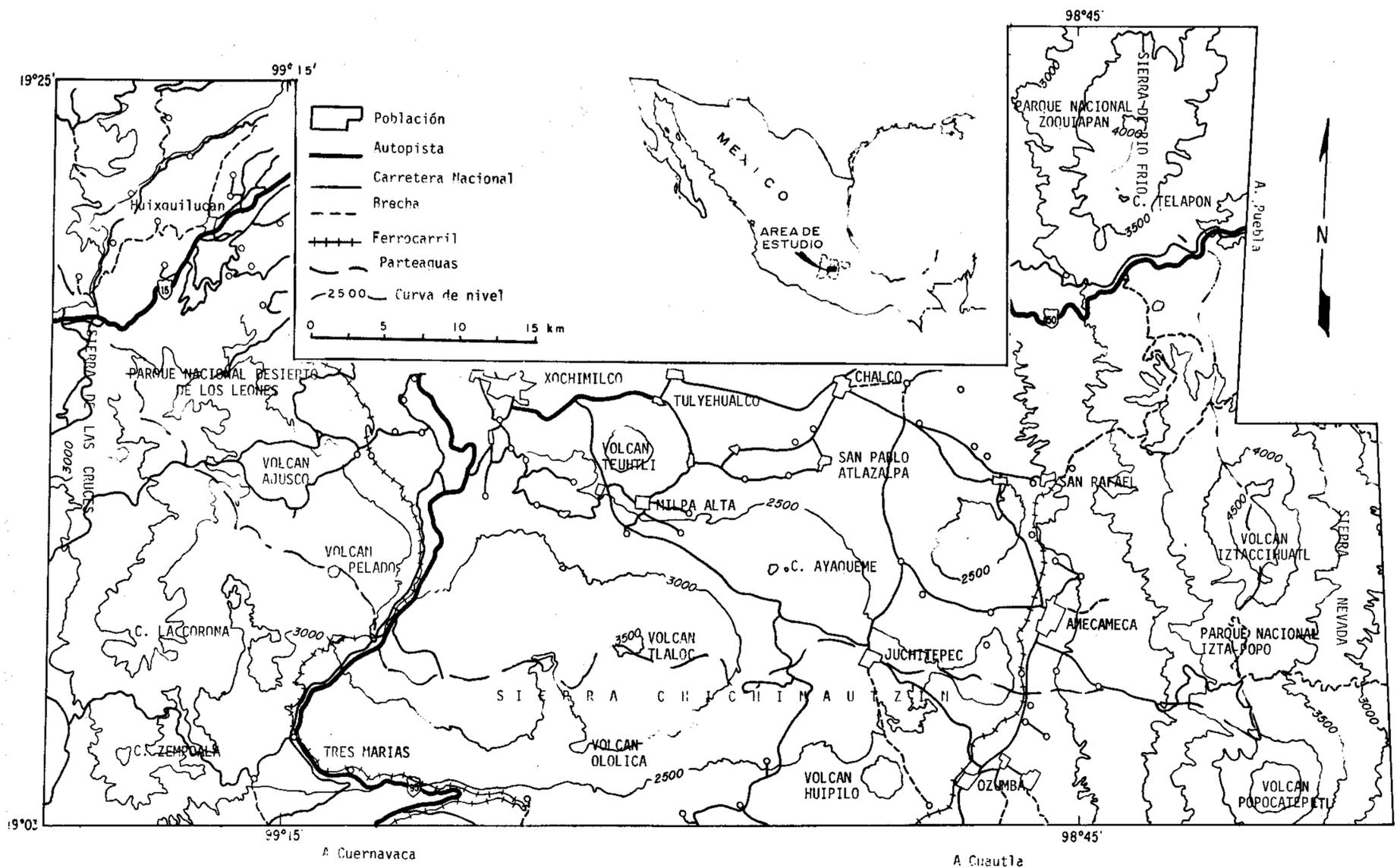


Figura 1.- Mapa de localización del área estudiada.

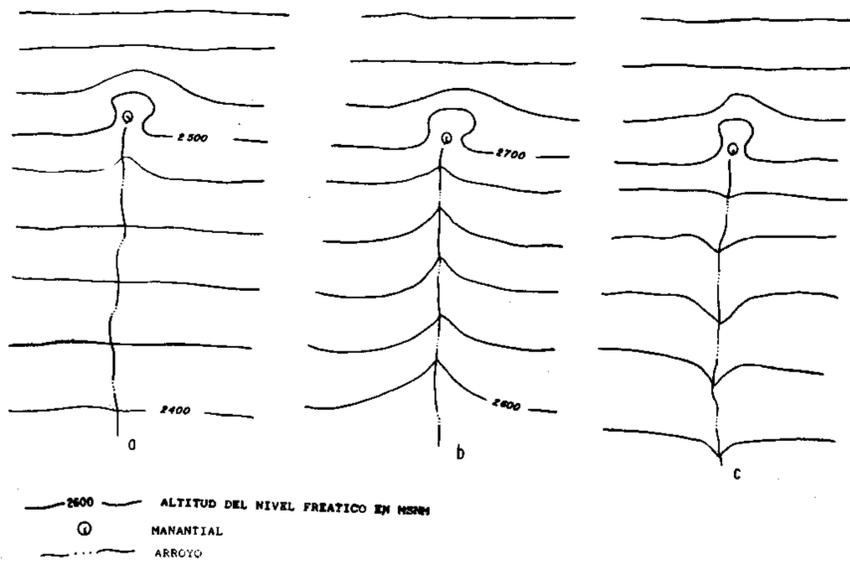


Figura 2.- Tipos de drenaje crenológico y potamológico.

miento del arroyo originado por el manantial, denominado drenaje potamológico positivo. En la Figura 2, c, se presenta la situación inversa, en la que el arroyo está perdiendo agua a lo largo de su cauce debido a la infiltración secundaria; esto se denomina drenaje negativo del arroyo o drenaje potamológico negativo.

Existen muchas clasificaciones de manantiales. Según Pazdro (1977), en la literatura crenológica alemana hay cerca de 200 tipos de manantiales; en Polonia hay alrededor de 90. La clasificación de un manantial se realiza en función de diferentes parámetros como son: fuerzas que causan el movimiento y consecuentemente la descarga del agua subterránea sobre la superficie (gravedad y presión del acuífero), tipo de acuífero, origen del agua, morfología de la zona, clima, tipo de roca o suelo del cual proviene la descarga, grado y tipo de intemperismo de la roca, tectonismo del área, composición química de la misma, elevación del terreno sobre el nivel del mar y atributos físicos del agua del manantial como régimen de gastos, etc., existiendo varias clasificaciones realizadas por diferentes autores, las cuales están escritas en diversos libros y publicaciones (cf. Todd-Keit, 1976).

#### COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO DE LA PORCIÓN MERIDIONAL DE LA CUENCA DE MÉXICO

El funcionamiento hidrogeológico de la parte meridional de la Cuenca de México está determinado por la naturaleza de la estructura geológica, la litología y por el diferente uso del suelo en esta región.

La interpretación de la información hidrológica de manantiales y la piezometría de pozos permiten presentar aquí un esquema general de la circulación del agua subterránea en esta parte de la Cuenca de México.

En la Figura 3 se presenta, en forma muy general, el funcionamiento hidrogeológico de esta región. En ella se observan dos elementos principales de diferente morfología y constitución litológica: (a) la planicie de la cuenca constituida por depósitos fluviales y lacustres y (b) las montañas volcánicas que la delimitan. Estas últimas constituyen la principal zona de recarga de los acuíferos.

Para la descripción del comportamiento hidrogeológico, dicha figura fue dividida en subzonas: La primera, denominada zona de alimentación, corresponde a las partes altas de las

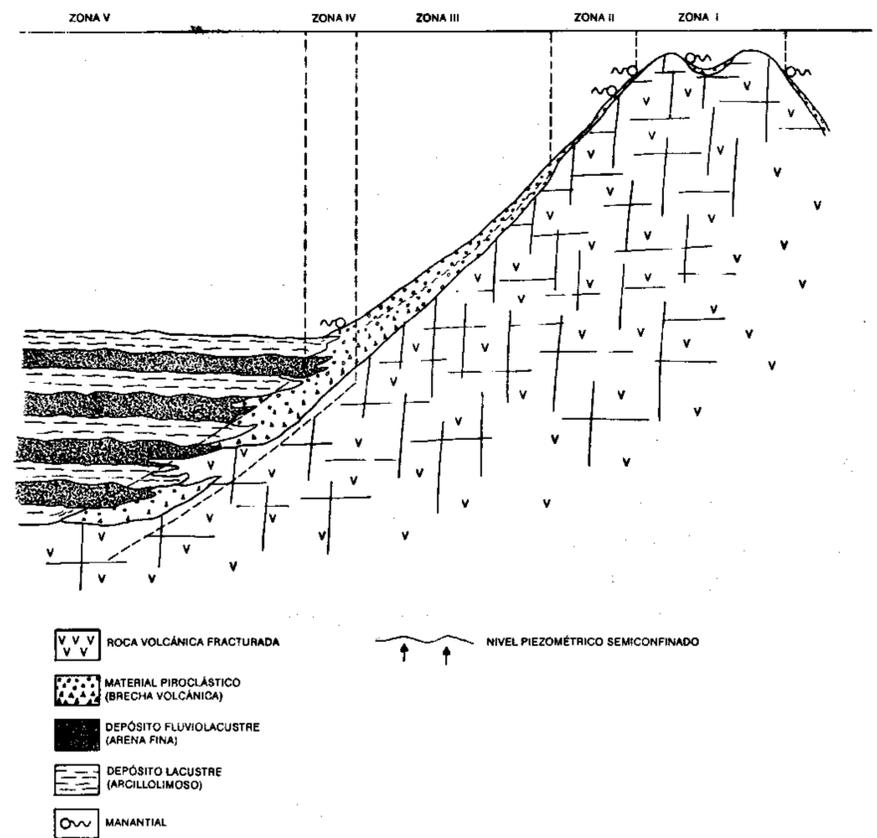


Figura 3.- Esquema general de circulación y zonación de las aguas subterráneas en el sur de la cuenca de México.

montañas parteaguas, donde existen valles no profundos y secos que tienen agua, esporádicamente, durante la época de lluvias y poco tiempo después de éstas. En dicha zona, el nivel freático está muy profundo, razón por la cual no existe drenaje superficial; la mayoría de las veces el agua se aloja en las estructuras secundarias de la roca volcánica como son fallas, fracturas y planos de fluidez, por lo que el agua en esta zona no es muy estable y tiene tendencia al movimiento hacia las partes más bajas de los acuíferos. La recarga en esta zona se debe a la infiltración del agua de lluvia o a la fusión de nieve en las partes más altas de las montañas; es el caso de la Sierra Nevada. La infiltración en esa zona es facilitada, frecuentemente, por la existencia de fracturamiento en la roca o bien por la permeabilidad del suelo, formado en general por ceniza volcánica. La existencia de bosque también facilita la infiltración.

