

**GEOQUIMICA ISOTOPICA DEL SISTEMA HIDROGEOLOGICO DEL VALLE
DE CUERNAVACA, ESTADO DE MORELOS, MEXICO**

L. R. JAIMES-PALOMERA*
A. CORTES-SILVA*
E. VAZQUEZ-SANCHEZ*
R. ARAVENA**

P. FRITZ***
R. DRIMMIE**

RESUMEN

50 km al sur de la Ciudad de México se encuentra el Valle de Cuernavaca, el cual cuenta con un sistema hidrogeológico complejo, con acuíferos en calizas y dolomías, basalto y material clástico. Con objeto de conocer los mecanismos de recarga, las relaciones entre los acuíferos y el origen del agua en el acuífero en calizas y dolomías, se interpretaron los resultados fisicoquímicos e isotópicos: ^{18}O , ^2H , ^3H , ^{34}S , ^{13}C y ^{14}C , obtenidos para los acuíferos de la región estudiada. Los resultados indican que la mayor parte de la recarga ocurre en las sierras Chichinautzin y Zempoala. Pequeñas variaciones isotópicas en un gran número de muestras apoyadas por datos químicos y geológicos, demuestran que es posible distinguir con cierta certeza la procedencia de la recarga. El alto contenido de azufre en algunas muestras tiene un origen evaporítico de edad Cretácica, con excepción de una muestra del acuífero en lahares y tobas andesíticas, cercana a la sierra Chichinautzin, en la cual el azufre tiene un posible origen volcánico. La geoquímica de algunos manantiales del acuífero calizo y las estimaciones de sus tiempos de residencia - que en algunos casos son menores de 50 años - indican la presencia de una mezcla de aguas de distinto origen entre sí, en las zonas de descarga del acuífero calizo. Este comportamiento se debe al funcionamiento del sistema cárstico.

* Instituto de Geofísica, UNAM. 04510, D. F., MEXICO.

** Waterloo Centre for Groundwater Research, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, CANADA.

*** GSF, Institut für Hydrologie, Neuherberg, F. R. G.

ABSTRACT

Aquifers formed by karstic limestones, fractured basalts and clastic sediments are part of a complex hydrogeological system in the Cuernavaca Valley. This area is located 50 km south of Mexico City. Environmental isotopes (^{18}O , ^2H , ^3H , ^{34}S , ^{13}C , ^{14}C) and geochemical data have been used to study the recharge mechanism, the origin of the groundwater and the relationships between the different aquifers in this area. These data show that most of the recharge takes place in Chichinautzin and Zempoala ranges situated in the highland to the north. Different recharge areas are identified based on small but consistent isotopic differences. This is supported by chemical and geological information. Sulphur and oxygen isotopes data in aqueous sulphate, indicated that the sulphur source of the groundwater with high sulphate concentration is evaporites of Cretaceous age. Sulphur of volcanic origin is present in groundwater close to the recharge areas. Geochemical data and evaluation of residence time using ^3H and ^{14}C indicated the presence of a mixture of water of different origin in some discharge areas of the karstic aquifer.

INTRODUCCION

Antecedentes, objetivos y métodos de trabajo

El presente estudio se inició como parte de un proyecto de la Comisión de Aguas del Valle de México de la SARH, a través del Instituto de Geofísica de la U.N.A.M.; su objetivo principal fue el de conocer la posible comunicación entre los acuíferos del sur de la Cuenca de México y los del Estado de Morelos; para llevarlo a cabo, se tomaron muestras de 70 aprovechamientos en el Valle de Cuernavaca. Dicho valle se encuentra 50 km al sur de la Ciudad de México (figura 1). Manantiales, pozos y norias son las fuentes de abastecimiento de dicho valle y sus aguas fueron analizadas aplicando técnicas basadas en la medición de los isótopos ambientales del agua: tritio, oxígeno-18 y deuterio. Asimismo, se seleccionaron 16 aprovechamientos en cuyas muestras se efectuaron análisis físicoquímicos (CAVM-IGF, 1987). Los resultados de dichos análisis indican que la recarga proviene de la sierra Chichinautzin y que existen acuíferos más profundos, con agua de más de 40 años de haberse infiltrado, recargados en la misma sierra.

Debido a la creciente importancia de éste sistema hidrogeológico por encontrarse cerca de la Ciudad de México y para conocer el funcionamiento de la Sierra Chichinautzin, zona de recarga tanto para la Cuenca de México como para los valles de Cuernavaca, Yautepec y Cuautla, el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M., en colaboración con el Waterloo Centre for Groundwater Research de la U. de Waterloo, decidió ampliar los estudios en esta región. Dichos estudios forman parte del macroproyecto Aquifer Development, auspiciado por el International Development Research Center del gobierno de Canadá.

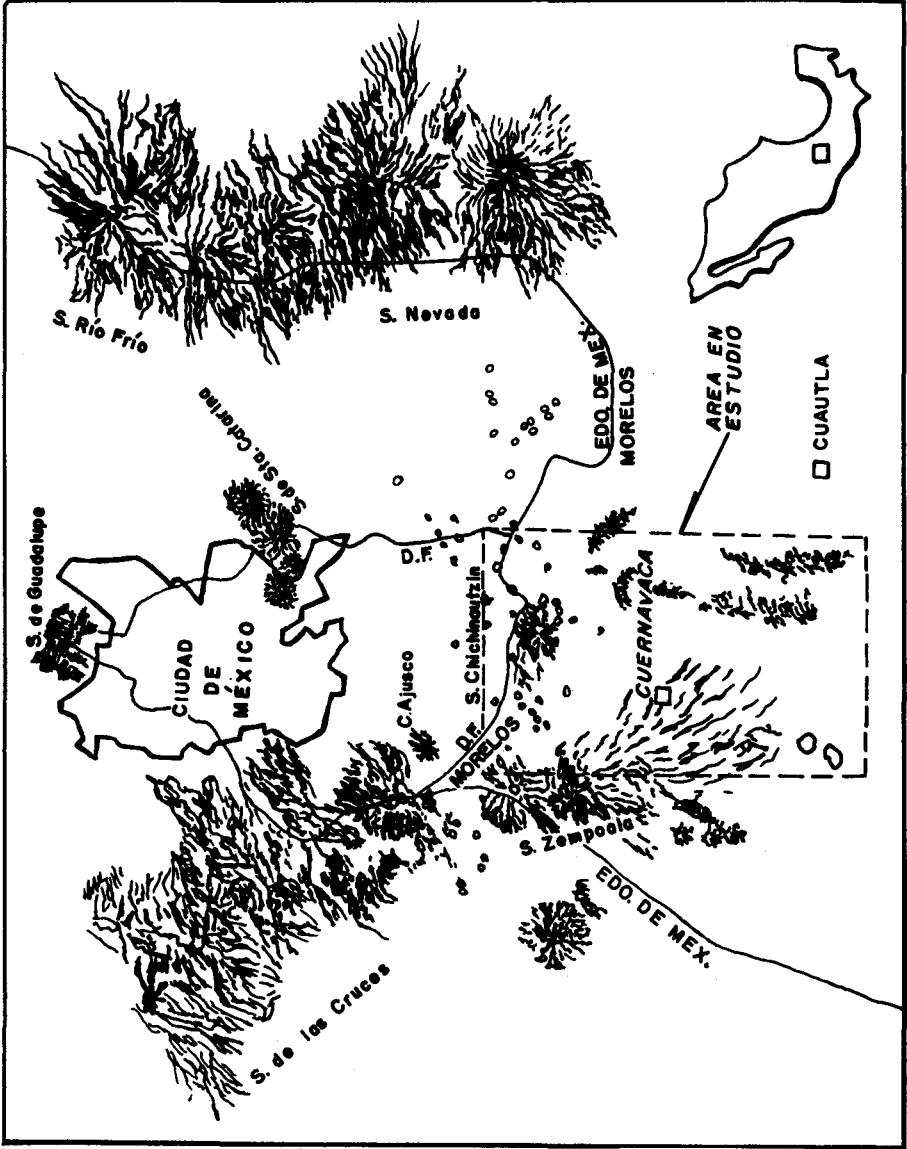


Fig. 1. Mapa de Localización.

En esta etapa se emplearon los isótopos de azufre ^{34}S y del carbono ^{13}C y ^{14}C , con el fin de conocer la procedencia de la recarga, las direcciones de flujo y el origen del agua en el acuífero en calizas. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos con dichas técnicas, y se aportan mayores antecedentes a la hidrogeología del Valle de Cuernavaca.

