

# **El Túnel, un manantial en Cuernavaca, Mor. (México)**

Henryk Niedzielski

*Universidad Autónoma Metropolitana, México, D. F.*

Recibido: 28 de Septiembre, 1992; 3 de Mayo, 1993.

## **RESUMEN**

El Túnel, un manantial abierto artificialmente en basaltos del Chichinautzin, revela que el acuífero en los basaltos se drena a través de túneles que tienen cierta semejanza al karst. El análisis de su diagrama del caudal demuestra que existe recarga del acuífero por la vía rápida y lenta. Esto permite explicar porqué los manantiales en el período seco mantienen un gran caudal, y entender el funcionamiento del acuífero. El Túnel constituye un manantial estable con bajo coeficiente de agotamiento durante el período sin influencia de lluvias.

**PALABRAS CLAVE:** Chichinautzin, manantial, recarga, México.

## **ABSTRACT**

EL Tunnel, an artificial spring opened in the Chichinautzin basalts, reveals that flow in the basalts aquifer is similar to that found in karst formations (pseudokarst features). Analysis of the flow diagram shows that the aquifer recharge is accomplished through both fast and slow flow paths. This explains the elevated flowrate of the springs in the dry season and permits an understanding of the aquifer behavior. El Tunnel may be characterized as a stable spring with a low depletion coefficient during the dry season.

**KEY WORDS:** Chichinautzin, spring, recharge, Mexico.

## **INTRODUCCION**

Los basaltos de la Sierra Chichinautzin, ubicada entre la cuenca de México y la cuenca de Cuernavaca, forman un importante acuífero que despierta un gran interés entre los hidrogeólogos para entender su funcionamiento. Un elemento que puede arrojar luz sobre este problema es, entre otros, el estudio del régimen de los manantiales que constituyen un drenaje natural del acuífero.

En la parte sur de la Sierra Chichinautzin aparecen varios importantes manantiales, entre ellos el Túnel (llamado también Túnel-Cárcamo), que suministra agua potable a Cuernavaca y el cual es el objeto del presente trabajo.

El manantial se ubica a un kilómetro aproximadamente al norte del zócalo de Cuernavaca sobre la ladera oriental de una barranca que atraviesa esta ciudad desde el norte hacia el sur (Figura 1). El manantial artificialmente profundizado para obtener mayor gasto, presenta un fenómeno muy interesante tanto de la forma como brota, como desde el punto de vista de su régimen.

## **DESCRIPCION DEL MANANTIAL**

Sobre el margen oriental de la barranca que corta verticalmente los sedimentos de la formación Cuernavaca a profundidad de 50 m aproximadamente, anteriormente brotaba un manantial. Para aumentar su gasto, en el año de 1932 se ha excavado un túnel de aproximadamente 150 m de largo y con entrada a unos 6 m sobre el fondo de la barranca (Foto 1).

El túnel contiene un canal y un pasillo estrecho adyacente para el paso de una persona (Foto 2). A lo largo de

125 m el túnel corta los sedimentos de la formación Cuernavaca, constituidos por cantos, grava, arena arcillosa y arcilla alternados. En algunos lugares las paredes están húmedas y se observa ligero goteo. A una distancia de 125 m, el túnel se bifurca (Figura 2); un ramal se desvía a la izquierda y el otro sigue derecho unos 40 m, excavado totalmente en basaltos fracturados. La rama izquierda continúa cortando la formación Cuernavaca y a 40 m de distancia se bifurca en otros dos ramales de unos 5-6 m de largo los cuales entran en basaltos y allí captan el agua. El contacto entre los sedimentos de la formación Cuernavaca y los basaltos del grupo Chichinautzin es vertical.

En los extremos de los tres ramales aparecen tres importantes cascadas. El fenómeno es tan fascinante como sorprendente (Foto 3). En el ramal de la extrema izquierda, que permite mejor acceso a la cascada, se puede observar en el techo del túnel, en los basaltos, cerca del contacto con los sedimentos, una caverna de un diámetro de 0.8 m aproximadamente, de la cual cae verticalmente una gran cantidad de agua. La situación es similar en las otras dos cascadas así como en la cuarta, de menor importancia (Foto 2).

La gran variedad de rocas que constituyen la Sierra Chichinautzin (lava, tezontle, piroclásticos, brecha, toba, etc.) indudablemente favorece los procesos de erosión subterránea para formar grutas y túneles conocidos como pseudokarst (Wood y Fernández, 1988). Estos fenómenos se pueden observar claramente, por ejemplo, en las escarpas de la autopista México-Cuernavaca.

Es probable que las cascadas se formaron artificialmente cuando las excavaciones cortaron los túneles naturales y