La Zona II es denominada zona de drenaje crenológico. Esta no existe en realidad como una zona continua, sino que se presenta en las partes de las montañas donde el agua de los acuíferos está próxima a la superficie y aflora en forma de manantial, o por el drenaje de los arroyos. Informes técnicos, las observaciones de campo aquí realizadas y descripciones hechas por diferentes autores, indican que el drenaje crenológico existente en esa parte de la Cuenca de México es muy importante en esta zona, por lo que es objeto de una descripción detallada en el presente artículo (cf. p. 234).

Zona III, llamada de tránsito. Es aquella en la que el primer nivel freático se observa a mayor profundidad que en las subzonas precedentes, encontrándose generalmente en la roca sana. El gradiente hidráulico es frecuentemente alto.

En pozos realizados en esta región, el primer nivel freático, generalmente, se encuentra en la roca volcánica. Sin embargo, existen casos en que dicho nivel se presenta a poca profundidad en materiales fluviales, donde los depósitos de limo y arcilla de origen volcánico poseen gran espesor (como es el caso de los pozos Trejo, La Herradura y Tecamachalco, en los cuales el nivel piezométrico tiene una profundidad de 130 m).

En esta subzona, el primer nivel freático puede presentarse como libre o como cautivo.

La subzona IV, denominada mixta aquí, se sitúa en la interacción de los acuíferos de las montañas, caracterizados por un constante flujo de sus aguas, con los acuíferos de los depósitos fluviolacustres de la planicie, es decir, en esta zona pueden existir acuíferos y/o agua en circulación hacia los acuíferos situados pendiente abajo. Se observa de una forma clara el contacto que existe entre los acuíferos de la Zona V, localizada en depósitos fluviolacustres, y los de la Zona III, que conforman rocas volcánicas fracturadas, pudiendo ser ocasionalmente material fino de origen volcánico. El contacto se puede dar entre un acuífero situado a mayor altitud y un acuífero de los depósitos lacustres, o entre el primero y varios acuíferos de la zona plana. En este último caso, se observa la presencia de acuíferos confinados y semiconfinados (Huizar-Álvarez, 1989) en los que el nivel piezométrico tiene la misma elevación en todos, debido al principio de vasos comunicantes, ya que todos los acuíferos de la Zona V se alimentan de un sólo acuífero alto de la Zona III. Debido a la dinámica del sistema, en el cual existe un flujo descendente de la Zona III hacia los depósitos lacustres de la Zona V, el primer nivel piezométrico en la subzona IV se encuentra muy cerca de la superficie del terreno, por lo que pueden aparecer descargas naturales de agua subterránea. La información arqueológica e histórica nos menciona que en épocas pasadas existieron en esa zona manantiales con grandes gastos (Todd-Keit, 1976). La influencia del drenaje artificial ha causado el abatimiento de estos niveles con su consecuente disminución de gastos y, en muchas ocasiones, la desaparición de estas formas crenológicas. En los lugares menos influenciados por la actividad del hombre, como son las partes altas de las montañas, existen manantiales pequeños y escurrimientos del agua subterránea, siendo algunos de ellos temporales.

Zona V, denominada zona de acuíferos, los cuales se alojan en depósitos fluviolacustres. Los estratos arenosos poseen coeficientes de almacenaje altos, adecuados para captar el agua, formándose así los acuíferos confinados, separados uno del otro por estratos impermeables de material arcilloso. La presión subartésiana en cada uno de éstos es diferente y en la mayoría de ellos es alta; en algunos, la elevación del nivel piezométrico se sitúa 60 m por arriba de la profundidad del acuífero respectivo, particularmente en los acuíferos más profundos. No obstante, dicho nivel desciende constantemente debido a la extracción de agua a través de numerosos pozos, lo cual provoca que la recuperación del nivel piezométrico no sea satisfactoria a la fecha.

De la información obtenida por la excavación de túneles para el desagüe de la Ciudad de México a través de las montañas volcánicas que cierran la cuenca por el lado noroccidental, fueron atravesados acuíferos importantes que existen a través de fracturas y fallas, en la roca volcánica (Loehberg, 1979). Durante la realización de estos túneles, se midió gastos entre 5 y 800 l/seg (Departamento del Distrito Federal, 1975) provenientes de fracturas y fallas en andesitas y basaltos y de sedimentos fluviales; el aporte de agua fue constante con el tiempo, lo cual se puede interpretar como la existencia de grandes acuíferos con amplio fracturamiento.

En varias partes de esos acuíferos puede existir el flujo del agua a grandes presiones. Por esas condiciones hidrogeológicas observadas durante dichas excavaciones y considerando la constitución geológica de la parte meridional de la

Cuenca de México, se infiere para esta última una circulación subterránea mayor o igual que las encontradas en el desarrollo de las excavaciones.

Los acuíferos con mayor capacidad de almacenamiento están ubicados en basaltos vesiculares fracturados. Los tipos de roca volcánica mencionados anteriormente en la región, así como las tobas, poseen un intenso fracturamiento que les permite recibir y almacenar las aguas de gravedad.

#### TIPOS DE FORMAS CRENOLOGICAS

Dentro del área estudiada, las formas de descarga superficiales del agua subterránea quedan divididas, según su origen, en:

Tipo 1. Manantiales ubicados en roca volcánica fracturada.

Tipo 2. Manantiales ubicados en suelo que sobreyace a roca volcánica semipermeable.

Tipo 3. Manantiales de contacto ubicados en ambos tipos de material, roca fracturada y suelos.

Las investigaciones de campo constatan que en las montañas de la parte meridional de la Cuenca de México existen manantiales preferentemente del tipo 1 que afloran en las Zonas II y IV de la Figura 3; pueden coexistir con drenajes del estrato de suelo (Figura 4), pero al dar comienzo la época de estiaje, el flujo de agua en el suelo disminuye y durante ese tiempo el drenaje del suelo desaparece, restando únicamente la descarga del manantial. Frecuentemente, los suelos que cubren la ladera de las montañas son de tipo arcilloso con muy baja permeabilidad; en estos casos, el agua viaja hacia la superficie a través de oquedades, originadas por el trabajo del flujo. La Figura 5 muestra el manantial de tipo 1, donde el estrato de suelos es la zona de tránsito para la descarga del agua proveniente exclusivamente de la roca.

Las formas crenológicas del tipo 1 pueden dividirse en descargas directas de roca volcánica e indirectas por medio del estrato del suelo, donde el agua también proviene del acuífero en roca volcánica fracturada; ambas tienen el mismo carácter, con la diferencia de que el espesor del suelo es mínimo en las primeras; asimismo, son más fácilmente reconocibles en el campo. Las descargas del tipo 2, alimentadas exclusivamente por el agua del suelo, son generalmente temporales (Figura 6). En las observaciones de campo a lo largo de un año, no se observó un solo manantial de este tipo con gastos perennes; muchos de éstos solamente existen en período de lluvias y poco tiempo después de éstas. Se puede suponer la existencia de este tipo de manantial con gastos estables fuera de la zona de estudio en las partes bajas de las Zonas II y IV de la Figura 3, donde existen capas profundas de suelo. Sin embargo, hay poca probabilidad de que esta forma crenológica drene todo el año, ya que es alimentada, únicamente, por el acuífero en suelo.

Se puede suponer que existan también descargas de agua subterránea en la superficie de acuíferos ubicados en tobas volcánicas o basaltos vesiculares, sin que tuvieran gran importancia las fracturas, pero no fueron encontradas en el campo.

A los tipos 1 ó 3, pertenecen también las formas crenológicas estables de contacto; las Figuras 7 y 8 presentan ambos esquemas de alimentación. En el esquema de la Figura 7 se presenta la situación en la que el manantial está recibiendo toda el agua de las fracturas de la roca y en la Figura 8 se observa que el manantial recibe, en época de lluvias, el agua mezclada de los dos acuíferos (de la roca fracturada y del suelo).