Localización y parámetros climatológicos

La región estudiada tiene una superficie de 1940 km². Se encuentra entre los paralelos 18°40' y 19°10' de latitud norte y los meridianos 99°20' y 99°00' de longitud oeste (figura 1). Pertenece a la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Mexicano y a la subprovincia fisiográfica Cuenca del Balsas-Mexcala (Raisz, 1964).

La precipitación media es del orden de 1830 mm/año para la parte alta de las sierras Chichinautzin y Zempoala, y de 755 mm/año para la parte más baja del área. La evapotranspiración real anual obtenida mediante el método empírico de Turc resultó ser de 500 y 700 mm/año respectivamente (Jaimes, 1989). El mayor volumen de lluvia cae en los meses de julio, agosto y septiembre y el 90% de la precipitación ocurre dentro del período comprendido entre mayo y octubre. La precipitación supera a la evapotranspiración de manera notable en las partes altas del área, lo que las convierte en las zonas más favorables para la infiltración.

Geología e hidrogeología

La región aquí estudiada es la consecuencia de la evolución geológica del centro de México, cuya evidencia en el área se manifiesta en afloramientos que varían desde el Cretácico temprano hasta el Reciente (Fries, 1960). Ha sido posible distinguir un período prolongado de sedimentación calcárea - interrumpido por algunos levantamientos - seguido de una fase tectónica compresiva y seis distensivas, con magmatismo esencialmente volcánico. Dichas fases están asociadas, posiblemente, a las interacciones entre las placas Farallón-Norteamericana y Cocos-Norteamericana, durante el Cenozoico Tardío (Fries, *op. cit.*; Vázquez y Jaimes, en prensa).

Las unidades permeables de la zona (figura 2) son: calizas y dolomías de origen marino, de edad Cretácica, con desarrollo de Karst. Estas se encuentran ampliamente distribuidas en la parte meridional de la región estudiada y cubren depósitos evaporíticos (anhidrita) de la misma edad; conglomerados calizos del Terciario tempra-

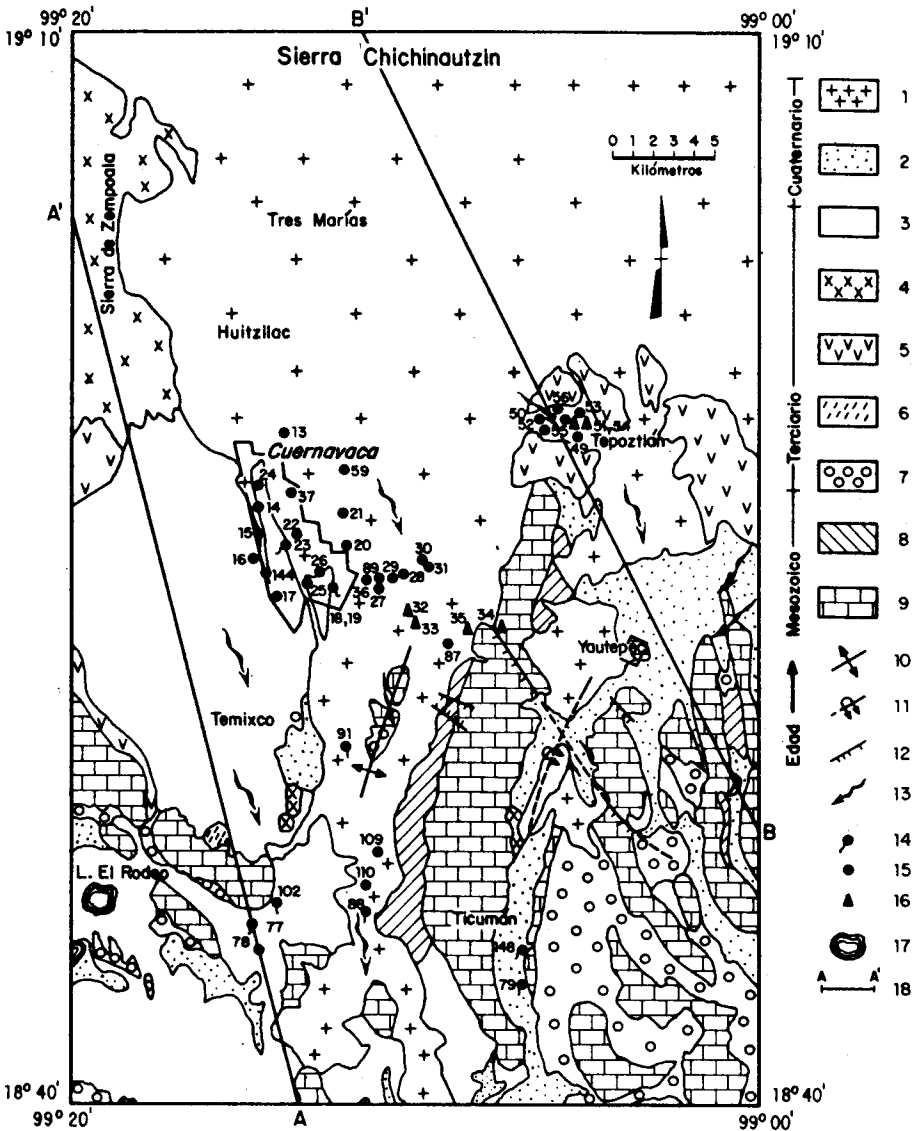


Fig. 2. Mapa Hidrogeológico de la porción noroccidental del Estado de Morelos, basado en el de Jaimes (1989). 1. Basaltos fracturados de alta permeabilidad. 2. Aluvión del Reciente. 3. Gravas semi-consolidadas, tobas y arenas. 4. Andesitas, brechas volcánicas y riolitas fracturadas. 5. Lahares y tobas. 6. Intrusivo granítico. 7. Conglomerado Calizo. 8. Caliza y Dolomía. 9. Arenisca, limolita y lutita. 10. Anticlinal. 11. Anticlinal recostado. 12. Falla normal. 13. Dirección principal de flujo en aguas subterráneas. 14. Manantial muestreado. 15. Pozo muestreado. 16. Noria muestreada. 17. Lago. 18. Sección Hidrogeológica. Las direcciones del patrón de flujo se obtuvieron de una reinterpretación de los datos piezométricos (SARH, 1980 y 1981).

no con lentes de yeso, cuyos afloramientos se distribuyen en su mayoría en la parte suroriental del área; rocas volcánicas fracturadas del Terciario aflorando principalmente en la Sierra Zempoala al NW; lahares y tobas del Terciario tardío que se presentan en los alrededores de Tepoztlán al NE de Cuernavaca; gravas semiconsolidadas y tobas del Terciario Tardío, distribuidas al SW de la Ciudad de Cuernavaca como abanico volcánico-aluvial y por debajo de los basaltos que se extienden al SE de dicha ciudad, como depósitos aluviales; basaltos fracturados y cavernosos del Cuaternario de los que está constituida la Sierra Chichinautzin, a partir de la cual se extienden algunas coladas hacia el sur; por último, el Aluvión del Cuaternario, que se encuentra principalmente en la porción oriental del área (figura 2). Las unidades hidrogeológicas impermeables son únicamente una sucesión de areniscas calcáreas, limolitas y lutitas del Cretácico Tardío, que cubren a las calizas y dolomías. Dichas unidades posiblemente actúan en algunos lugares como capas confinantes del acuífero calizo. De estas unidades, se consideran acuíferos importantes: las calizas y dolomías, las gravas semi-consolidadas, el basalto y el aluvión.

Los lahares y tobas y algunas partes de los basaltos fracturados y cavernosos funcionan como acuíferos, mientras que las rocas volcánicas terciarias y la mayor parte de los basaltos fracturados actúan como zonas de recarga por su posición en las partes altas del área.

El acuífero más importante es el de las gravas semi-consolidadas que designaremos en lo sucesivo como acuífero granular, el cual se considera un multiacuífero con dos niveles saturados principales (Jaimes, *op. cit.*); desafortunadamente, no se cuenta con los cortes litológicos de los pozos perforados en este acuífero, razón por la cual no se ha podido evaluar esto con precisión. Esta unidad tiene alrededor de 300 pozos en operación dentro del área en estudio, que extraen aproximadamente $50 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ (SARH, 1981). El coeficiente de transmisividad, de acuerdo con la SARH (*op. cit.*) es de 0.5 a $98.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$. Esta amplia variación podría indicar que este acuífero es un medio heterogéneo o también que algunas pruebas se hicieron en pozos que cortan a los basaltos que cubren a esta unidad. El coeficiente de almacenamiento obtenido de la misma referencia está entre 1.5×10^{-3} y 8.2×10^{-3} .