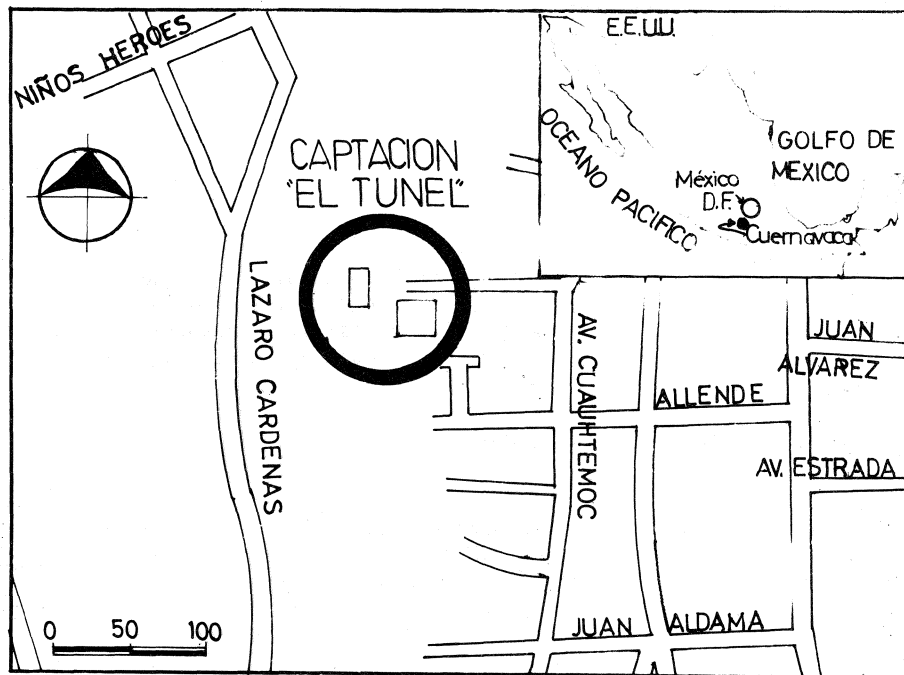


Fig. 1. Localización del manantial El Túnel en Cuernavaca, Mor.



Foto 1. Entrada al Túnel con la vista del fondo y de las paredes de la barranca.

abrieron huecos donde empezó a caer el agua. El hecho es que el acuífero se drena rápidamente por medio de grandes túneles donde probablemente prevalece un flujo turbulento.

Los dos ramales de la izquierda captan una corriente subterránea aproximada de 150 l/s, y el ramal de la dere-

cha capta unos 250 l/s. El personal de operación del sistema supone que estas dos corrientes son de diferente origen, lo que aparentemente comporta una diferencia de temperatura de 4 °C (Constructores, 1989). Esta opinión no se puede confirmar. Según las mediciones efectuadas por el autor el 14 de mayo de 1992 la temperatura del agua en la corriente de la izquierda fué de 15.4 °C y en la del ramal

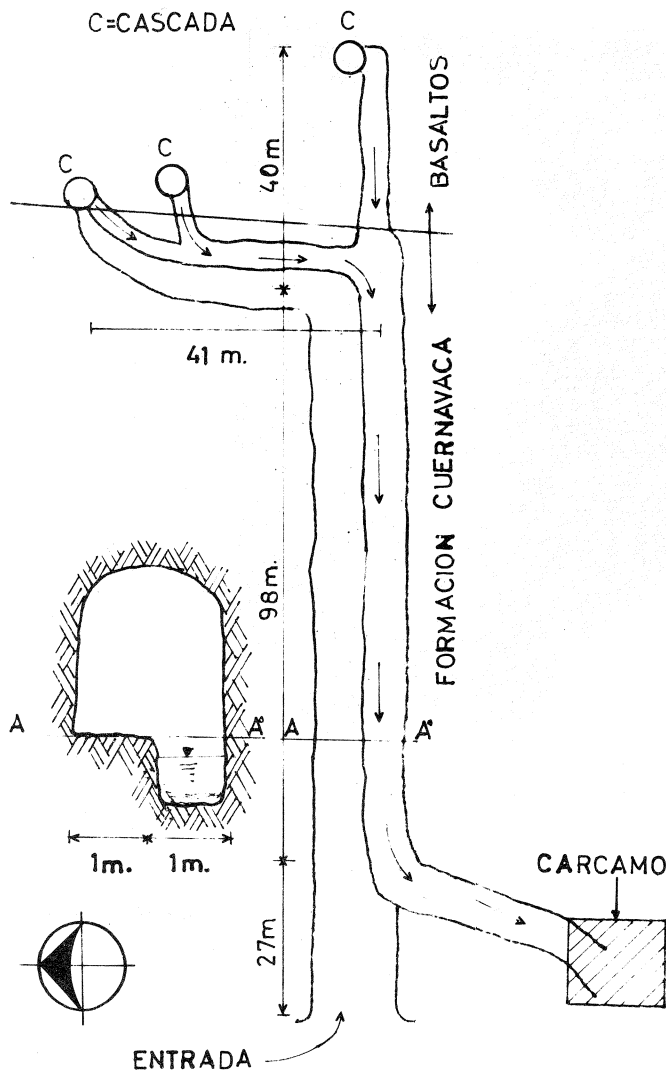


Fig. 2. Croquis del Túnel.

derecho de 15.9 °C. La pequeña diferencia de temperatura se explicaría porque en el primer caso se midió la temperatura cerca de la cascada y en el otro unos 40 m abajo de la cascada. En esta distancia el agua se calentó con el aire que entra al túnel. Donde se juntan las dos corrientes, la temperatura del agua fué de 16.2 °C. Las mediciones repetidas el 23 de junio confirmaron los resultados anteriores.

En las estaciones climatológicas de Huitzilac y Cuernavaca, entre las cuales se encuentra el túnel, la temperatura media ambiental para los últimos 10 años es de 12.46° y 20.68 °C respectivamente; la temperatura del agua en el túnel se aproxima al promedio de estos dos valores.