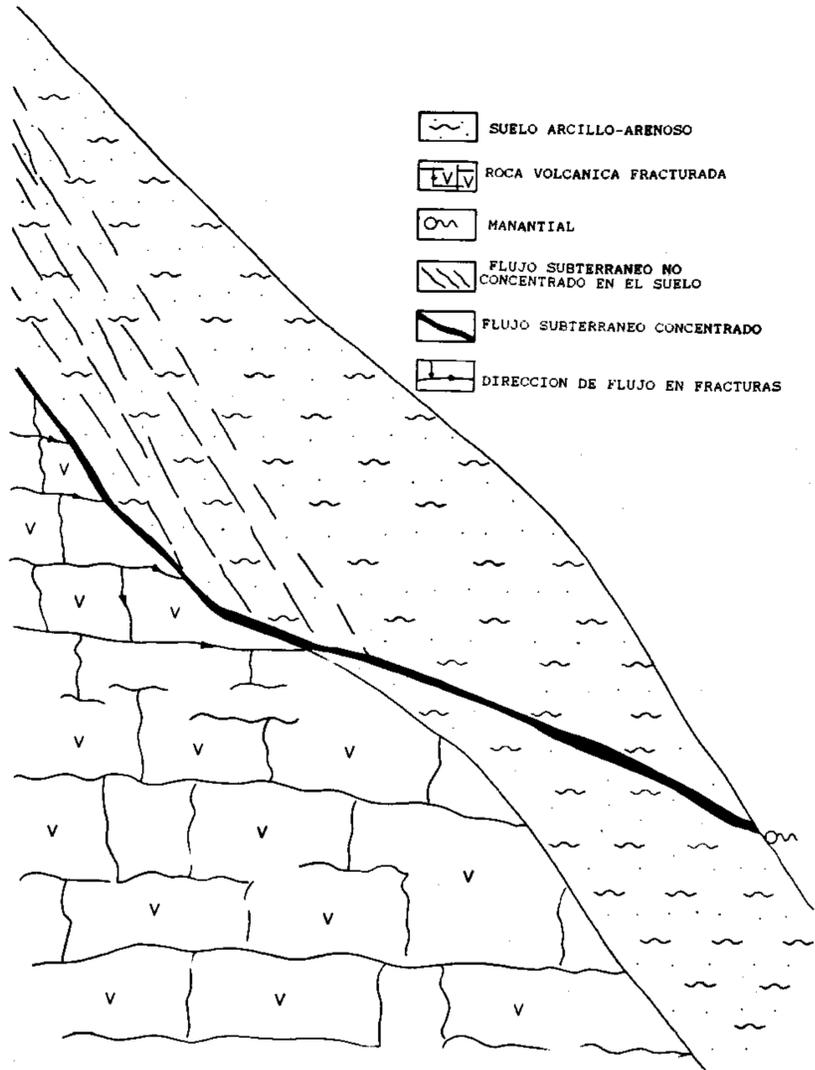


Figura 4.- Manantial tipo 1. Ubicado en roca volcánica fracturada. Alimentación proveniente de la roca y del suelo: época húmeda.

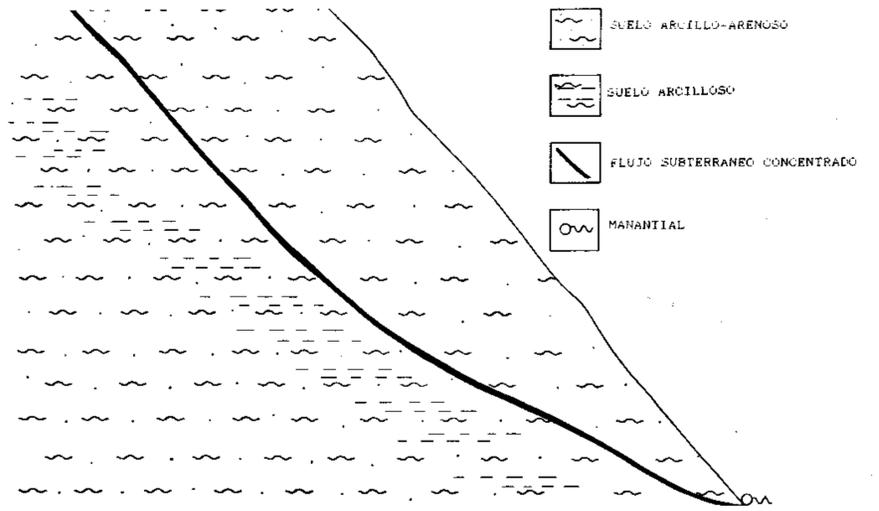


Figura 6.- Manantial tipo 2. Drenaje exclusivamente del suelo.

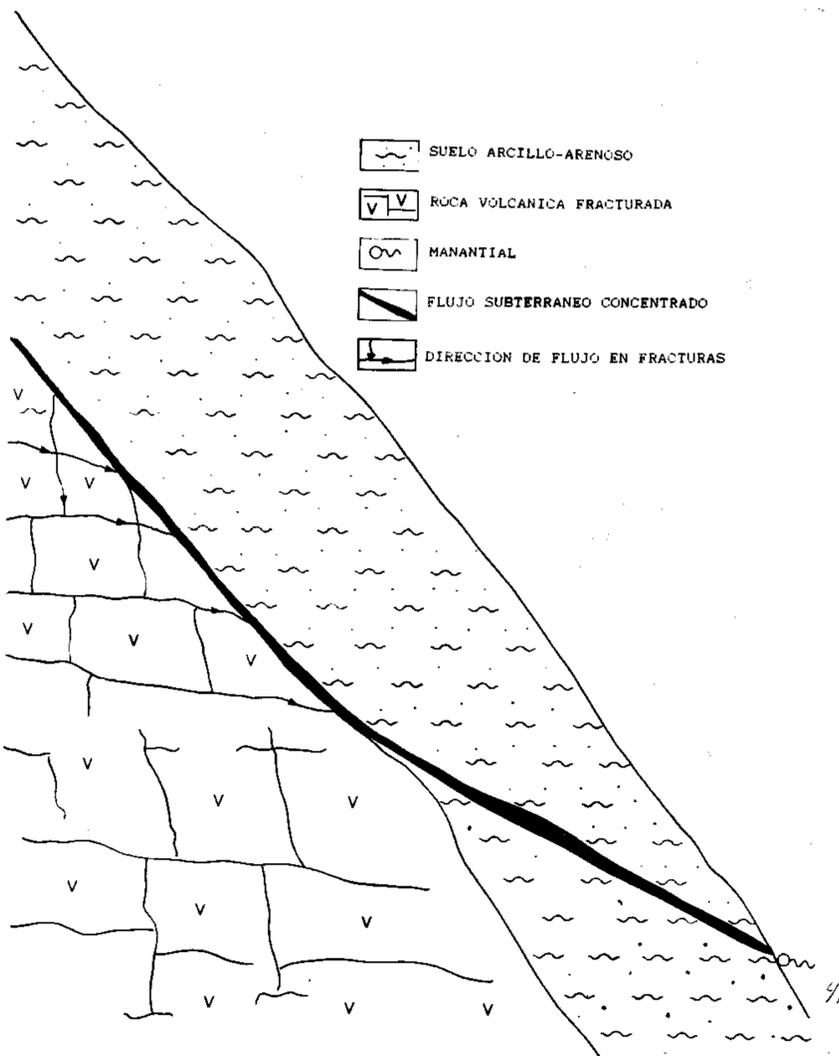


Figura 5.- Alimentación exclusiva de la roca; (el suelo como zona de transición) época húmeda.

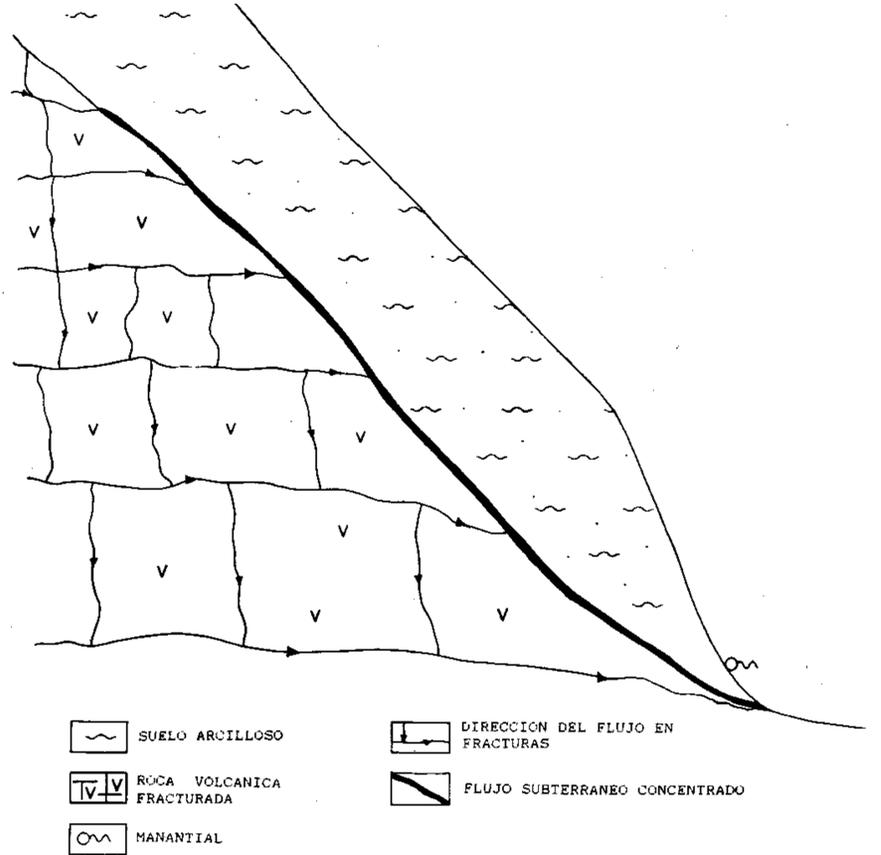


Figura 7.- Manantial tipo 3. Manantial de contacto. Alimentación exclusiva de la roca; época seca.

No es fácil distinguir en el campo estos dos tipos de descarga de contacto.

Las formas crenológicas de los tipos 1 y 3 son las más importantes en la región, puesto que están recibiendo las aguas de los acuíferos que predominan durante todo el año. El agua de estos manantiales es predominantemente meteórica con muy poca mineralización; la composición química de ellos, en general, es muy parecida, como lo indican los resultados de los análisis químicos de las muestras recolectadas (Tabla 1). Las diferencias en la mineralización total de ciertos componentes (sílice, calcio, magnesio, etc.) indican que los manantiales y escurrimientos son alimentados por aguas que han estado en los acuíferos por tiempos variables o han seguido trayectorias distintas a través de las rocas fracturadas.

Desde el punto de vista hidroquímico, en la zona estudiada los manantiales se pueden dividir (Freere y Cherrey, 1979; Tomaszewski, 1982):

1. Aguas ultradulces
2. Aguas dulces
3. Aguas minerales

En la zona de estudio predominan los manantiales de aguas ultradulces.