En segundo lugar de importancia como unidad hidrogeológica están los basaltos fracturados, por conducir caudales bastante altos de agua, funcionar como acuífero en algunos lugares y dar origen a manantiales perennes de caudales importantes, en su contacto con el acuífero granular, como los que se encuentran en la Ciudad de

Cuernavaca. Dicha unidad también se considera como zona de recarga principal, por su amplia distribución en la Sierra Chichinautzin. Los lahares y tobas andesíticas actúan como un acuífero con recarga en la parte media de la Sierra Chichinautzin, como se comprobará posteriormente con los datos isotópicos. Las calizas y dolomías constituyen un acuífero bastante importante, aunque poco conocido. De él se aprovechan solamente los manantiales, que dan agua de mediana calidad, empleada para riego principalmente, lo cual es importante en la parte meridional del área por la aridez de esta zona. El aluvión se comporta como acuífero en la región oriental del área. Las rocas volcánicas terciarias, principalmente las que afloran en la Sierra Zempoala, se consideran como un medio fracturado que actúa como zona de recarga del acuífero granular, hipótesis que se confirma con los datos de este estudio.

El patrón de flujo que se muestra en la figura 2 se hizo reinterpretando los datos piezométricos que se obtuvieron en estudios previos (SARH, 1980 y 1981) en los acuíferos: granular, en los lahares y tobas andesíticas, y en el que está en aluvión.

El funcionamiento del sistema hidrogeológico es el siguiente (Jaimes, *op. cit.*): para la parte occidental, siguiendo la dirección de flujo (figura 3), 1) recarga a través de la Sierra Zempoala, 2) flujo subterráneo a través del acuífero granular y 3) manantiales provenientes de calizas, que se atribuyen a un flujo profundo o regional

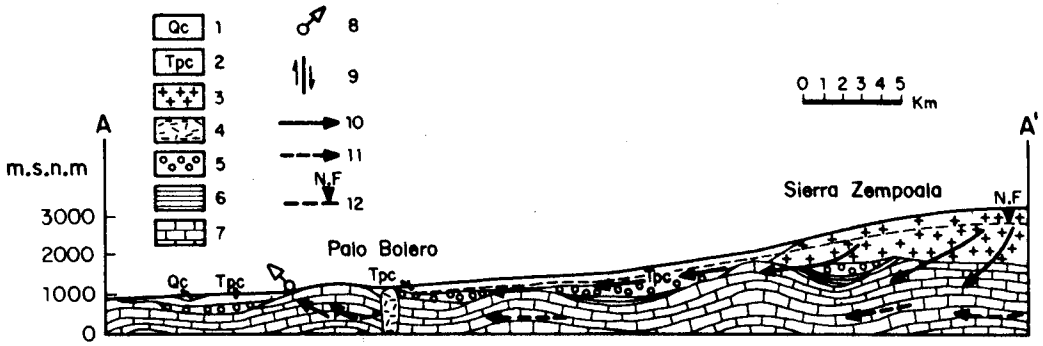


Fig. 3. Sección Hidrogeológica A-A'.
 1. Basaltos fracturados. 2. Gravas, arenas y tobas. 3. Andesitas. 4. Intrusivo granítico. 5. Conglomerado calizo. 6. Areniscas, limolitas y lutitas. 7. Caliza y Dolomía. 8. Manantial. 9. Falla. 10. Dirección de flujo de aguas subterráneas. 11. Dirección de flujo posible. 12. Nivel freático.

(CAVM-IGF, 1987). Para la parte oriental (figura 4) consiste en 1) recarga proveniente de la Sierra Chichinautzin, 2) manantiales en los cambios de permeabilidad que ocurren en el contacto de los basaltos con las unidades menos permeables subyacentes, 3) flujo subterráneo a través del basalto que recarga a los conglomerados y al aluvi3n y 4) presenta tambi3n un flujo profundo proveniente de las calizas y dolomías.

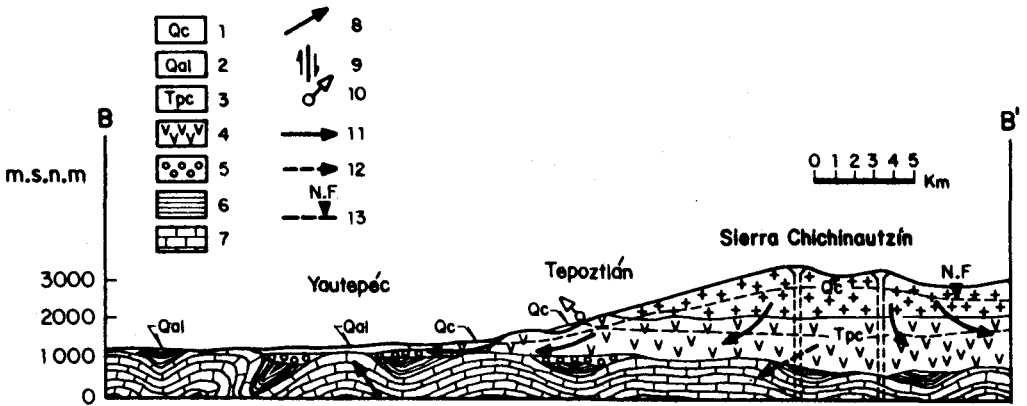


Fig. 4. Sección Hidrogeológica B-B'.

1. Basaltos fracturados. 2. Aluvi3n. 3. Conglomerados y arenas tobáceas. 4. Andesitas. 5. Conglomerado calizo. 6. Areniscas, limolitas y lutitas. 7. Caliza y Dolomía. 8. Direcci3n de flujo de aguas subterráneas. 9. Falla. 10. Manantial. 11. Direcci3n de flujo de aguas subterráneas. 12. Direcci3n de flujo posible. 13. Nivel freático.

RESULTADOS

Hidrogeoquímica

Los resultados fisicoquímicos se presentan en la tabla 1. La evoluci3n química general para la regi3n tiende a seguir la misma direcci3n que el patr3n de flujo de agua subterránea propuesto en la figura 2. Un incremento en la salinidad se observa en la direcci3n de flujo y únicamente se presentan facies con HCO_3 y SO_4 como aniones dominantes.

TABLA 1 RESULTADOS FISICO-QUIMICOS Y RAZONES IONICAS EN AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRANEAS

No.	C.E. mhos /cm	Ph	T oC	STD	Ca ⁺⁺ meq /l	Mg ⁺⁺ meq /l	Na ⁺ meq /l	K ⁺ meq /l	Cl ⁻ meq /l	HCO ₃ ⁻ meq /l	SO ₄ ⁼ meq /l	Na Cl	Na Ca	SO ₄ Ca	SO ₄ Cl
+14	160	7	20	181	0.60	2.14	.00	.00	.39	2.09	.02	.001	.00		
+16	170	6.5	19	207	0.60	2.79	.00	.00	.33	2.39	0.06	.001	.00		
+17	200	6.04	19	223	.60	1.97	.74	.00	.59	2.39	.06	1.25	1.23		
c23	*243	6.5	16.5	*170	.339	.399	.330	4.88	6.46	1.35	8.27	5.11	.974		
+24	190	6.6	19.5	*133	.80	2.14	.00	.00	.451	2.09	.083	.00	.00		
32	80	6.5	17.5	204	.157	.320	.421	.010	.025	1.472	.119	16.59	2.68		
477	2000		24.1	*1400	19.42	7.64	.997	.271	.536	6.71	19.85	1.86	.05	1.02	37.04
c78	1300		23.1	*910	10.10	4.48	.983	.113	.457	2.64	10.52	2.15	.09	1.04	23.03
479	1250	7.2	23.1	955	8.0	4.84	1.27	.330	.556	5.39	7.85	2.28	.15	.982	14.14
c81	1400		24.7	*980	6.45	6.56	1.31	.160	.542	7.74	7.94	2.43	.20	1.02	
+90	500	6	23.8	397	2.0	1.56	1.96	.00	1.24	3.74	.25	1.57	.979		
991	+410	6.4	206	287	1.65	2.09	.18	.11	.46	2.13	1.09	.39	.11		
4108	2100	7	22.5	2033	19.20	6.71	.866	.258	.550	7.72	21.0	1.57	.05	1.09	38.18
4109	320	6.5		391	1.41	1.19	.783	.171	.493	2.13	.479	1.58	.55		
4110	504	6.5		236	58	18	11.6	2.5	3.16	210	68.1				
n144	290	6.6	19.9	101	1.3	1.42	1.23	.05	.66	1.96	.37	.35	.18		

* CONDUCTIVIDAD ELECTRICA Y S.T.D. CALCULADOS

+ DATO DE SARH 1980 Y 1981

ñ DATO DE C.A.V.M. 1986

c DATO U. DE WATERLOO, CANADA 1986/87

4 DATO INSTITUTO DE GEOFISICA, UNAM 1986/87

En la figura 5 es posible ver de manera simplificada la evolución química del acuífero granular, la del acuífero en los basaltos fracturados y la del acuífero en calizas y dolomías. Como puede verse en el cuadro central del diagrama, las muestras se alinean en una sola dirección, que va del agua de los manantiales en basaltos, a la de los manantiales en calizas. Esto podría indicar la evolución del agua subterránea en la región, así como también la presencia de una mezcla.