Otros parámetros medidos en las dos corrientes y en el lugar donde se juntan fueron: la conductividad, con 101, 96.7 y 107  $\mu\text{S cm}^{-1}$  y el pH con 7.2, 7.3 y 7.5 respectivamente. El análisis químico del agua para el túnel al 11 de diciembre de 1990 efectuado por el laboratorio del Sistema de Agua Potable de Cuernavaca, da resultados

compatibles con las mediciones anteriormente citadas y prueba la baja mineralización general del agua. Este análisis arroja los siguientes valores: pH 6.8, sólidos disueltos 96 mg/l, bicarbonatos 75.0 mg/l, cloruros 10.0 mg/l, calcio 13.0 mg/l y magnesio de 15.0 mg/l.

La empresa CONSTRUCTORES (1989) hizo aforos en diferentes tramos del túnel y determinó que a lo largo de 98 m del túnel principal se pierde por filtración 23 l/s y en un ramal que conduce al cárcamo se pierden en 53 m unos 18 l/s. En total las pérdidas son de 41 l/s. Las pérdidas de agua a lo largo del túnel son estimativas debido a la técnica de aforo (velocidad medida con flotadores y sondeo de secciones sin precisión). Se tomó la decisión de entubar la corriente, lo que tiene justificación desde el punto de vista sanitario, pero probablemente impedirá el aforo futuro del manantial.

### REGIMEN DEL MANANTIAL

El Servicio Hidrométrico de Morelos (SARH) inició el aforo del túnel en abril de 1949, siendo interrumpido en diciembre de 1950. Las mediciones se han reanudado en enero de 1968 con múltiples interrupciones hasta julio de 1971. Los datos más completos de este período son del año 1969. Reiteradamente se reanudó el aforo de 1976 a 1977 y finalmente, en el período más largo, de 1986 a 1990. Los datos en este último período son los más completos.

En la gráfica (Figura 3) se puede observar el cambio del gasto medio anual desde 1949 hasta 1990 para los años que tienen datos completos o casi completos. Se observa que:

- 1) En el período de 42 años, el gasto medio anual descendió de 1,712 l/s en 1949 a 343 l/s en 1990.
- 2) En los últimos 5 años, el gasto parece ser estable y muestra oscilaciones naturales.

En cuanto a la primera observación, el fuerte descenso del caudal del túnel en un factor de cinco se debe indudablemente al incremento, en este período, de la explotación del agua subterránea por medio de pozos. Solamente arriba del túnel, hasta el año 1981, se han perforado cerca de 32 pozos (Tacsá, 1981); y en la cuenca de Cuernavaca, únicamente para agua potable, alrededor de 130 pozos hasta la fecha (información del Ing. Maldonado). Es probable que todos estos pozos, y no solamente los ubicados arriba del túnel, influyan sobre el gasto de dicho manantial. Por ejemplo, en el área de CIVAC (Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca), la intensa explotación del agua subterránea produjo un descenso de nivel de 33 m durante el período de 1965 a 1990 (Molina 1991).

Por otra parte, al otro lado de la Sierra de Chichinautzin, en el Valle de México, la explotación del agua subterránea en el período considerado creció fuertemente, superando la recarga natural (Murillo, 1990). Todo ello coincide para justificar el descenso del caudal del manantial.

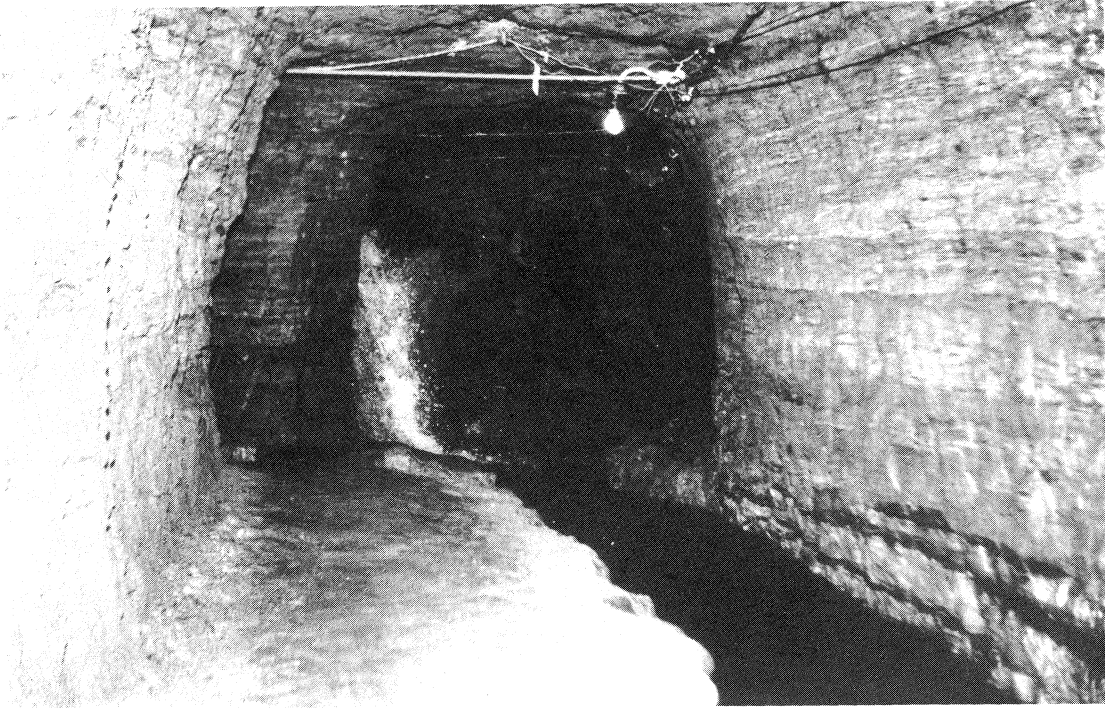


Foto 2. Vista general del Túnel. En el fondo se encuentra una cascada de menor importancia.