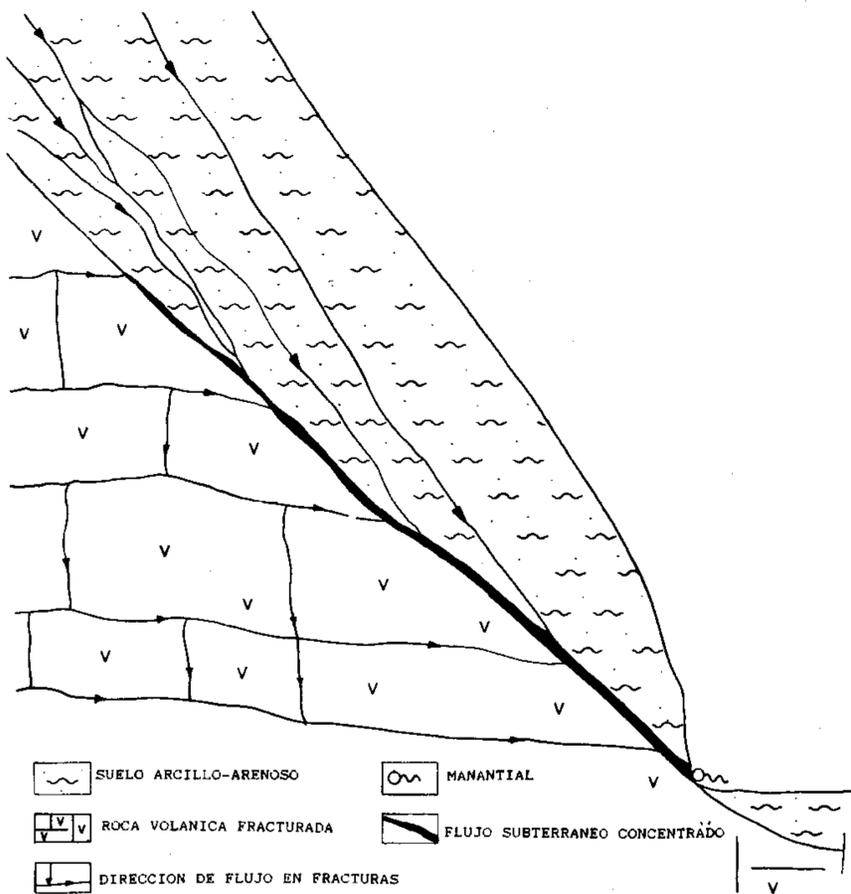


Figura 8.- Alimentación proveniente de la roca y el suelo; época húmeda.

La composición química de las rocas volcánicas de la zona de estudio proporciona al agua poca variación en su contenido mineral. Por tal motivo, los acuíferos de esas rocas, en su mayor parte, son ultradulces, con mineralización total menor que 100 ppm y dulces entre 100 y 500 ppm.

En general, las descargas localizadas en las partes más bajas poseen una mayor mineralización. Rara vez los manantiales y otros tipos de descargas localizadas cerca del parteaguas poseen una elevada mineralización (500-1,000 ppm) tipo mineral, como se observa en el flanco occidental del Iztaccíhuatl (parte alta de la cañada Milpulco), donde el análisis de sólo dos muestras de agua no permite afirmar el origen de la misma. Hasta el momento, es posible suponer dos orígenes para esa agua: (1) que esta forma crenológica tenga agua mezclada juvenil y meteórica; (2) que estén compuestos solamente de agua meteórica, pero que durante su trayectoria de circulación en el acuífero subterráneo cambie su composición al estar en contacto con las fracturas donde existan antiguos depósitos volcánicos, como el azufre, el cual fue observado en la cañada Milpulco (Iztaccíhuatl).

La existencia de acuíferos cuya circulación de agua se encuentra establecida por un profundo sistema de fracturas que afectan los relieves volcánicos, permite suponer que en esta región pudieran también existir manantiales con el agua mezclada: juvenil y meteórica. Sin embargo, los atributos físico-químicos de las aguas de los manantiales del sur de la Cuen-

Tabla 1.- Resultados de análisis químicos de agua de manantiales [mg/l].

Núm. Mtra.	pH	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Na	K	Ca	Mg	Fe	SiO <sub>2</sub>	Res. Sec.
A												
1	6.5	2.5	3.7		31.7	2.8	3.2	7.0	4.0	0.0	32.0	68.0
2	6.5	7.4	6.6		24.3	2.3	2.9	6.0	5.0	0.0	23.0	60.0
3	6.8	1.6	3.5		44.3	2.8	2.7	8.6	6.1	0.0	32.0	69.0
4	6.5	0.8	1.6		44.6	1.3	1.4	8.6	6.1	0.0	22.8	64.0
5	6.8	1.6	2.6		21.3	2.0	1.9	4.3	3.1	0.0	28.1	52.0
6	6.1	2.5	3.0		34.6	3.5	2.1	6.0	5.0	0.0	44.0	82.0
7	6.6	10.7	0.0		54.7	3.5	2.0	10.3	8.1	0.1	27.8	90.0
8	6.2	10.7	3.7		65.6	9.0	3.5	10.1	8.3	0.0	29.0	110.0
B												
203	8.3	11.0	3.5	0.6	61.0	6.7	0.4	14.0	4.8			102.0
212	7.3	37.4	3.5		36.6	9.0	0.4	11.0	6.2			104.0
218	7.8	20.9	7.1		48.9	7.6	0.4	15.0	4.7			104.0
248	8.0		7.1	2.5	97.6	11.0	2.7	16.0	6.8			144.0
278	7.7		7.1	1.2	97.5	9.7	0.4	13.0	8.5			138.0
282	7.9	20.6	7.2		48.6	6.2	1.9	16.0	2.9			104.0
286	8.0	11.0	3.5		61.0	9.4	2.3	12.0	3.0			104.0
302	7.7	20.2	3.5		48.8	3.9	0.4	15.0	4.4			97.0
13	8.3	20.6	24.3		146.0	19.1	5.1	31.0	12.2			256.0
224	8.4	11.0	3.5		79.3	7.1	1.9	16.0	6.7			211.0

Fuente de datos: (A) Instituto de Geología, (B) Carta hidrológica de aguas subterráneas (DETENAL, 1983).

Procedencia de las muestras:

Sierra del Ajusco: 1, 2, 3, 4, 5, 248, 282.

Sierra Nevada y Río Frío: 6, 203, 212, 218, 302.

Sierra de Las Cruces: 13, 224.

ca de México, obtenidos en los análisis químicos de las muestras realizados en el Instituto de Geología de la UNAM, así como los resultados de análisis químicos citados en la Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas Ciudad de México (DETENAL, 1983; Tabla 1) indican que la mayoría de formas crenológicas de las montañas del sur de la cuenca posee sólo agua meteórica.

Por otra parte, hay que destacar la creciente contaminación de tipo biológico que sobre las áreas de recarga del drenaje crenológico y de los acuíferos de la zona estudiada se lleva a cabo, que está representada por los asentamientos humanos, turismo y espacios de ganadería, como es el caso de la sierra del Ajusco (manantiales de Monte Alegre). Dicha degradación quedó de manifiesto por la presencia de  $\text{NO}_3$  en el agua aquí analizada (Tabla 1).

Este tipo de contaminación es inminente, pues en toda la zona analizada, la trayectoria de circulación del agua desde su infiltración hasta el manantial es corta y muy breve en tiempo. Asimismo, la posibilidad de purificación natural por filtración sobre el suelo en esas condiciones es limitada.

Desde el punto de vista de la fuerza motriz que ocasiona el movimiento de las aguas hacia la superficie, todos los escurrimientos no concentrados y preferentemente los manantiales, pertenecen al tipo de descarga de gravedad. En las descargas provenientes de fracturas ubicadas en las partes bajas, como por ejemplo en Monte Alegre, Contreras, pueden también salir sus aguas con una presión mayor que la hidrostática. La presión de este drenaje crenológico se forma gracias al sistema de fracturas, de abertura relativamente grande, que crea un sistema de vasos comunicantes, como se aprecia en el esquema de la Figura 9.

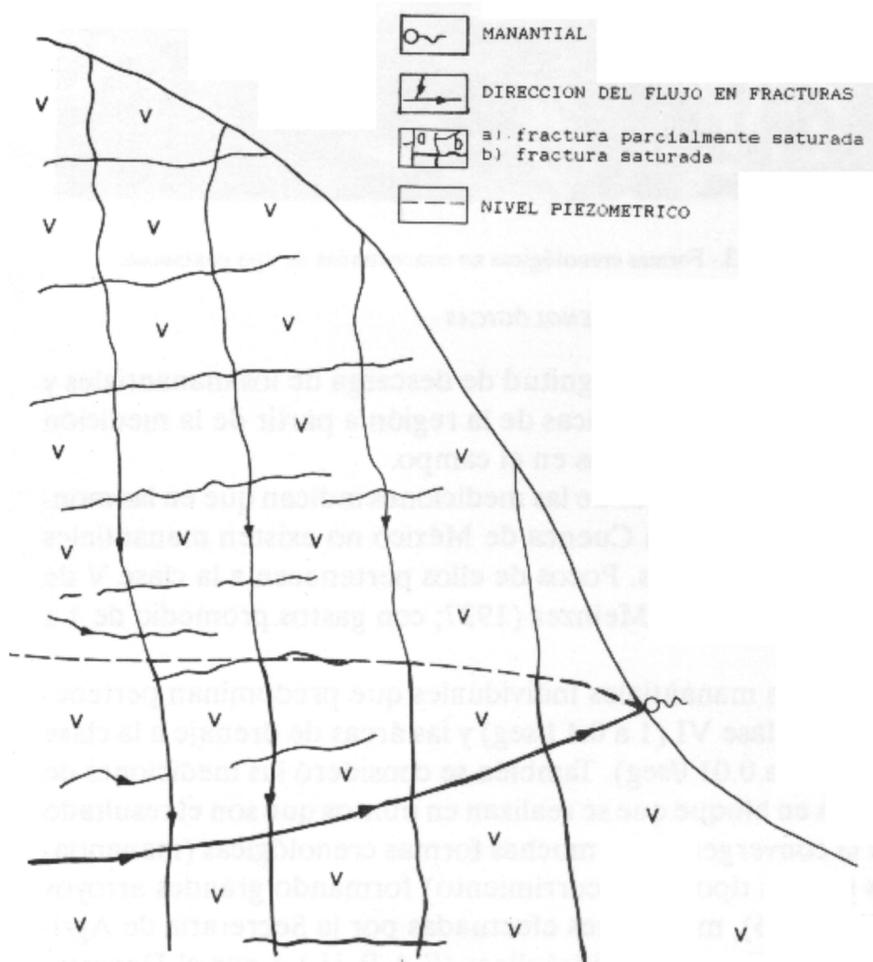


Figura 9.- Alimentación de manantial con presión hidrostática.