Oxígeno-18 y Deuterio

Se analizaron 48 muestras de agua subterránea, cuyos resultados se presentan en

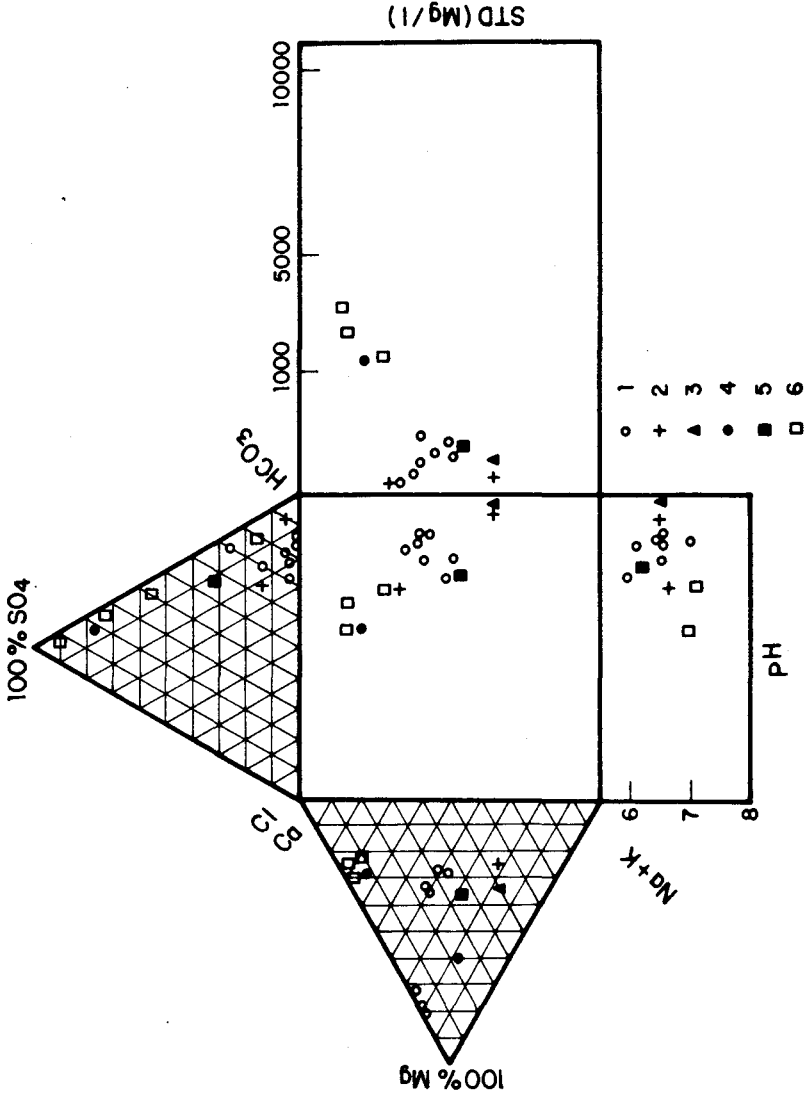


Fig. 5. Diagrama de Durov.
 1. Pozo en el acuífero granular. 2. Manantial en el contacto: conglomerados-basaltos. 3. Noria en aluvión.
 4. Pozo en calizas. 5. Manantial en basaltos. 6. Manantial en calizas.

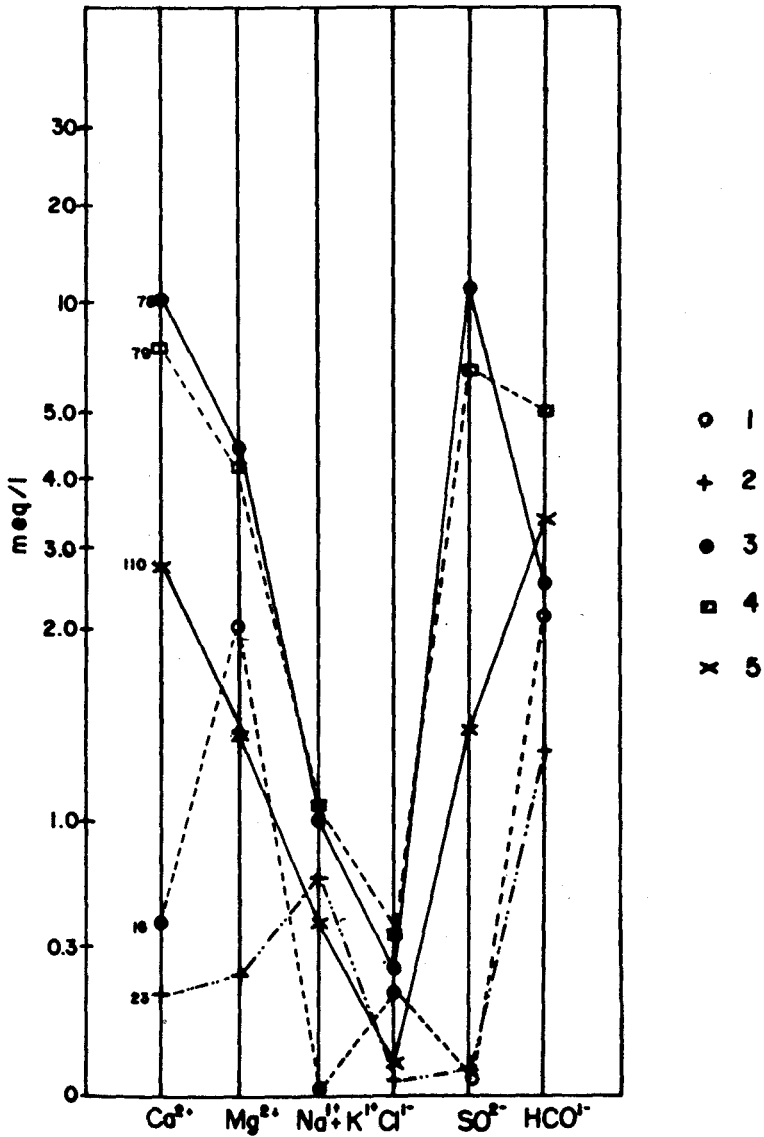


Fig. 6. Diagrama de Schoeller.

1. Pozo en el material granular.
2. Manantial en el contacto entre los conglomerados y los basaltos fracturados.
3. Pozo en calizas.
4. Manantial en calizas.
5. Pozo en el acuífero granular en la porción meridional del área.

TABLA 2 RESULTADOS DE ISOTOPOS ESTABLES Y RADIOACTIVOS EN AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA

No.	Localización	Ap.	H-2		O-18		d	Tritio		S-34	O18(SO4)		C-13		C-14	Edad
			o/oo	SMOW	o/oo	SMOW		U.T.	CDT		o/oo	SMOW	o/oo	PDB		
13	Cuernavaca	P	-78		-10.8		12.6									
14	Cuernavaca	P	-75		-11.2		8.4									
15	Cuernavaca	P	-74		-10.7		15.6									
16	Cuernavaca	P	-76		-10.9		11.6									
17	Cuernavaca	P	-75		-11.2		11.2									
18	Cuernavaca	M	-75		-10.9		14.6									
19	Cuernavaca	M	-75		-10.9		12.2									
20	Cuernavaca	P	-75		-10.9		12.2									
21	Cuernavaca	P	-76		-11.0		12.0									
22	Cuernavaca	P	-75		-11.2		14.6									
23	Cuernavaca	M	-78		-10.9		9.2						-14.1	120	Moderna	
24	Cuernavaca	P	-77		-10.7		8.6									
25	Cuernavaca	P	-76		-11.0		12.0									
26	Cuernavaca	P	-76		-10.9		11.2	3.0								
27	ElTejamanil	P	-76		-11.3		14.4									
28	MexamaA	P	-76		-11.2		13.6									
29	MexamaC	P	-78		-11.0		10.0									
30	CIVAC	P	-74		-10.9		13.2	3.0								
31	CIVAC	P	-76		-10.9		11.2									
32	Tejalpa	M	-76		-10.9		11.2	6.5								

Continúa...