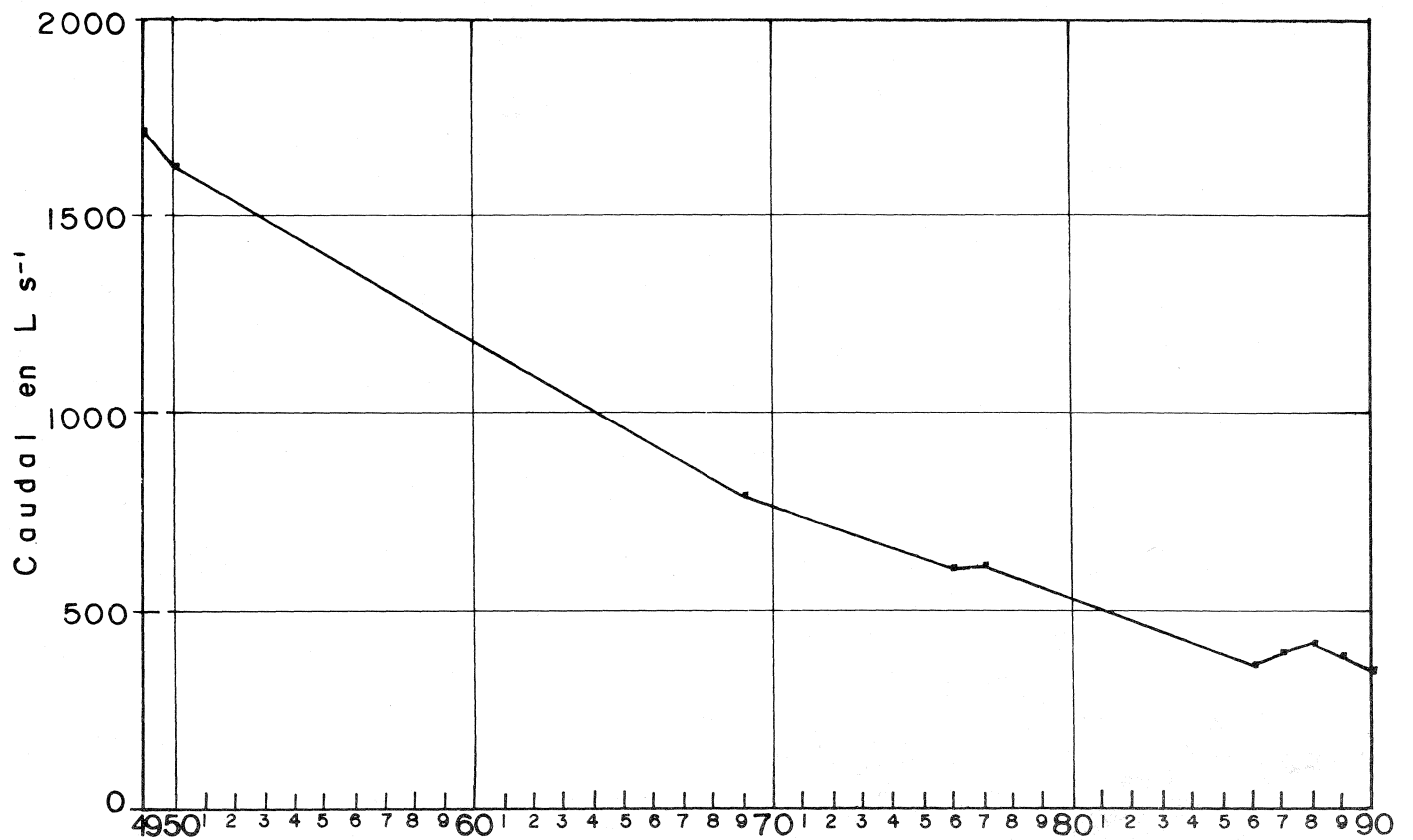


Fig. 3. Caudal medio anual del Túnel de 1949 a 1990.