En algunos lugares de las zonas de manantiales se observa, además, la existencia de descargas secundarias. El agua del

drenaje crenológico sigue su camino y de pronto se infiltra a una profundidad somera, para posteriormente volver a salir a la superficie por segunda vez, gracias al cambio de condiciones de permeabilidad del suelo o del sistema de fracturas.

#### FORMAS DE DESCARGA DE AGUA EN LA SUPERFICIE

En el área de estudio, los manantiales presentan una forma concentrada de salida del agua a la superficie; ésta se debe a la tendencia natural para unirse de las diferentes líneas de flujo, lo cual sucede con frecuencia cerca de la superficie. También pueden fluir en las fracturas de la roca que forman zonas favorables de concentración; sin embargo, puede observarse en el campo formas crenológicas no concentradas con mayor frecuencia que los manantiales típicos.

En las partes bajas de las montañas existen manantiales que descargan en zonas con condiciones morfológicas locales muy características, formando pequeños lagos, generalmente denominados por la gente como "ojos de agua".

Las formas más comunes en el terreno, correspondientes a las descargas no concentradas, son llamadas zonas de drenaje (Figura 10). Por zona de drenaje se entiende la(s) superficie(s) donde existe salida no concentrada de agua subterránea a la superficie que origina una corriente. Los gastos de los escurrimientos son generalmente más pequeños que los volúmenes de manantiales, pero la unión de varios de ellos aporta cantidades significativas de agua.



Figura 10.- Zona de drenaje en la sierra del Ajusco.

Las zonas de drenaje presentan diferentes formas de salida del agua hacia la superficie y de acuerdo con esto los podemos dividir en superficiales y lineales.

Los superficiales son aquéllos que tienen un área grande con fuerte contenido de agua, debido a la salida dispersa del agua hacia la superficie. En las partes bajas de ellos, frecuentemente el agua se concentra formando pequeños arroyos.

Las formas superficiales generalmente drenan el agua del acuífero del suelo, así como de la roca volcánica fracturada, existiendo el suelo como zona de tránsito. En muchos casos se observa cambios en las zonas de drenaje superficiales debido a la actividad de los animales. La erosión del suelo de estas zonas de salida del agua subterránea a la superficie provocada por el ganado puede originar un cambio de forma crenológica, dando como resultado final un pequeño manantial en lugar del escurrimiento que se tenía. Durante la época de secas, hay pérdidas de esta agua por evaporación; en particular, en este tipo

de descargas no concentradas, este fenómeno puede ser más grande que en los manantiales típicos, debido a que la velocidad de salida es mayor en estos últimos.

Las formas lineales tienen, en general, dos tipos simultáneos: horizontales y verticales.

Los escurrimientos horizontales pueden tener descargas de contacto de la roca y suelo (Figura 11), de fracturas y de contactos entre diversas coladas de lava (Figura 12). Los escurrimientos de este tipo son largas líneas de descarga, de donde pueden salir considerables gastos de agua.



Figura 11.- Manantial de contacto en el sistema de manantiales de Monte Alegre y Sierra Nevada.

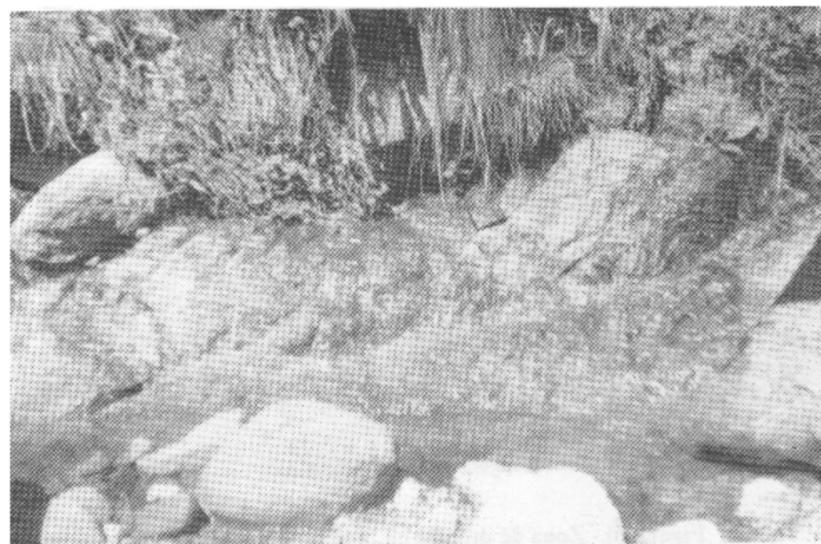


Figura 12.- Escurrimiento de contacto entre coladas de lava.

Los escurrimientos verticales poseen preferentemente descargas de una fractura o sistema de fracturas verticales, marcado por una pequeña hondonada (o lecho), en el fondo de la cual sale agua subterránea en cantidades no significativas; pero aguas abajo, los gastos van aumentando gradualmente y con frecuencia forman pequeños arroyos.

Menos frecuentemente se encuentra las formas crenológicas no concentradas del tipo pantanoso. En esas descargas, la zona de salida del agua hacia la superficie está muy mojada y va creciendo en forma de pequeño pantano (Figura 13) donde hay plantas subacuáticas. Estas plantas pueden producir turba, dadas las condiciones favorables del terreno, como existe por ejemplo en ciertas montañas de clima templado en Europa central y puede tener una gruesa capa de depósitos orgánicos (turba, humus y materia orgánica viva). El agua viaja

hacia la superficie a través de esta capa haciéndolo en forma dispersa. Durante ese camino existe la posibilidad de que ocurra un cambio en las condiciones físicas (temperatura) y químicas debido a la mezcla de sustancias orgánicas de esa capa. El cambio de condiciones físicoquímicas del agua que sale a la superficie depende del tipo de plantas y turba, así como del tiempo de viaje (velocidad) a través de la capa orgánica. Debajo del estrato orgánico están sepultadas las descargas iniciales que provienen de la roca (Figura 14), dado que anteriormente sólo existían plantas y después se formaron sedimentos orgánicos de ellas. Las descargas iniciales pueden ser escurrimientos, así como manantiales. En estas superficies existen zonas con mayor humedad, como se observa en el esquema de la Figura 14. En las montañas que cierran por el sur la Cuenca de México, se encuentra este tipo de formas crenológicas con algunas zonas de mojado que ocupan grandes áreas como se presenta en el esquema de la Figura 15, pero existiendo en éstas delgadas capas de materia orgánica. Entonces, esas formas pueden cambiar en grado moderado las condiciones físicoquímicas del agua, no tanto como en los casos donde existen capas gruesas de materia orgánica.



Figura 13.- Formas crenológicas no concentradas de tipo pantanoso.

#### GASTOS DE LAS FORMAS CRENOLOGICAS

Se obtuvo la magnitud de descarga de los manantiales y otras formas crenológicas de la región a partir de la medición de los gastos realizados en el campo.

Los resultados de las mediciones indican que en las montañas del sur de la Cuenca de México no existen manantiales con grandes gastos. Pocos de ellos pertenecen a la clase V de la clasificación de Meinzer (1927; con gastos promedio de 1 a 10 l/seg).

Los manantiales individuales que predominan pertenecen a la clase VI (1 a 0.1 l/seg) y las áreas de drenaje a la clase VII (0.1 a 0.01 l/seg). También se consideró las mediciones de gastos en bloque que se realizan en puntos que son el resultado de la convergencia de muchas formas crenológicas (manantiales y otros tipos de escurrimiento) formando grandes arroyos (Figura 16), mediciones efectuadas por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (S.A.R.H.) o por el Departamento del Distrito Federal. Esos grandes gastos dependen de las dimensiones del área de la cuenca captada, la cantidad y tipo de formas, así como de la localización del punto en que se realiza las mediciones. De esta manera, llegan a existir gastos