Tabla 2 (continuación)

33	Tejalpa	M	-72	-11.0	16.0																
34	Cuernavaca	N	-68	-9.4	7.2																
35	Cuernavaca	N	-66	-9.3	8.4																
36	Col. 10Abril	P	-77	-11.1	11.8																
49	Tepoztlán	N	-73	-10.6	11.8																
50	Tepoztlán	N	-74	-10.4	9.2					9.7											
51	Tepoztlán	N	-72	-10.5	12.0																
52	Tepoztlán	P	-72	-10.3	10.4																
53	Tepoztlán	N	-72	-10.2	9.6																
54	Tepoztlán	N	-76	-10.3	6.4																
55	Tepoztlán	N	-69	-10.1	11.8																
56	Tepoztlán	M	-78	-10.6	6.8																
59	Ind.Tecnos	P	-74	-10.9	13.2																
60	Cuautla	P	-75	-10.9	12.2																
68	Oaxtepec	M	-72	-10.2	9.6					16.78				14.7							
69	Tlaxomulco	M	-69	-9.5	7.0																
70	c.a Cuautla	P	-69	-10.0	11.0																
71	Acatlahuaca	P	-71	-10.1	9.8																
72	Tlayacapan	P	-73	-10.5	11.0																
73	Casasero	P	-75	-10.2	6.6																
74	Las Tazas	M	-71	-10.3	11.4					2.9+8											
75	Huitzilac	P	-78	-11.0	10.0																
77	Alpuyeca	M	-75	-10.6	9.8																

Continúa . . .

Tabla 2 (continuación)

78	Atlacholoaya	P	-79	-10.0	1.0	5.9+7		-7.9	55	Moderna
79	Las Estacas	M	-71	-10.2	10.6	7.4+1.	15.63	14.2	46	Moderna
87	Tejalpa	P	-77	-10.2	4.6					
88	San Ramón	M	-74	-10.8	12.4	34+8	16.05	13.3		
89	ANDSA	P	-73	-10.5	11.0					
90	Temixco	P	-78	-11.1	10.8					
91	Palo Escrito	M	-77	-10.4	6.2	4.2				
108	Palo Bolero	M	-75	-10.3	7.4		16.31	13.93		
109	Tezoyuca	P	-73	-10.3	9.4					
110	Tezoyuca	P	-75	-10.8	11.4					
144	San Antón	M	-77	-10.7						
149	Ticumán	M	-71	-10.3	11.4					
156	Rivetex	P						-11.3	87	Moderna

No.=Número de muestra Ap.=Aprovechamiento P=Pozo

M=Manantial L=Laguna Ex D = Exceso de Deuterio o/oo.

LI=Lluvia

la tabla 2. Los análisis isotópicos se realizaron en el laboratorio de Espectrometría de Masas del Instituto de Física, UNAM, con una precisión de $\pm 0.2\text{‰}$ para oxígeno-18 y de $\pm 2\text{‰}$ para deuterio, utilizándose las técnicas convencionales de preparación (Gonfiantini, 1977). Los resultados están expresados respecto a la referencia V-SMOW.

En la figura 7 se presenta la correlación $\delta D - \delta^{18}O$ de todas las muestras consideradas. Las dos líneas punteadas representan dos líneas meteóricas distintas. La que tiene ordenada al origen +10 es la Línea Meteórica Mundial y la de ordenada +12 es la que se obtuvo en la Sierra de Las Cruces (Cortés y Farvolden, 1989), la cual, por ser la referencia más cercana, se considera como Línea Meteórica Local.

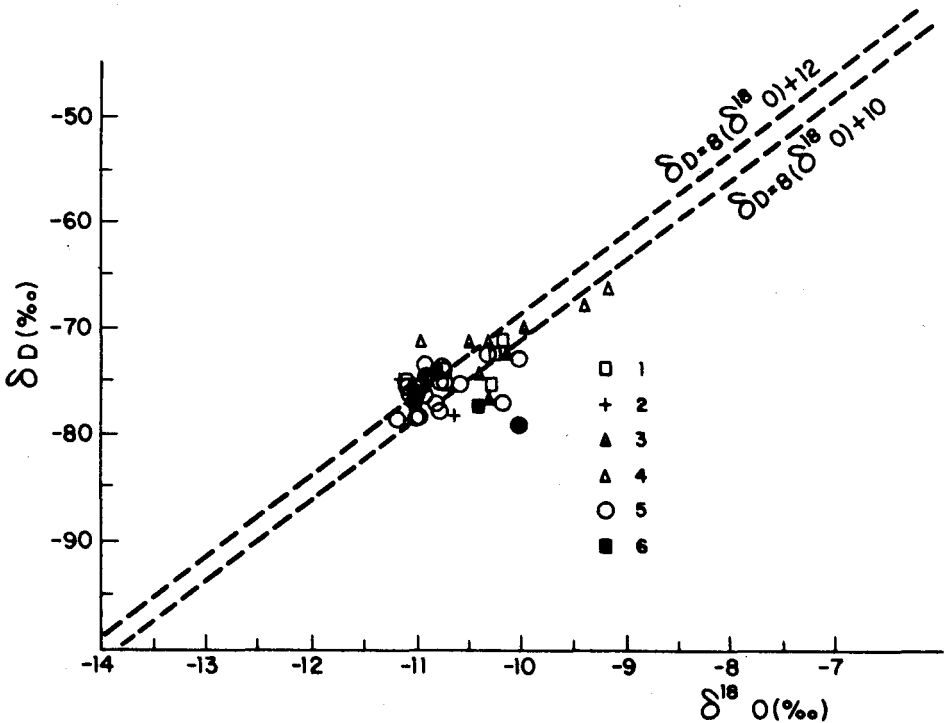


Fig. 7: Correlación $\delta D - \delta^{18}O$.

1. Manantial en calizas y dolomías. 2. Manantial en el contacto: basaltos-acuífero granular. 3. Noria en lahares y tobas andesíticas. 4. Noria en aluvi3n. 5. Pozo en el acuífero granular. 6. Manantial en basaltos.

Azufre 34 y Oxígeno-18 del Sulfato

Con objeto de determinar el origen de los compuestos de azufre que en forma de sulfato se presentan abundantemente en el acuífero calizo y para inferir el patrón de flujo del mismo, se analizaron cuatro muestras de agua y una de yeso proveniente de una lente en los conglomerados calizos. Estos resultados se muestran en la tabla 2. Todas las muestras de agua presentan valores de +15.6‰ a +16.8‰ para el $\delta^{34}\text{S}$, y +13.9‰ a +14.7‰ para el $\delta^{18}\text{O}$. La excepción es la muestra Núm. 50, que tiene un valor de +9.7‰ para el $\delta^{34}\text{S}$. El análisis de la evaporita arrojó un valor de +16.0‰ para el $\delta^{34}\text{S}$ y +14.14‰ para el $\delta^{18}\text{O}$.

Tritio, Carbono-14 y Carbono-13

Para conocer la edad relativa del agua subterránea en los acuíferos del área estudiada se analizaron ocho muestras para obtener el contenido de tritio y cuatro muestras para carbono-14 y carbono-13; pero solo en dos de ellas se obtuvieron valores tanto de tritio como de carbono-14. Adicionalmente, se analizaron dos muestras de caliza para carbono-13. Estos resultados se muestran en la tabla 2.

Los valores obtenidos para los acuíferos granular y basáltico varían entre 3.0 y 34 U.T., que, sin considerar los resultados del carbono-14, indican que toda el agua es de reciente infiltración, es decir, infiltrada después de 1952. Asimismo, para el acuífero en calizas y dolomías, los valores se encuentran entre 3.9 ± 0.8 y 7.9 ± 1 , lo que indica una componente de aguas jóvenes. Sin embargo, dadas las características químicas, que sugieren un agua con mayor tiempo de residencia y las observaciones de campo (tipo de manantial y aguas de distinta temperatura que surgen del mismo sitio), nos llevan a pensar que el tritio posiblemente esté indicando presencia de una mezcla.

Valores de -14.1 y 120 pmc, para C-13 y C-14, respectivamente se obtuvieron en el manantial El Túnel, el cual aflora en el contacto de la unidad basáltica con el acuífero granular. El pozo Rivetex, que bombea agua del acuífero granular, arrojó valores de -11.3 y 87 pmc para C-13 y C-14 respectivamente. Las muestras de los manantiales que son parte de la descarga del acuífero calizo presentan valores isotópicos más enriquecidos en carbono-13 (-6.1, -7.9) y empobrecidos en carbono-14 (46 pmc, 55 pmc). Los valores enriquecidos de C-13 han sido explicados por la influencia del CO_2 volcánico en el agua subterránea del área en estudio (Vázquez *et al.*, este volumen).