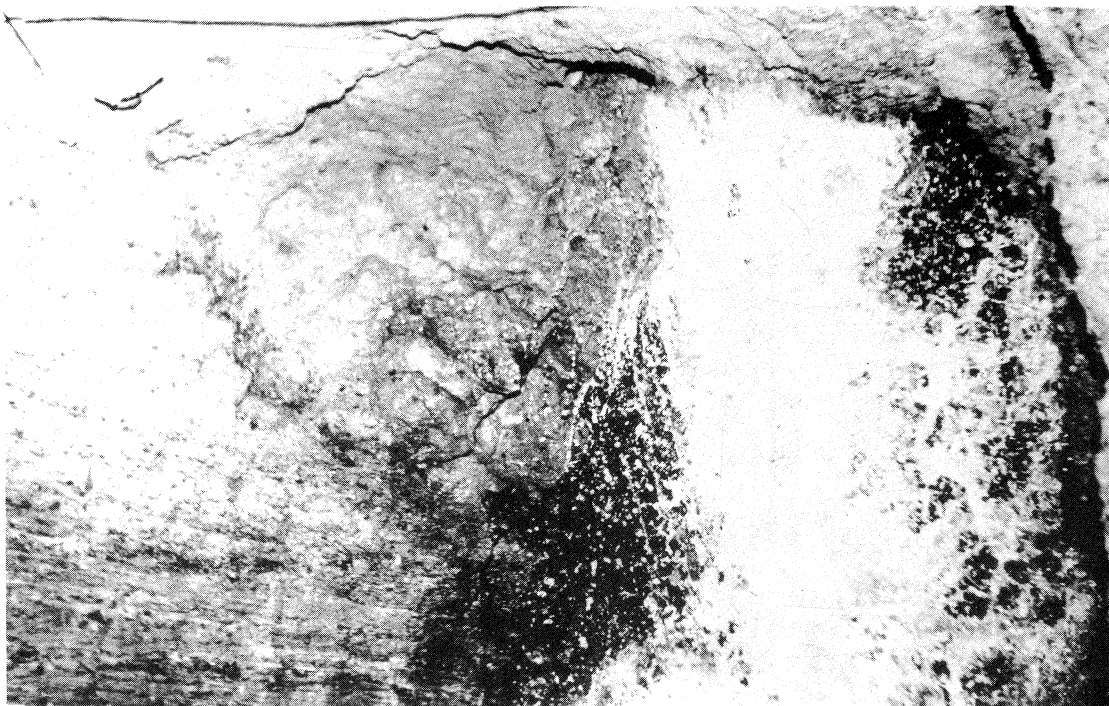


Foto 3. La cascada en el ramal de la extrema izquierda del Túnel.

En cuanto al punto 2 es conveniente analizar en detalle el régimen del manantial durante los últimos años. En la Figura 4 se presentan las precipitaciones mensuales y máximas por 24 horas de la estación pluvial Huitzilac, ubicada en la Sierra Chichinautzin (aguas arriba del túnel), así como el caudal medio mensual del manantial del período de 1986 a 1990. De la relación entre precipitación y caudales queda en claro que el manantial es meteórico ya que su gasto está relacionado con las lluvias. Durante los meses lluviosos, de mayo a septiembre, aumenta el caudal en proporción a la precipitación. Sin embargo, hay otro fenómeno bien marcado. Durante los meses secos (noviembre-diciembre), la curva del caudal muestra otro aumento. Este fenómeno se repite durante tres años consecutivos (1987-1989), lo que indica que se trata de un fenómeno constante. Esta observación tiene mucha importancia para entender el funcionamiento del acuífero fracturado en los basaltos de Chichinautzin.

En la zona austral de la Sierra de Chichinautzin aparecen muchos grandes manantiales ubicados entre Cuernavaca y Cuautla que sorprenden por su constante y a veces creciente caudal durante la larga época de estiaje (Niedzielski, 1988, 1989, 1990). Esto significa que deben existir dos fases de recarga del acuífero: una rápida que se manifiesta con la inmediata reacción a la precipitación, y otra lenta que llega a la zona de descarga con retraso de varios meses. Esta situación podemos analizarla con base en los datos diarios del año 1988, que son más completos que los actuales (Figura 5). En la gráfica se observa que la relación entre las precipitaciones y el gasto del manantial marcó tres períodos:

(1) Durante la época de lluvias, de la segunda parte de mayo a la segunda parte de septiembre, se observa la rápida

reacción del gasto del manantial a las lluvias. Para fuertes precipitaciones el gasto reacciona con retraso de 1 a 3 días. En los últimos días de septiembre, las lluvias desaparecen y el caudal descende.

(2) Durante los tres meses siguientes, que prácticamente no tienen precipitación, el caudal crece y presenta dos picos análogos a los de los meses lluviosos: uno a mitad de noviembre y el otro al principio de diciembre. Estas dos olas de aumento de caudal representan una reacción a la recarga diferida del período lluvioso.

(3) De enero a la primera década de marzo el caudal se mantiene casi constante con ligeras oscilaciones y luego, hasta la primera parte de mayo, baja gradualmente de manera típica para una época sin influencia de lluvias.

Para explicar este fenómeno son relevantes los experimentos efectuados en el sur de Francia en la zona kárstica (Drogue, 1992). En las rocas macizas (calizas) la recarga de lluvias llegaba a la zona saturada de dos maneras: como flujo rápido por fracturas abiertas, y como flujo lento a través de una red de finas fisuras. Drogue subraya que su idea del flujo rápido y diferido, bien conocida para acuíferos intergranulares, es nueva en acuíferos fisurados. Aunque sus observaciones en calizas fueron en la zona somera de 5 m bajo la superficie del terreno (es decir, en condiciones diferentes a nuestro caso), sin embargo, los resultados obtenidos ayudan a explicar el régimen del túnel.

La zona saturada del acuífero en los basaltos de Chichinautzin está fuertemente drenada por un sistema de túneles. Suponemos en analogía a las observaciones de Drogue, que la zona saturada se recarga por vía rápida a través de grietas abiertas y cavernas, y por vía lenta mediante una red de fisuras y poros existentes en el macizo basáltico.