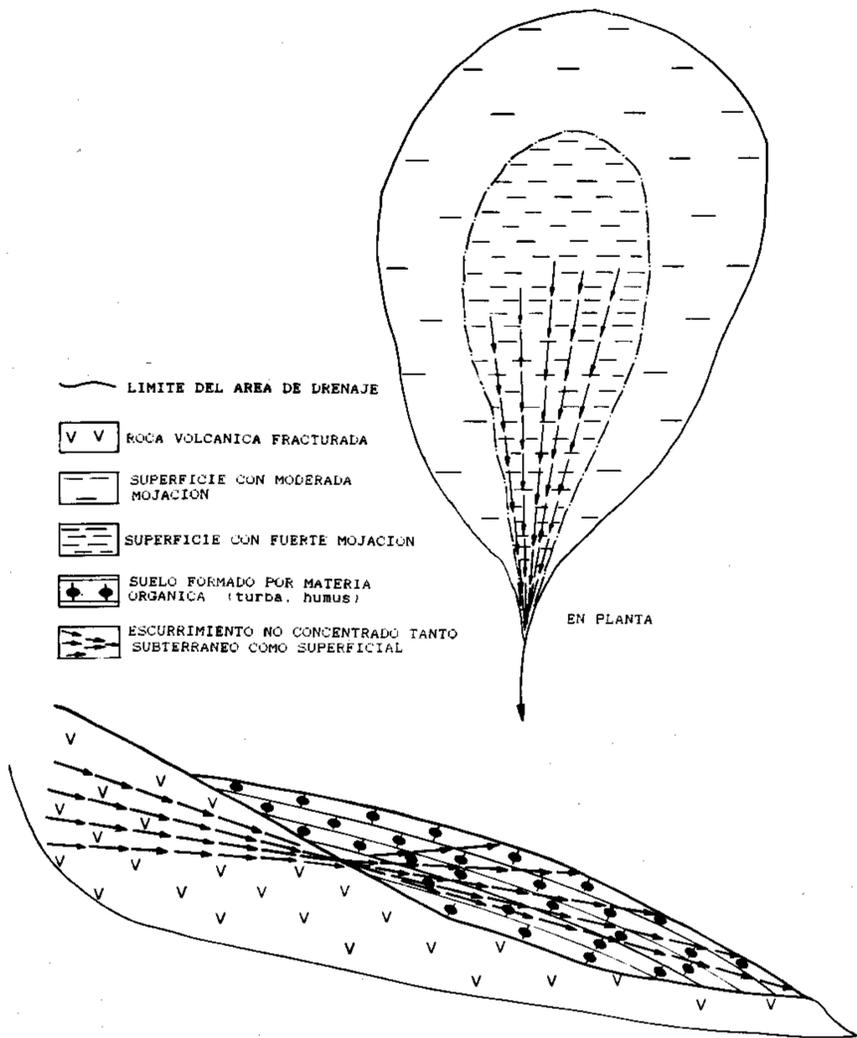


Figura 14.- Drenaje crenológico no concentrado (tipo pantanoso); simple, con un avanzado desarrollo de su forma, típico de montañas de Europa central.

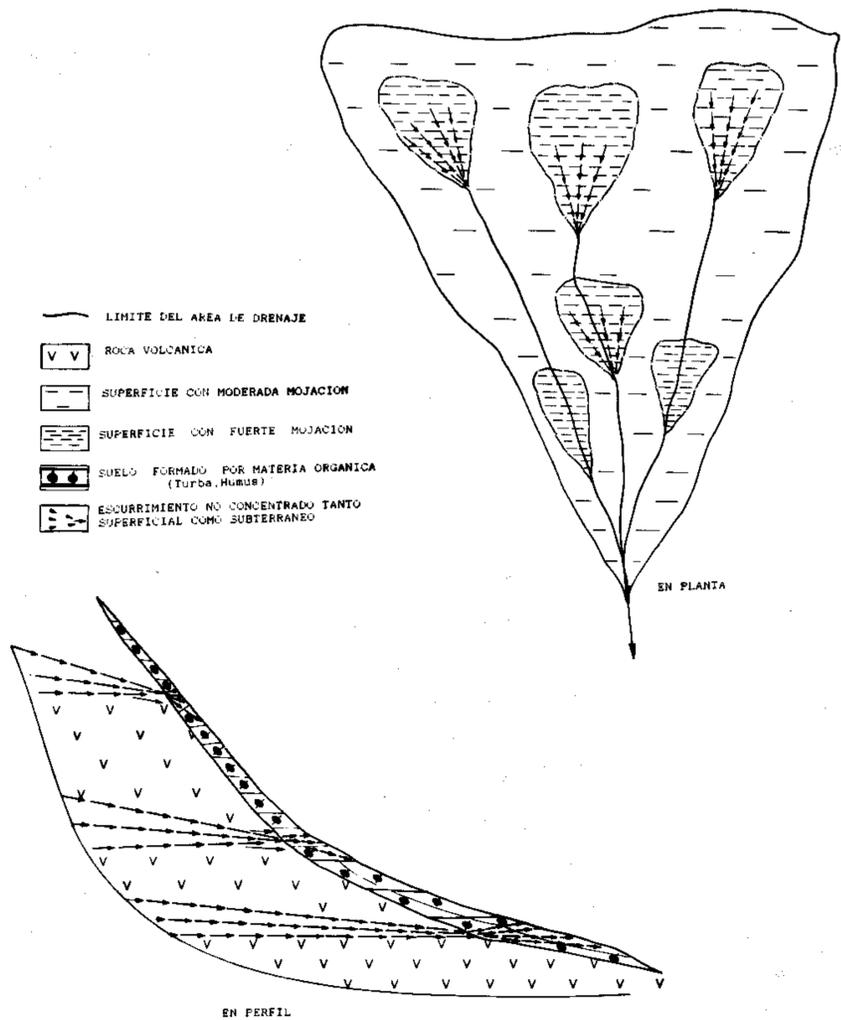


Figura 15.- Compuesto, típico en la parte meridional de la Cuenca de México.

promedio de 500 l/seg, volumen registrado en dos aguas (Sierra Nevada), pero más frecuentemente se observa gastos de 20 a 60 l/seg o menos (sierra del Ajusco).

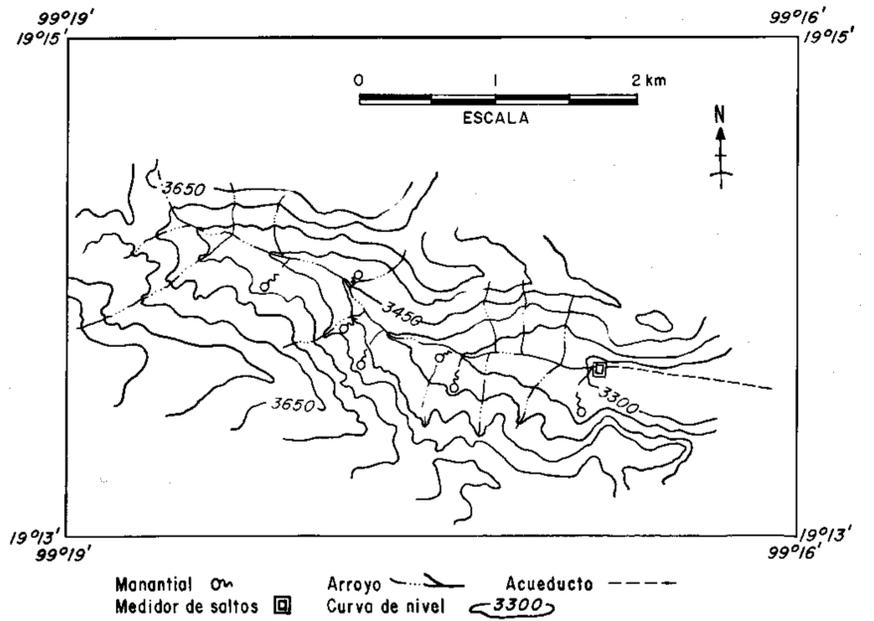


Figura 16.- Estación de medición de gastos en bloque (convergencia de varios escurrimientos procedentes de descargas crenológicas).

En el momento actual, no es posible analizar la variación del gasto en el tiempo, dado que faltan datos de medidas continuas de las descargas de los manantiales. Existen, en cambio, observaciones continuas de caudales en bloque de arroyos o zonas de manantiales, realizadas durante largo tiempo o por la S.A.R.H.

Ciertos arroyos tienen gran tiempo de observación como, por ejemplo, las dos corrientes que están recibiendo el agua de una parte del sistema de manantiales de Monte Alegre. La magnitud de los gastos se obtiene en un medidor tipo Parshall (con anchura de garganta de 4 m) y en otro por vertedor (con longitud de cresta de 1 m). Las medidas de escala son realizadas por el servicio hidrométrico de la S.A.R.H., tres veces al día. Las observaciones se efectúan por intervalos de tiempo, desde el año de 1962 hasta la fecha (Tabla 2). El análisis de estos datos no permite, infortunadamente, llegar a conclusiones seguras sobre la dinámica de los gastos, puesto que son poco confiables, dado lo parecido de las descargas en épocas de secas y de lluvias, puesto que los arroyos durante y después de las lluvias no solamente están recibiendo el agua de los manantiales sino también el flujo superficial. Los datos correspondientes a las medidas de los gastos de los manantiales Rancho Viejo y El Sauco, realizadas cada hora durante tres días de la época de estiaje y un día de la época de lluvias, permiten decir lo siguiente: los manantiales y otras descargas del tipo 1, que reciben al aporte de agua de acuíferos ubicados en roca fracturada, durante la época de seca, poseen gastos muy estables y la curva de agotamiento de éstos tiene poca inclinación (Figura 17). Las medidas fueron hechas en las siguientes fechas: del 20 al 22 de marzo de 1985 y el 23 de julio de 1985 para El Sauco y del 6 al 8 de abril de 1985 y el 14 de julio de 1985 para Rancho Viejo.

Más difícil es la interpretación del cambio del gasto en los manantiales durante la época de lluvias, dado que existen pocos datos (un día). Con los datos que se cuenta, no se puede diferenciar con seguridad la descarga del caudal superficial y del subterráneo; sin embargo, se concluye que esos manantiales tienen variaciones debido a la infiltración de fuertes precipitaciones, como es el caso del sistema de Rancho Viejo (Figura 17), por lo que durante esa época cambian sus gastos más rápidamente.

Probablemente, los procesos para la recarga de acuíferos y consecuentemente de los manantiales y otros escurri-

Tabla 2.- Volumen de agua medido en bloque en la estación de aforo Monte Alegre (zona de manantiales de Monte Alegre) durante el mes de abril 1962.