Para corregir los valores de carbono-14 se usó de manera preliminar el modelo de Ingerson y Pearson (1964). Este modelo emplea los datos de carbono-13 de las posibles fuentes de carbono del carbono inorgánico disuelto y se aplica cuando la disolución de materiales carbonatados se realiza en un sistema cerrado. El factor de corrección se calcula usando la siguiente expresión:

$$q = \frac{\delta^{13}\text{C}(\text{CID}) - \delta^{13}\text{C}(\text{CARB})}{\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2) - \delta^{13}\text{C}(\text{CARB})}$$

Donde CID es el carbono inorgánico disuelto; CARB, carbonato; y CO_2 , dióxido de carbono de origen biológico producido en el suelo de la zona de recarga. Se analizaron dos muestras de caliza, una de la unidad superior de las calizas y dolomías y otra de una caliza de origen continental del Plioceno (Vázquez y Jaimes, en este volumen), con la finalidad de estimar el valor de carbono-13 para el acuífero calizo y el granular. Estos resultados fueron de +2.6‰ y 0‰ respectivamente. Se considera un valor de -21‰ para el CO_2 del suelo con base en el tipo de vegetación existente en la zona de recarga. Los resultados obtenidos con estas consideraciones en la corrección están reportados en la tabla 2.

DISCUSION DE RESULTADOS

Hidrogeoquímica

La composición química de la facies $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ que se presenta cerca de la zona de recarga, propuesta para el acuífero granular en la figura 3, se puede explicar considerando la disponibilidad de minerales en las rocas de la zona de recarga, en las cuales se observa predominio de plagioclasas, feldespatos, hornblenda y augita. Siguiendo el patrón de flujo de la figura 2, en los pozos que captan el nivel profundo del acuífero al sur de la ciudad de Cuernavaca hay un cambio a $\text{HCO}_3\text{-Mg-Na}$. Este enriquecimiento en sodio es posible que se deba a un mayor tiempo de residencia causado por circulación profunda, o a la influencia del agua proveniente de la zona de recarga de los basaltos que, como se mencionó antes, cubren a este acuífero. El suelo de esta área está formado en parte por arcillas montmorilloníticas, en las cuales puede ocurrir intercambio catiónico entre calcio y sodio. En la parte más meridional de este sistema se presenta una facies $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$. El incremento en la cantidad de SO_4 posiblemente se deba a que estos aprovechamientos están bajo la influencia de la recarga proveniente de los basaltos de la Sierra Chichinautzin que se consideran

muy permeables. Entonces el agua podría circular en el trayecto por estratos que contengan yeso o anhidrita y posteriormente fluir a través de este acuífero granular. Otra posibilidad es que dentro de este acuífero se encuentren algunos fragmentos de anhidrita en esta porción debido a su proximidad con la sierra calcárea.

Dentro de este acuífero existen aprovechamientos que desde el punto de vista geológico tienen una posible influencia de la recarga local, como el pozo 109, cuya facies es $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg-K}$. En la figura 5 se ve claramente el incremento en la salinidad, que coincide con el patrón de flujo.

El agua proveniente de los basaltos fracturados presenta una facies $\text{HCO}_3\text{-Na-Mg}$ en los manantiales de la Ciudad de Cuernavaca. 10 km al sur se observa una facies $\text{HCO}_3\text{-Mg-Na}$, con una tendencia a enriquecerse en magnesio en mayor proporción que en sodio, fenómeno que es de esperarse, si se considera que el sodio principalmente lo adquirió del suelo y el magnesio de la disolución de minerales ferromagnesianos (Garrels, 1976). Se observa también un contenido de sólidos totales disueltos del orden de 154 mg/l, congruente con la distancia y dirección de flujo en este medio.

El cambio en la proporción de los cationes del agua que circula por los basaltos se podría explicar como la consecuencia de la disolución de los productos de alteración de los minerales máficos y las plagioclasas, que son los minerales más abundantes. También se observa un menor incremento en la salinidad con respecto a la distancia, en comparación con el que ocurre en el acuífero granular, que se explica por la alta permeabilidad de este medio fracturado y cavernoso.

El acuífero en calizas y dolomías presenta una facies $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca-Mg}$, representada por las muestras 77, 79, 78 y 108, en las que se ve una afinidad entre las muestras 77 y 79, por contener una mayor proporción de HCO_3 ; por su parte, las muestras 78 y 108 tienen mayor cantidad de SO_4 , como es posible apreciar en las relaciones SO_4/Ca , SO_4/Cl y Na/Cl de la tabla 1. En la figura 6 se muestran claramente las diferencias químicas entre los acuíferos, indicando el tipo de aprovechamiento considerado.

El agua en el acuífero calizo está sobresaturada con respecto a calcita y dolomita (tabla 3), principalmente por el aporte de calcio proveniente de la disolución de yeso o anhidrita. Este proceso se refleja en los valores cercanos a uno para la razón SO_4/Ca en estas aguas (tabla 1). Los altos valores de magnesio sugieren también que la diso-

TABLA 3 INDICES DE SATURACION EN AGUA SUBTERRANEA Y SUPERFICIAL
(Programa EWATSPEC)

No.	Localización	Ap.	Anhidrita (CaSO ₄)	Aragonita (CaCO ₃)	Calcita (CaCO ₃)	Dolomita (CaMg(CO ₃) ₂)	Yeso (CaSO ₄)	Magnesita (MgCO ₃)
14	Cuernavaca	P	-4.3	-1.6	-1.3	-2.0	-4.2	-1.0
16	Cuernavaca	P	-3.9	-2.0	-1.6	-2.8	-3.7	-1.4
23	El Túnel	M	-3.9	-2.5	-2.2	-4.4	-3.7	-2.5
79	Las Estacas	M	-1.0	0.0	+0.3	+0.4	-0.9	-0.2
89	ANDSA	P	-3.1	-2.8	-2.5	-5.0	-3.0	-2.8
108	Palo Bolero	M	-0.4	+0.2	+0.4	+0.5	-0.3	-0.3
109	Tezoyuca	P	-2.6	-1.7	-1.4	-2.8	-2.5	-1.7

Ap. = Aprovechamiento M = Manantial P = Pozo L =
 Leguna + = posible precipitado - = en solución, no
 precipitado ***** = trazas

lución incongruente de dolomita podría ser otro proceso que está ocurriendo en estas aguas.

Si consideramos que el alineamiento de las muestras en el cuadro central del diagrama de Durov (figura 5) indica que hay una evolución, entonces posiblemente el agua en las calizas tenga una zona de recarga similar a la de la parte oriental del área. Pero si vemos ese alineamiento como un tren de mezcla, entonces podría pensarse en otro origen para la recarga de este acuífero, como se verá más adelante.

Oxígeno-18 y Deuterio

El agua de los pozos de la parte occidental del área, que se extrae del acuífero granular en el abanico volcánico-aluvial, tiene un contenido isotópico promedio de $\delta D = -76\text{‰}$ y de $\delta^{18}\text{O} = -11.1\text{‰}$ (ver figura 7). Estos valores son ligeramente más negativos que los resultados promedio de la parte central del área ($\delta^{18}\text{O} = -10.8\text{‰}$, $\delta D = -75\text{‰}$), en donde este acuífero se presenta como un depósito aluvial, cubierto por derrames basálticos fracturados. Estos valores son esencialmente los mismos que presentan los manantiales que ocurren en el cambio de permeabilidad que tiene lugar en el contacto de los basaltos con el acuífero granular, cuyos valores promedio son $\delta D = -75\text{‰}$ y $\delta^{18}\text{O} = -10.9\text{‰}$. Esto último podría atribuirse a que algunos pozos captan agua directamente de los basaltos y otros reciben recarga de los mismos.

Como se puede observar, los contenidos isotópicos del acuífero granular difieren de un depósito a otro, en una pequeña proporción, lo que podría ser un error analítico; no obstante, el número de muestras con que se cuenta para ambas facies es muy numeroso (ver tabla 2), por lo que es posible atribuirla a diferencias en los procesos o ambientes de recarga. Esto se debería principalmente a un cambio de altitud y de clima en la zona de recarga, que son distintos para la Sierra Zempoala y la parte alta occidental de la Sierra Chichinautzin, donde se encuentran las mayores altitudes del área y el clima es semifrío húmedo (García, 1981), a diferencia de la parte media de la Sierra Chichinautzin, en donde el clima es semifrío subhúmedo y la altitud es comparativamente menor. Esto está adicionalmente apoyado por la química del agua que, para la que proviene de la parte occidental, es de facies $\text{HCO}_3\text{-Mg}$, como ya se había mencionado, mientras que la de la parte central del área es $\text{HCO}_3\text{-Na-Mg}$. Esta diferencia en la facies posiblemente se deba a que las rocas de la Sierra Zempoala son andesitas y brechas alteradas y las de la Sierra Chichinautzin, basaltos intercalados con escorias y poco alterados.