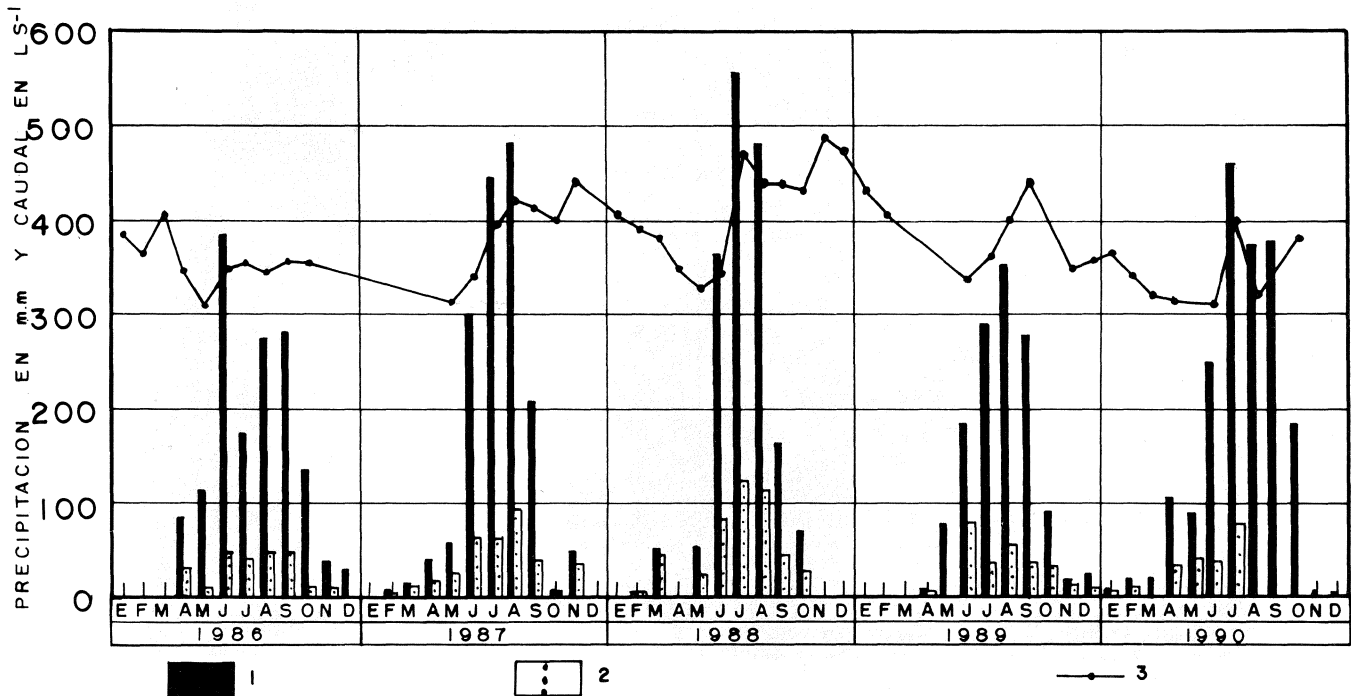


Fig. 4. Hidrograma que demuestra el sistema de doble recarga: por la vía rápida (en el período de lluvias) y por la vía lenta (en el período seco). 1-Precipitación mensual (estación Huitzilac)-años 1986-1990; 2-Precipitación máxima en 24 horas, idem; 3-Caudal del Túnel.

El primer tipo de recarga se manifiesta por la rápida reacción del caudal del manantial a la precipitación. La segunda recarga alcanza la zona de saturación con un considerable retraso, lo que es comprensible si se toma en cuenta que el espesor de la zona de aireación en las montañas, según nuestras observaciones (Niedzielski, 1991) es mayor que 200 m. Por ello la influencia del segundo tipo de recarga se manifiesta como un aumento del caudal durante los primeros cinco meses secos.

Finalmente, la descarga del acuífero a través del manantial El Túnel en régimen no influenciado dura apenas de marzo a mayo, lo que explica la típica curva de regresión del hidrograma (Figura 6).

Un comportamiento similar se observa en el hidrograma del manantial de Agua Hedionda, cerca de Cuautla (Niedzielski, 1988). En este caso el máximo caudal del manantial registrado al principio de marzo se ha interpretado como retraso de la reacción de lluvias debido a la distancia entre la zona de recarga y descarga. Esta interpretación se basaba en el hecho que el manantial Agua Hedionda es de tipo ascendente (El Túnel es de tipo descendente), y las observaciones eran imprecisas ya que se efectuaban una vez al mes. Ahora, a la luz de los datos de El Túnel, aparece que la recarga diferida registrada en Agua Hedionda podría también deberse principalmente a un doble sistema de recarga del acuífero. Esto significa que el fenómeno observado en El Túnel no es local sino regional.

Los gastos del Túnel en el período de marzo a mayo, graficados a escala semilogarítmica, se presentan como una recta de agotamiento (Figura 6). Esto nos permite determi-

nar el coeficiente de agotamiento  $\alpha$  en la fórmula de Maillet (1905)

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

donde  $Q$  es el caudal del manantial en el momento  $t$ ;  $Q_0$  es el caudal inicial;  $\alpha$  es un coeficiente que depende de las características geométricas e hidráulicas del acuífero (Bear, 1979);  $t$  es el tiempo en días desde el momento inicial.

Para los datos de 14-03-88 (381 l/s) y de 23-05-88 (308 l/s) el valor de  $\alpha$  es de  $3.04 \times 10^{-3}$  que el manantial tiene un régimen que sigue la fórmula:

$$Q = Q_0 e^{-0.00304t} \quad (2)$$

El coeficiente de agotamiento es bajo, lo que confirma los grandes recursos del acuífero. Por ejemplo, para las condiciones iniciales del 14 de marzo, el volumen de agua almacenada ( $V=Q_0$  en  $m^3 \times 86,400/\alpha$ ) es de  $10.8 \times 10^6 m^3$ . Sin embargo, al no conocer los parámetros geométricos del acuífero desaguado por El Túnel, no podemos relacionar este volumen con una área definida. Además, ya que el período considerado como libre de la influencia de lluvias no está exento de la influencia del bombeo de los pozos, lo que reduce su capacidad aún más, no podemos calcular los parámetros hidráulicos de la formación acuífera.