DÍA	HORAS*				m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup>
	6:00	12:00	18:00	24:00		
1	0.065	0.70	0.70	0.070	0.034	2.940
2	0.065	0.070	0.070	0.070	0.034	2.940
3	0.065	0.070	0.070	0.070	0.034	2.940
4	0.065	0.070	0.070	0.070	0.034	2.940
5	0.065	0.070	0.070	0.070	0.034	2.940
6	0.065	0.070	0.070	0.070	0.034	2.940
7	0.065	0.070	0.070	0.070	0.034	2.940
8	0.065	0.070	0.070	0.070	0.034	2.940
9	0.065	0.070	0.070	0.070	0.034	2.940
10	0.065	0.070	0.070	0.070	0.034	2.940
11	0.065	0.070	0.070	0.070	0.034	2.940
12	0.065	0.070	0.070	0.070	0.034	2.940
13	0.080	0.090	0.090	0.090	0.050	4.320
14	0.080	0.090	0.090	0.090	0.050	4.320
15	0.080	0.090	0.090	0.090	0.050	4.320
16	0.080	0.090	0.090	0.090	0.050	4.320
17	0.080	0.090	0.090	0.090	0.050	4.320
18	0.080	0.090	0.090	0.090	0.050	4.320
19	0.080	0.090	0.090	0.090	0.050	4.320
20	0.080	0.090	0.090	0.090	0.050	4.320
21	0.085	0.080	0.080	0.080	0.042	3.630
22	0.085	0.080	0.080	0.080	0.042	3.630
23	0.085	0.080	0.080	0.080	0.042	3.630
24	0.085	0.080	0.080	0.080	0.042	3.630
25	0.085	0.080	0.080	0.080	0.042	3.630
26	0.085	0.080	0.080	0.080	0.042	3.630
27	0.078	0.075	0.075	0.076	0.039	3.370
28	0.078	0.075	0.075	0.076	0.038	3.280
29	0.078	0.075	0.075	0.076	0.038	3.280
30	0.078	0.075	0.075	0.076	0.038	3.280

Volumen mensual en miles de metros cúbicos: 104.83

\*Las mediciones efectuadas cada seis horas corresponden a una escala en metros.

mientos en la zona, pudieran ser diferentes. Es más rápido el cambio de gastos que tienen las descargas de los tipos 2 y 3, que reciben el agua del suelo y la roca fracturada, respecto a algunas descargas del tipo 1 de acuíferos en roca fracturada que pudieran tener un cambio significativo en sus gastos, especialmente durante un tiempo mayor, debido a la influencia de las épocas de secas y de lluvias.

Estas variaciones en la recarga ocasionan que algunos manantiales estén continuamente cambiando su ubicación, dependiendo de la magnitud de la reserva de agua en sus acuíferos. Durante la abundancia del agua en la época de lluvias o

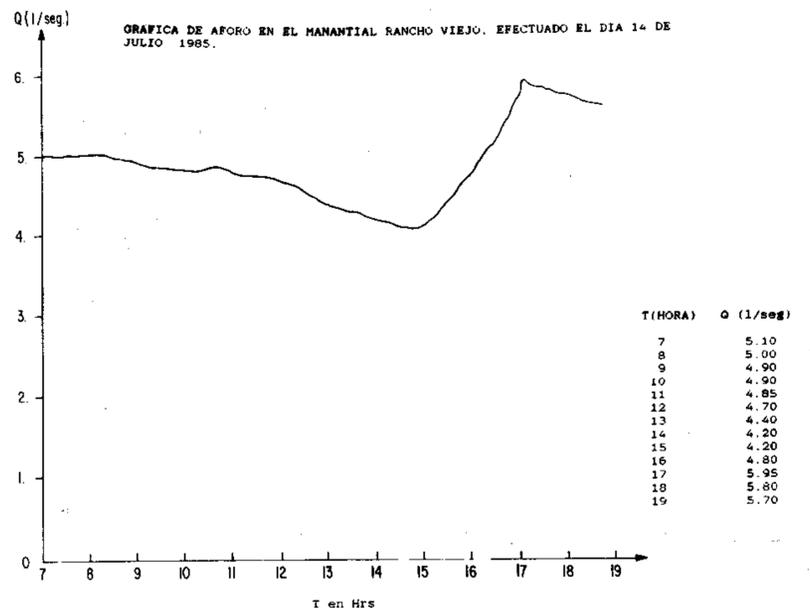


Figura 17.- Gráfica de aforo del manantial Rancho Viejo.

poco después de ella, se tiene la posición más alta topográficamente, que en la mayoría de las ocasiones está marcada por la cabecera de erosión (cabecera de manantial). Durante el tiempo de agotamiento de la provisión del acuífero o época de estiaje, esos manantiales, frecuentemente, se convierten en escurrimientos, cambiando sus posiciones hacia aguas abajo del cauce del arroyo hasta el próximo período de recarga (época de lluvias), en la cual regresan a sus posiciones anteriores, que son las más altas. La variación de la distancia entre la posición más alta en época húmeda y la más baja que se presenta al final del estiaje, comprende desde 2 hasta 90 m.

Para mejorar el conocimiento de la dinámica de los gastos de los respectivos tipos de manantiales, es necesario en el futuro colocar estaciones de medición de los gastos en manantiales y escurrimientos específicos de los diferentes tipos ya mencionados, por lo menos durante un período de un año. Los puntos de medición deben estar ubicados cerca de las descargas, para así disponer de medidas confiables de cada uno de los manantiales.

#### CARACTERÍSTICAS DE LAS ZONAS DE LOS MANANTIALES

Como se mencionó anteriormente, en la Zona II del esquema general de circulación de las aguas subterráneas hay áreas de manantiales y escurrimientos, pero también grandes superficies de terreno en esas elevaciones secas y que presentan algunas descargas de agua con poco volumen en época de lluvias. Cabe hacer notar que las áreas que cuentan con sistemas de manantiales perennes están todas situadas en las montañas, cuya composición litológica corresponde a rocas andesíticas, con una permeabilidad secundaria muy importante y el grado estimado para ésta es de tipo medio.

Estas características ocasionan que las partes altas de estos relieves retengan el agua durante un tiempo mayor, a diferencia de los relieves basálticos, cuya permeabilidad es mucho mayor y el agua se infiltra a profundidad más fácilmente, razón por la cual no hay manantiales en las partes altas del relieve basáltico.

En la zona de Monte Alegre, correspondiente a la sierra del Ajusco, se presenta un sistema de arroyos que recibe el agua de numerosos manantiales y escurrimientos, los cuales se conjuntan posteriormente en la parte baja del sistema.

Debido al cambio de comportamiento crenológico, se puede subdividir la zona de manantiales de Monte Alegre en varias subzonas (Figura 18), que son: (1) subzona de drenaje crenológico, (2) subzona de drenaje mixto con dominio del drenaje crenológico, (3) subzona de drenaje negativo, (4) segunda subzona de drenaje mixto y (5) segunda subzona de drenaje negativo.

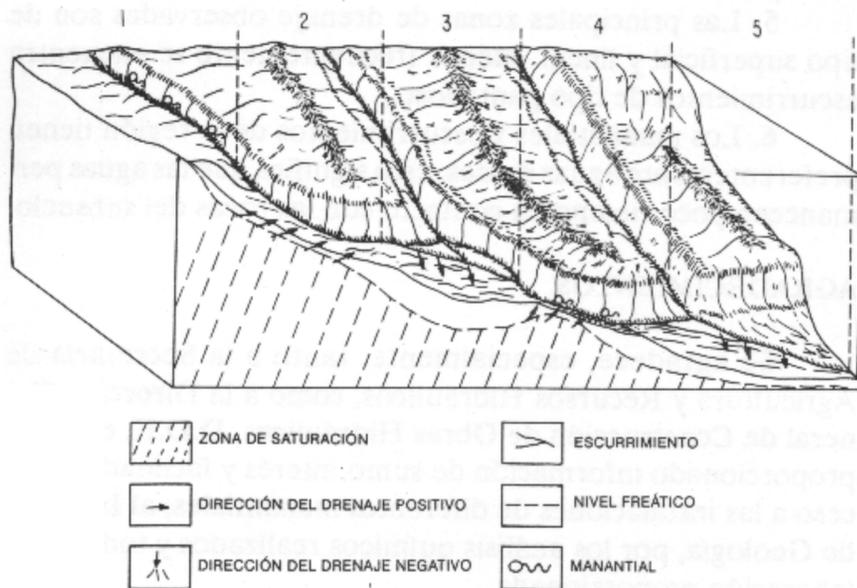


Figura 18.- Zonación crenológica de la subzona II de la Figura 3 en el área de Monte Alegre.

#### Subzona 1 (De drenaje crenológico)

Se localiza en las partes altas del sistema; empieza por el primer manantial o con menor frecuencia en un escurrimiento que es donde se localiza el principio del arroyo. Estos manantiales a veces están enmarcados por la cabecera de erosión, la cual nos indica la posición estable de la descarga, aunque en algunas ocasiones esta cabecera se observa más arriba de donde nace el manantial, como una prolongación de la hondonada, poco profunda y seca. Es probable que estas hondonadas o pequeños valles del arroyo se hayan desarrollado en épocas pasadas, cuando los climas eran más húmedos (Pleistoceno), en las que el acuífero tenía mayores reservas de agua. Aguas abajo de la primera descarga, por el cauce del arroyo, hay muchos manantiales y diferentes tipos de escurrimientos. El arroyo está recibiendo solamente el agua de estas formas crenológicas y, por eso, esa subzona se denomina como de drenaje crenológico.

#### Subzona 2 (De drenaje mixto)

La característica primordial de esta subzona es el aumento efectivo de la profundidad del cauce. El arroyo, debido a su erosión, alcanza la zona de agua subterránea que circula en las rocas, por lo cual está recibiendo una aportación del drenaje no concentrado del agua subterránea alojada en la roca hacia su cauce, así como de abundantes manantiales y escurrimientos tributarios. El cambio de la subzona 1 a la subzona 2, así como de la 2 a la 3 es progresivo, no brusco.

#### Subzona 3 (De drenaje negativo)

Aguas abajo de la subzona 2, la pendiente del cauce del arroyo disminuye, así como la profundidad de la barranca. En esa zona, la profundidad del nivel freático es mayor y no existen ma-

nantiales; el arroyo tampoco recibe agua de su drenaje sino que, por el contrario, la pierde por infiltración a través del cauce.