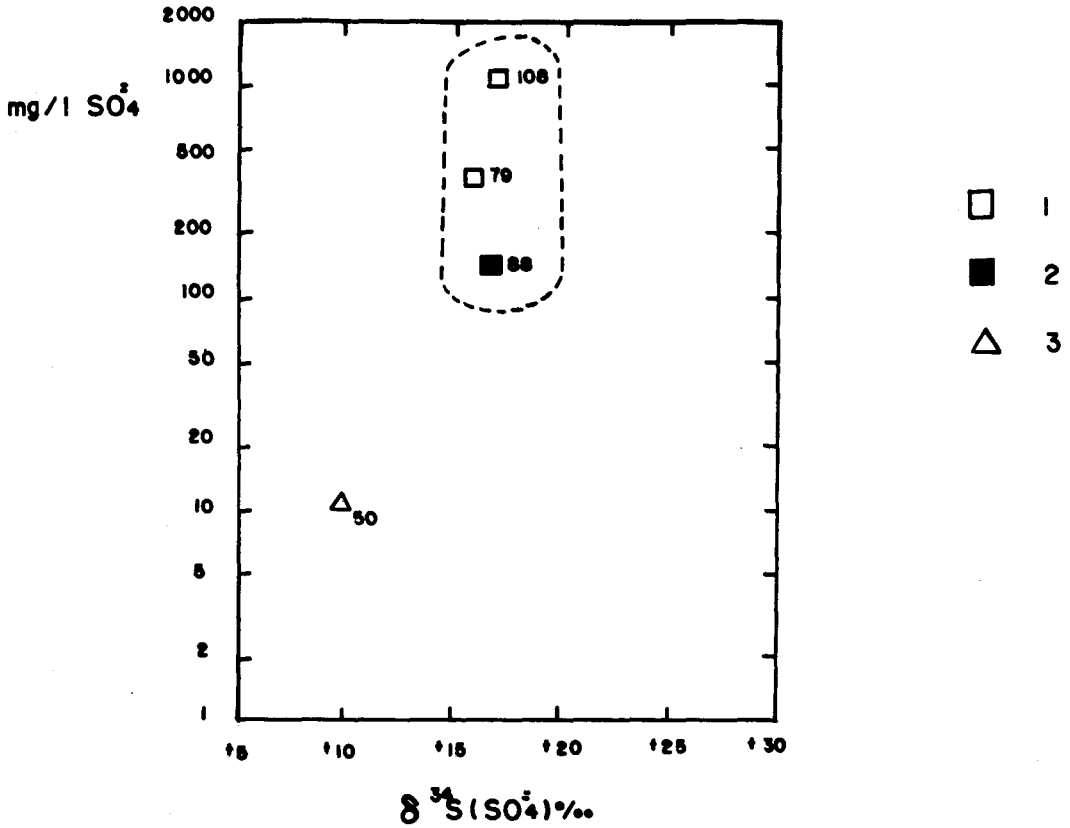


Fig. 8. Relación entre $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^-)$ y SO_4^- .

1. Manantial en calizas. 2. Manantial en basaltos. 3. Noria en lahares y tobas andesíticas.

El agua de las norias y pozos del Valle de Tepoztlán presenta valores medios de $\delta\text{D} = -73\text{‰}$ y $\delta^{18}\text{O} = -10.3\text{‰}$, ligeramente más enriquecidos que los antes descritos para el Valle de Cuernavaca, lo que sugiere que la recarga de esta pequeña unidad ocurre en la parte centro-oriental de la Sierra Chichinautzin, que tiene las menores altitudes de dicha sierra dentro del área en estudio, lo que apoya las ideas antes expuestas.

Los pozos que posiblemente indican el valor isotópico de la recarga local tienen características isotópicas ($\delta D = -66\text{‰}$ y $\delta^{18}O = -9.3\text{‰}$) o sea que están más enriquecidas en isótopos que el resto; esto puede deberse a una infiltración a altitudes menores, posiblemente provenientes de la Sierra Barriga de Plata (ver figura 2). Sus características químicas (HCO_3 -Ca-Mg-K), que se salen del contexto evolutivo de este acuífero, apoyan esta idea.

El promedio de los resultados obtenidos para el acuífero en calizas y dolomías es de $\delta D = -74\text{‰}$ y $\delta^{18}O = -10.3\text{‰}$, muy similares a los de Yautepec (Vázquez *et al.*, en este volumen) y Tepoztlán; sin embargo, los valores de tritio, azufre-34, carbono-14 y la química indican otra cosa, como se discutirá posteriormente.

La figura 9 muestra una posible correlación entre la conductividad eléctrica y el contenido de deuterio, en la cual se observa que la mezcla queda representada por las muestras 149 y 79. Las muestras 34 y 35 representan la composición isotópica de la recarga local y las muestras 14, 16, 17 y 109 son de pozos en el acuífero granular que se recarga en la Sierra Zempoala.

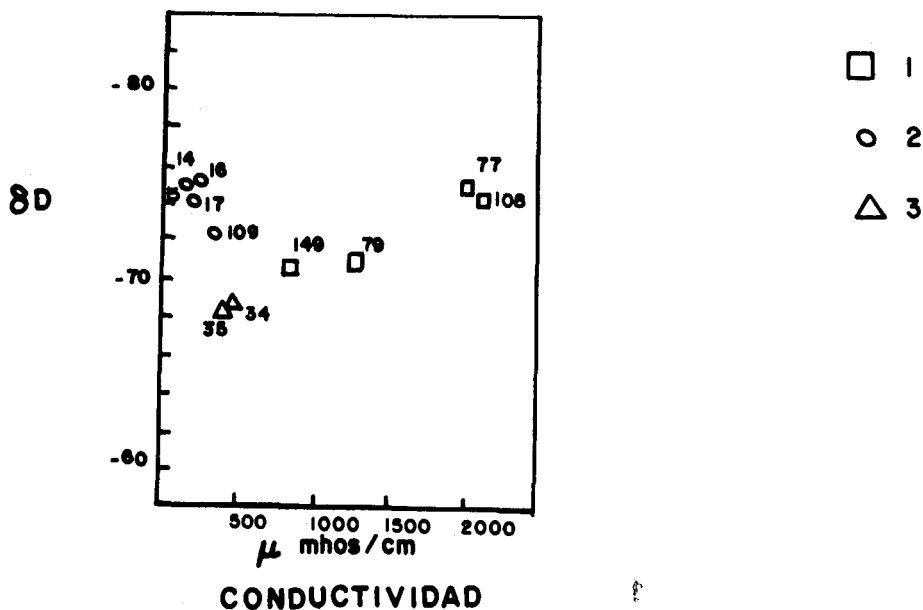


Fig. 9. Relación entre δD y conductividad eléctrica, para muestras del acuífero calizo y granular.
1. Manantial en calizas. 2. Pozo en el acuífero granular. 3. Noria en aluvi6n.

El valor más alejado en la parte inferior de la línea meteórica, que corresponde a una muestra de un pozo en el acuífero calizo (figura 7), probablemente es un error analítico. La ausencia de variación en los resultados isotópicos para un mismo acuífero puede deberse al corto período del año en que ocurre la recarga y a los procesos de almacenamiento y circulación del agua subterránea que ocurren en las rocas de las unidades hidrogeológicas, por lo que estarían representando el promedio pesado de la recarga ocurrida en ese período.

No se aprecian variaciones estacionales en esta región, ya que, como se mencionó antes, el mayor volumen de la precipitación cae en un período específico del año, además de que el agua subterránea refleja el promedio pesado de ese período.

Azufre-34 y Oxígeno-18 del Sulfato

En la figura 8 se presenta la relación entre el contenido de sulfato y el de azufre-34, en donde puede verse una acumulación de la mayor parte de las muestras analizadas dentro de una zona, lo que podría indicar que el sulfato tiene un origen común, con excepción de la muestra Núm. 50, que tiene valores que podrían indicar otra procedencia.

Debido a que existe actividad reciente y activa en el Cinturón Volcánico Mexicano (Verma, 1987), al que pertenecen las zonas de recarga principales y a la existencia de espesores considerables de anhidrita en el subsuelo (López-Ramos, 1981), el azufre contenido en los acuíferos podría tener procedencia volcánica o evaporítica.