Los grandes recursos del acuífero son confirmados por el índice de variación del manantial ( $R = Q_{max}/Q_{min}$ ). Para el período de 1986 a 1990, según los gastos medios

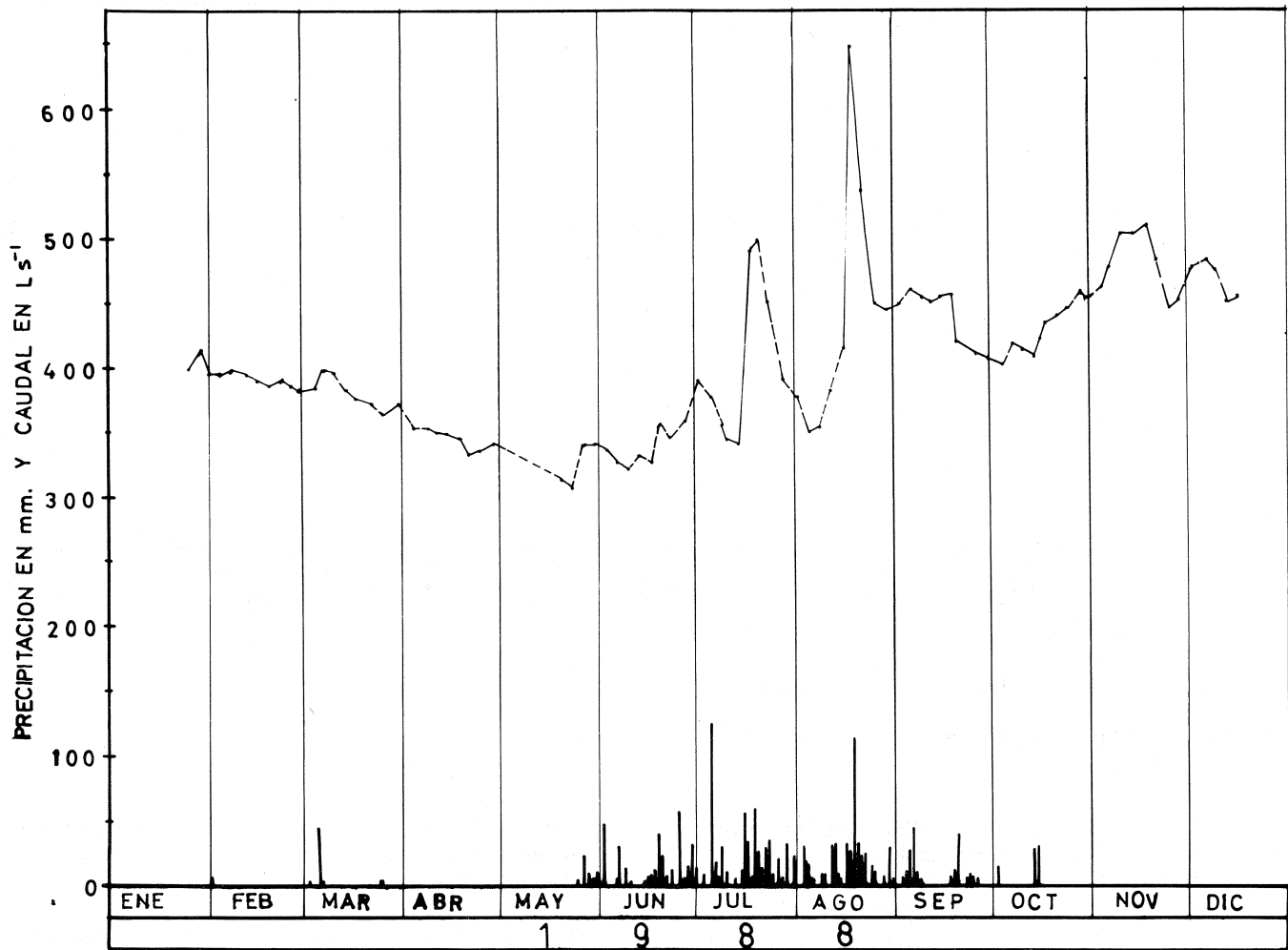


Fig. 5. Precipitación (Huitzilac) y caudal (El Túnel) diario de 1988. Se puede observar la rápida reacción del caudal a lluvias, el aumento del caudal en los meses secos de manera analógica como se ha aumentado en los meses lluviosos y régimen no influenciado de marzo a mayo.

mensuales,  $R = 1.58$  y según los gastos diarios  $R = 2.0$ . Ambos valores caracterizan un manantial de caudal estable.

### CONCLUSIONES

Se ha propuesto una explicación de la observación notable que los manantiales que drenan el acuífero del Chichinautzin, durante el período seco de octubre a marzo, no disminuyen su caudal sino, al contrario, lo aumentan. Este fenómeno es muy importante desde el punto de vista del uso de los manantiales como fuentes de suministro de agua; sin embargo, no significa que sus recursos sean inagotables.

Se observa con claridad la influencia de la explotación de pozos en el gasto de manantial El Túnel. La reducción de su caudal podría ser equivalente al gasto total del conjunto de los pozos influyentes, en cuyo caso el sentido económico de las nuevas perforaciones sería dudoso. Este aspecto debe ser tomado en cuenta por las autoridades antes de decidir la localización y perforación de nuevos pozos.

### AGRADECIMIENTOS

Expreso mis agradecimientos al Ing. A. Maldonado, Director General del Sistema de Agua Potable de Cuernavaca, por facilitarme el acceso al Túnel, a los Ingenieros A. de la Hoz Viñas y A. Díaz Díaz por haberme proporcionado los datos de los aforos, y a mi esposa Melinda, por acompañarme en los trabajos de campo.