#### Subzona 4 (Segunda subzona de drenaje mixto)

En esta subzona, la superficie define ya una microcuenca. La unión del caudal principal al que confluyen varios tributarios produce el aumento del volumen de agua en éste, que influye para el crecimiento de la fuerza de erosión, por lo que el cauce logra una profundidad mayor que en la subzona 2; se observa también pequeñas cascadas (Figura 19). La zona de saturación que abastece los afloramientos de agua del fondo del barranco es alimentada por una infiltración que alcanza mayor profundidad. Esta subzona se presenta con más frecuencia que la subzona 2 y es más abundante en formas crenológicas que las otras subzonas; asimismo, el arroyo tiene un fuerte drenaje positivo. Aquí están ubicadas las mejores condiciones para la captación de agua.

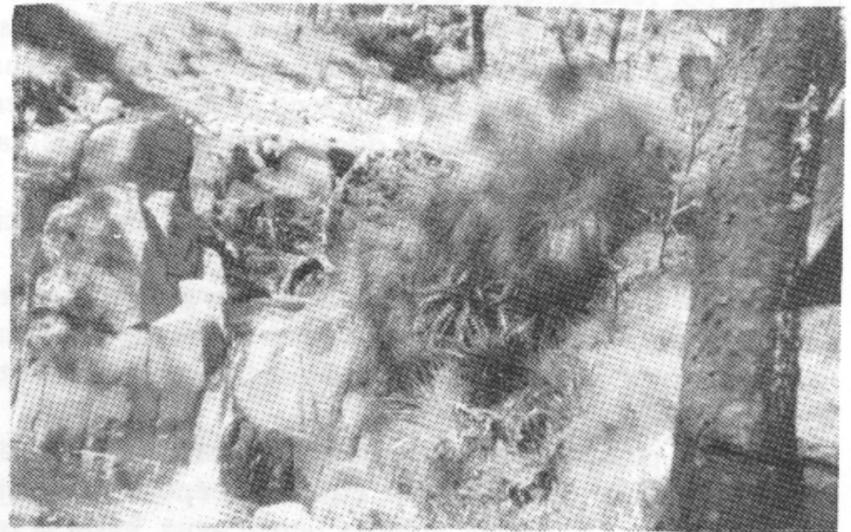


Figura 19.- Arroyo en la parte alta del Ajusco; el caudal sigue la trayectoria concordante de las fracturas.

#### Subzona 5 (Segunda subzona de drenaje negativo)

En esta área el nivel freático está más profundo que el nivel del cauce. El fondo del arroyo está localizado en la zona de aereación, lo que favorece que la infiltración de agua del arroyo sea mayor que en la subzona 3.

En las sierras del Ajusco y de Las Cruces existen grandes zonas de manantiales que presentan una zonación parecida, pero con algunas diferencias causadas por condiciones locales. Por ejemplo, en la zona de manantiales llamada La Saucedá, en la sierra del Ajusco, no se distingue la subzona 3 (drenaje negativo) y posee un mayor predominio de formas de descargas de agua no concentradas y pantanos sobre los manantiales.

En el sistema de río Magdalena (Los Dinamos, Contreras), la subzona 1, en la parte alta, es proporcionalmente corta, con pocos pero distintos manantiales y escurrimientos que cambian a la subzona 3 (primera de drenaje negativo). La subzona 4, segunda de drenaje mixto positivo, es muy distinta y larga, especialmente en los principales tributarios del río Magdalena, ya que los manantiales y los diferentes tipos de escurrimientos en esa subzona están casi exclusivamente en el fondo, así como en las partes bajas de la ladera del barranco.

En la Sierra Nevada, la división hidrológica de la Zona II de la Figura 3, presenta ciertas diferencias respecto a aquéllas de las sierras del Ajusco y de Las Cruces. Estas diferencias

son resultado del tipo de estructura geológica y de la naturaleza de la recarga. Debido a ello, aquí la Zona II alcanza una mayor longitud y llega a confundirse con la Zona III.

A continuación, se describe de forma general la subzona crenológica, pues la presencia de diversas dificultades, tales como lo poco accesible de los sitios de medición en el terreno, y que el período de observación fue corto, entre otros, no permiten ser más específicos.

En las partes bajas de la región donde hay nieve se inician los escurrimientos al derretirse ésta. Aquí es una zona donde hay una infiltración intensa. La duración de la infiltración es función del tiempo de derretimiento.

Como segunda subzona se tiene la de infiltración secundaria. En muchas partes de esta subzona el flujo superficial disminuye totalmente, o existe en forma de arroyos en barrancos muy profundos, con pocos gastos.

La tercera subzona empieza preferentemente abajo de la elevación de 4,000 m s.n.m.\* A diferencia de Monte Alegre, aquí predomina el drenaje crenológico, caracterizado en buena parte por resurgencias, es decir, el agua que se infiltra en las subzonas anteriores sale nuevamente a la superficie. Existen también descargas propias de esta subzona, donde el agua es de mayor profundidad. Esta subzona se puede dividir en dos: (a) alta, con abundancia de diferentes tipos de descarga, y (b) baja, donde hay una menor densidad de manantiales y áreas de drenaje y la distancia entre ellos y los arroyos principales es mayor.

En las partes del terreno donde existen grandes morrenas glaciares, se observa infiltración de las aguas superficiales. En algunas otras, existen manantiales que frecuentemente tienen grandes gastos.

En las partes bajas de las montañas existe la subzona de drenaje negativo (5), en la cual, durante la época de estiaje exclusivamente los arroyos grandes tienen agua, hasta la región de las planicies.

Como ejemplo del sistema crenológico en la zona a los pies de las montañas, en el poblado de Atlautla, en la parte baja del Popocatepetl, existen dos descargas estables localizadas en el fondo de la profunda barranca, que en la época de lluvias tienen carácter típico de manantiales, pero al final de la época de estiaje cambian a escurrimientos con gastos muy pequeños. En la barranca, aguas arriba y abajo de las descargas estables, hay también bastantes descargas periódicas con gastos pequeños, preferentemente del tipo de contacto. Los resultados de los análisis químicos de la muestra de un manantial estable indican que está recibiendo agua de circulación profunda relativa.

## CONCLUSIONES

1. El conocimiento de la situación crenológica en la región (ubicación y evolución de los manantiales y escurrimientos) proporciona información acerca de la situación hidrogeológica, así como del esquema de circulación de las aguas subterráneas.

2. En el esquema general de circulación de las aguas subterráneas en el sur de la Cuenca de México, existen dos zonas donde hay un gran número de manantiales y escurrimientos, denominados Zona II y Zona IV de la Figura 3.

3. Las zonas de drenaje, así como la mayoría de los manantiales, son de tipo de gravedad. Sin embargo, existen ma-

nantiales de tipo de ascensión (donde el agua sale por presión hidrostática). Estas formas de descarga reciben el agua de sistemas de fracturas, que deben estar asociados con fallas más profundas.

4. Cada manantial tiene relativamente, en promedio, gastos muy pequeños. Los grandes gastos se encuentran en los arroyos que están conjuntando las aguas de todos los manantiales y escurrimientos de la zona.

5. Las principales zonas de drenaje observadas son de tipo superficial y lineal. Menos frecuentemente se encuentra escurrimientos de tipo pantanoso.

6. Los manantiales y escurrimientos de la región tienen preferentemente aguas dulces; esto significa que las aguas permanecen poco tiempo en contacto con las rocas del subsuelo.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece, especialmente, tanto a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, como a la Dirección General de Construcción de Obras Hidráulicas, D.D.F., el haber proporcionado información de sumo interés y facilitado el acceso a las instalaciones de diferentes manantiales; al Instituto de Geología, por los análisis químicos realizados y toda la colaboración proporcionada.

Se expresa la más profunda gratitud a todas aquellas personas que en un momento dado colaboraron a hicieron posible la culminación de esta investigación.

## GLOSARIO

Crenología—del griego *crenos* = fuente, manantial. Ciencia de los manantiales.

Potamología—del griego *potamos* = río. Ciencia de los ríos.

Zona de drenaje—salida o afloramiento no concentrado de agua subterránea a la superficie dando origen a un escurrimiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Departamento del Distrito Federal, 1975, Memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal: México, D. F., Tomo I, p. 9-68; Tomo III, p. 47-72 y 157-184.
- DETENAL, 1983, [Hoja] Ciudad de México (E14-2): México, D. F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Dirección de Estudios del Territorio Nacional, Carta Hidrológica Aguas Subterráneas, escala 1:250,000.
- Freere, R. A., y Cherrey, J. A., 1979, Groundwater: New Jersey, Englewood Cliffs, 609 p.
- Huízar-Álvarez, Rafael, 1989, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la plaine de Chalco-Amecameca et de son bassin Versant (Mexique): Université de Franche-Comte, tesis doctoral, 160 p. (inédita).
- Loehberg, A., 1959, Study of the groundwater resources available in the SW of the Valley of Mexico: México, D. F., Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Meinzer, O. E., 1927, Large springs in the United States: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 557.
- Pazdro, Z., 1977, Hydrogeologia agulna Wyd: Geol. Warszawa, 506 p.
- Todd-Keith, David, 1976, Groundwater Hydrology: Nueva York, John Wiley and Sons, 535 p.
- Tomaszewski, Jan, 1977, Charakterystyka krenologiczna masywukrystalinnego na przykładzie: Acta. Univ. Urat. 358, t. 38, 70 p.
- , 1982, Problem mineralizacji wód strefie postsuchey na przykładzie z potrocznego, Graku, Crasop. Geogr., t. 53, p. 3-4.

Manuscrito presentado: 11 de noviembre de 1985.

Manuscrito corregido devuelto por el autor: 13 de marzo de 1990.

Manuscrito aceptado: 18 de octubre de 1990.

\*Las elevaciones de las fronteras son diferentes, dependiendo de las condiciones locales en las respectivas cañadas.