La mayoría de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en los sulfatos son típicos de aguas que fluyen a través de evaporitas de origen marino (Krouse, 1980). Estos valores son similares al que se obtuvo en la muestra de yeso del conglomerado calcáreo, el cual, aunque se depositó durante el Terciario temprano, contiene azufre originado en el Cretácico, lo que indica que el yeso es la recristalización de la anhidrita que se encuentra en la parte inferior de las calizas y dolomías cretácicas, proceso en el que consideramos un fraccionamiento isotópico despreciable o nulo. Sin embargo, consideramos que el azufre encontrado en los manantiales en calizas y dolomías (muestras 88, 79 y 108, figura 8) proviene de las anhidritas que subyacen a este acuífero, por el hecho de que, si se trata de un sistema cárstico, el agua subterránea necesariamente entrará en contacto con los estratos evaporíticos inferiores de la unidad calcárea cretácica. En la figura 8 se puede observar que las aguas con mayores concentraciones de sulfato

también son las más enriquecidas en $\delta^{34}\text{S}$, lo que muestra el efecto de la disolución de evaporitas. El valor más empobrecido de $\delta^{34}\text{S}$ de la muestra en el acuífero en lahares y tobas andesíticas, el cual presenta también bajo contenido de sulfato, sugiere una fuente distinta de azufre para estas aguas. Esta otra fuente pueden ser los sulfuros oxidados y/o azufre de origen volcánico, ya que el área en estudio pertenece al Cinturón Volcánico Mexicano. Resultados para el azufre-34 obtenidos en una región hacia el oriente (Vázquez *et al.*, en este volumen) confirman la hipótesis de que la fuente de sulfatos en el acuífero cárstico son las evaporitas del Cretácico y en los acuíferos superficiales, la fuente sería de origen volcánico.

Tritio, Carbono-14 y Carbono-13

El acuífero en calizas y dolomías presenta tritio y valores de carbono-14 relativamente altos; no obstante, persiste la idea de una mezcla, lo que se manifiesta en las características químicas, y que es posible explicar como proveniente de la zona semihúmeda del Karst (Llopis, 1970) con recarga moderna y cercana, cuyas variaciones se aprecian estacionalmente en los caudales de las surgencias como la del manantial Las Estacas (Núm. 79, tabla 2). En esta zona semihúmeda, por constituir una zona de transición entre la zona seca del Karst y la zona húmeda con agua de origen más antiguo o regional, es común que se produzca una mezcla y que salga a la superficie en las surgencias, o se extraiga en pozos someros (por ejemplo, muestras Núms. 79, 108 y 77, tabla 2). Adicionalmente, se ha observado en el campo (manantial Núm. 88), la existencia de una mezcla que se manifiesta por la surgencia simultánea de aguas de distinta temperatura, la más fría, posiblemente proveniente de la recarga en la Sierra Chichinautzin y la más caliente, de un flujo más profundo o regional. El tritio en este manantial resultó de 34 ± 8 U.T. y la composición química pone de manifiesto esta posible mezcla (ver tabla 1).

CONCLUSIONES

De los datos de isótopos estables y de la química del agua subterránea se puede concluir que prácticamente toda la recarga ocurre en las Sierras de Zempoala y Chichinautzin.

Es posible diferenciar la procedencia de la recarga, aun dentro de un mismo acuífero y en una zona no muy extensa, al contar con un número apreciable de muestras analizadas para δD y $\delta^{18}\text{O}$, considerando los resultados químicos y la posición hidro-

geológica del aprovechamiento, aun cuando el contenido isotópico sea casi el mismo, tomando en cuenta que hay diferencias en el clima y la altitud de las zonas de recarga, lo que provoca variaciones en la composición isotópica de las precipitaciones.

El alto contenido de SO_4 de algunos manantiales de la región sugiere un origen esencialmente evaporítico, atribuible a las anhidritas que subyacen a las calizas y dolomías, con excepción de una muestra cercana a la Sierra Chichinautzin, que sugiere la influencia de azufre de origen volcánico.

Se considera la existencia de una mezcla en ciertas zonas de descarga del acuífero cárstico que se manifiesta en los valores de tritio y carbono-14 y las características químicas. De la mezcla antes mencionada existen otras evidencias: el contenido de isótopos estables, la existencia de un sistema cárstico y las observaciones de campo.

AGRADECIMIENTOS

Hacemos patente nuestro agradecimiento al Dr. Robert Farvolden y al M. en C. David Rudolph por sus valiosos comentarios y sugerencias. Del mismo modo, agradecemos a la Comisión de Aguas del Valle de México por las facilidades otorgadas para el manejo de su información. Al laboratorio de isótopos ambientales de la Universidad de Waterloo por el análisis de las muestras para el azufre-34, carbono-13, carbono-14, tritio y algunas muestras para oxígeno-18 y deuterio. Al laboratorio de Química Analítica del IGF de la UNAM por los análisis químicos. Finalmente, agradecemos a la Pas. de Ing. Geol. Xóchitl Montaña Soriano por la elaboración de las figuras.

BIBLIOGRAFIA

- CAVM-IGF, 1987. Análisis de flujo mediante trazadores isotópicos, Informe del Proyecto de la Comisión de Aguas del Valle de México de la SARH, realizado por el Instituto de Geofísica, UNAM, México.
- CORTES, A. y R. FARVOLDEN, 1989. Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de las Cruces, Mexico. *J. Hydrol.* (Aceptado en agosto de 1988, en prensa).
- FRIES, C. 1960. Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México. Universidad Nal. Autón. de México, *Inst. Geol. Bol.*, 60, 236 pp.
- GARCIA, E., 1981. Modificaciones del sistema de clasificación climática de Köppen

- para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana, *Inst. Geograf.*, Univ. Nal. Autónoma de México, 252 pp.
- GONFIANTINI, R., 1977. Consultants Meeting on Stable Isotopes Standards and Intercalibration in Hydrology and Geochemistry. Final Rep. IAEA, Vienna.
- GARRELS, R. M., 1976. A survey of low temperature water-mineral relations. *In:* Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology. International Atomic Energy Agency, Vienna, 228 pp.
- INGERSON, E. and F. J. PEARSON, 1964. Estimation of age and rate of motion of groundwater by the ^{14}C method. *In:* Recent Researches in the Fields of Hydrosphere, Atmosphere and Nuclear Geochemistry. Maruzen, Tokyo, 1964, p. 263.
- JAIMES, R., 1989. Isótopos ambientales en el estudio del agua subterránea de las subcuencas de los ríos Apatlaco y Yautepec en el Estado de Morelos. Tesis Profesional Ing. Geol.- Fac. de Ingeniería, UNAM.
- KROUSE, H. R., 1980. Sulphur isotopes in our environment. *In:* Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 1 (Fritz, P., Fontes, J. Ch., Eds.), Elsevier, Amsterdam, 436 pp.
- LOPEZ-RAMOS, E., 1981. Geología de México, Inst. de Geol. Univ. Nac. Auton. de México, Edición escolar, Tomo III, 446 pp.
- LLOPIS, N., 1970. Fundamentos de Hidrogeología Cárstica, Blume, España, 269 pp.
- PROL, R. M. y G. JUAREZ, 1985. Silica geotemperature mapping and thermal regime in the Mexican Volcanic Belt. *Geofís. Int.*, 24, 4, 609-621.
- RAISZ, E., 1964. Landforms of México, Cambridge, Mass., mapa con texto, escala 1:3 000 000, segunda edición.
- SARH, 1981. Estudio Geohidrológico preliminar del Valle de Cuernavaca, elaborado por TACSA para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- SARH, 1980. Estudio Geohidrológico preliminar de la zona de Cuautla-Yautepec, Morelos. Elaborado por ROASA para la Dirección General de Programas de Infraestructura hidráulica de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- VERMA, S. P., 1987. Mexican Volcanic Belt: Present State of Knowledge and Unsolved Problems. *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 3 B (Ed. S. P. Verma), 26, 309-340.
- VAZQUEZ S., E., R. ARAVENA, A. CORTES S., L. R. JAIMES P., P. FRITZ, 1989. Hidrogeología isotópica de los valles de Cuautla y Yautepec, México. *Geofís. Int.* (en este volumen).
- VAZQUEZ-SANCHEZ, E. y L. R. JAIMES-PALOMERA, 1989. Geología de la Cuenca de México, Instituto de Geofísica, UNAM (en prensa).
- WIGLEY, T. M. L., 1975. Carbon-14 dating of groundwater from closed and open systems. *Water Resour. Res.*, 11, 2, 324-328.