### BIBLIOGRAFIA

- BEAR, J., 1979. *Hydraulics of Groundwater*. McGRAW-HILL Series in Water Resources and Environmental Eng., 567.
- DROGUE, C., 1992. *Hydrodynamics of Karstic Aquifers: Experimental Sites in the Mediterranean Karst, Southern France. IAH Hydrogeology of Selected Karst Regions*, 13, 133-149.

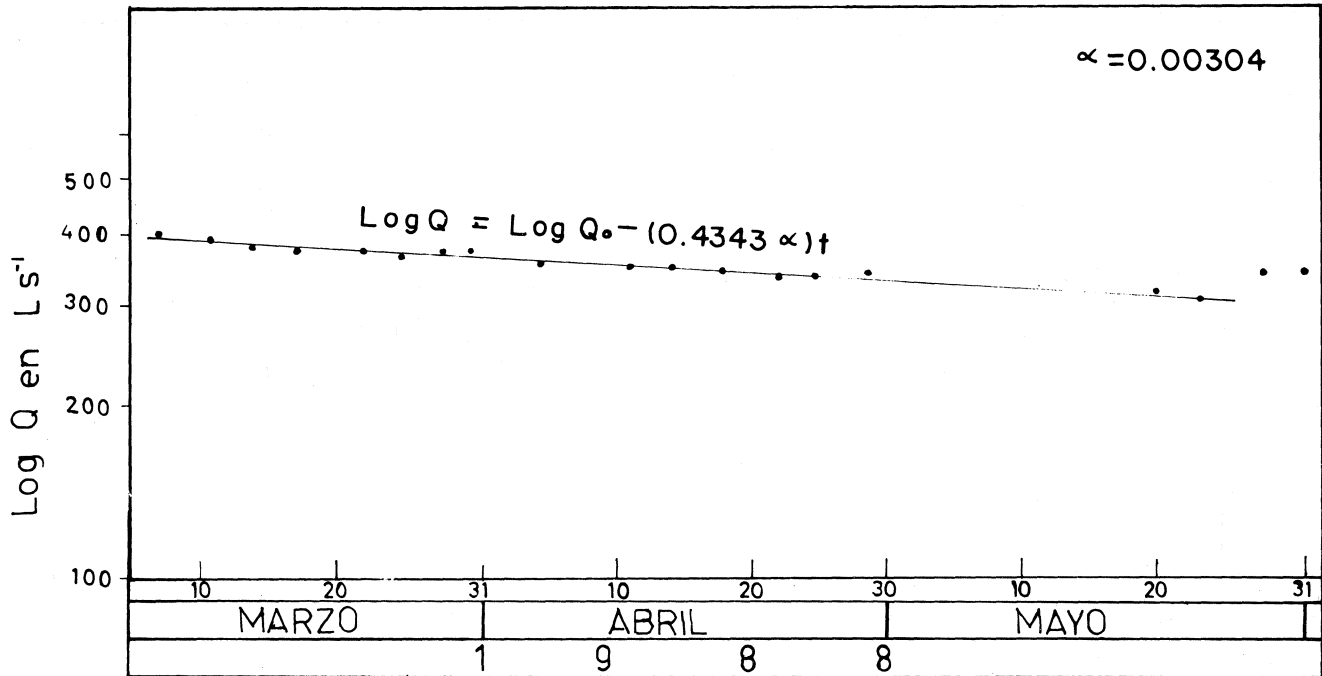


Fig. 6. Caudal del Túnel en el período sin influencia de lluvias, graficado en papel semilogarítmico.

- CONSTRUCTORES, 1989. Proyecto estación de bombeo Túnel. Inédito.
- MAILLET, E., 1905. Essais d'Hydraulique Souterraine et Fluviale. Herfmann, Paris, 1-218.
- MOLINA TORRES, C., 1991. El problema geológico del abastecimiento de agua en Cuernavaca. *Ing. Hidr. en México*, VI, 1, 9-13.
- MURILLO FERNANDEZ, R., 1990. Sobreexplotación del acuífero de la cuenca del valle de México: efectos y alternativas. SMMS "El subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo", 109-118.
- NIEDZIELSKI, H., 1988. Características de los manantiales de Agua Hedionda y El Almeal en Cuautla, Morelos. X Congr. Nac. Hidraul. Mor., Mich. Memoria, 42-52.
- NIEDZIELSKI, H., 1990. Characteristic Manner of Groundwater Discharge in the Cuautla River Sub-Basin (Mexico). XXII Congr. IAH, Lausanna, Suiza, Mémoires, XXII, 1, 563-570.
- NIEDZIELSKI, H., 1991. Resultados de la elaboración del mapa hidrogeológico, escala 1:50 000, hoja Cuautla, Univ. Ciencia y Técn., 1, 4, 3-17.
- TACSA, 1981. Estudio geohidrogeológico preliminar del valle de Cuernavaca, en el Estado de Morelos, inédito.
- WOOD, W. W. y L. A. FERNANDEZ, 1988. Volcanic rocks, Chapter 39. *En: The Geology of North America*, Vol. 0-2, Hydrogeology, G. S. A., 353-364.

Henryk Niedzielski  
 Universidad Autónoma Metropolitana  
 Unidad Iztapalapa  
 División de Ciencias Básicas e Ingeniería  
 Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica  
 México, D. F., MEXICO.