

**ESTUDIO HIDROGEOQUIMICO ISOTOPICO DE  
MANANTIALES EN LA CUENCA DE MEXICO**

A. CORTES\*  
R. D. ARIZABALO\*  
R. ROCHA\*

**RESUMEN**

Se consideró la variación estacional en el contenido isotópico e hidroquímico de 38 manantiales, dos pozos, tres norias y dos lagos ubicados principalmente en las zonas de recarga de la Cuenca de México. La tendencia química global de los iones principales señala un comportamiento del tipo  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  y  $\text{HCO}_3\text{-Na+K}$ , que de acuerdo con los resultados de Sólidos Totales Disueltos (STD) muestran un tiempo corto de residencia en zonas de rocas fracturadas, fundamentalmente andesitas y basaltos. Entre las anomalías químicas (STD en mg/l) se encuentran los manantiales del Peñón de los Baños (> 2500, muestra 1), Poza de Reyes (> 900, muestra 6), Copilco (> 540, muestra 4) y Pocito La Villa (>700, muestra 21), mientras que el resto de los aprovechamientos fluctúa en el intervalo de 13 - 460 mg/l. Existen dos anomalías térmicas detectadas en este estudio, que son: la muestra No. 1 correspondiente al Peñón de los Baños, con una temperatura de 45°C y la muestra No. 18, que corresponde a La Castañeda (>250 mg/l), con una temperatura máxima de 46°C. El promedio isotópico para los manantiales es de  $\delta^{18}\text{O} = -10.7$  y  $\delta\text{D} = -73$ , más ligero que los promedios reportados en pozos. Los resultados de lluvia se grafican congruentemente en la línea meteórica local de pendiente  $\cong 8$  y ordenada  $\cong 12$ , reportada para la Sierra de las Cruces.

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

## ABSTRACT

Isotope and hydrochemical seasonal variations for 38 springs, two wells, three shallow wells and two lakes, mostly in the recharge areas in the Basin of Mexico were examined. Global chemical trends of major-ions show water of type  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  and  $\text{HCO}_3\text{-Na+K}$ . According to the concentration of Total Dissolved Solids (TDS) a short residence time was inferred through basalts and andesites. Chemical anomalies (TDS in mg/l) were found at Peñón de los Baños (> 2500, sample 1), Poza de Reyes (> 900, sample 6), Copilco (> 540, sample 4) and Pocito La Villa (> 700, sample 21). For the rest of the springs the TDS concentrations range from 13 - 460 mg/l. Two thermal anomalies were detected: Peñón de los Baños (sample 1), with 45°C, and Castañeda (> 250, sample 18) with a maximum temperature of 46°C. Stable isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$ ) for springs fit a line determined by  $\delta\text{D} = (5.94 \pm 0.56)\delta^{18}\text{O} - (9.77 \pm 6.00)$ . Isotope means for these samples are  $\delta^{18}\text{O} = -10.7$  and  $\delta\text{D} = -73$ , lighter than the means for wells, possible due to evolution and different recharge conditions of the latter. Precipitation data of the basin were plotted on the local meteoric water line with slope  $\cong 8$  and intercept  $\cong 12$  as was reported for Sierra de las Cruces.

## INTRODUCCION

La Cuenca de México es una cuenca endorreica con una extensión aproximada de 7 740 km<sup>2</sup> y una población aproximada de 18 millones de habitantes en la zona metropolitana. El consumo promedio es de 60 m<sup>3</sup>/s, obteniéndose el 80% del total de la explotación intensiva de pozos. El porcentaje restante corresponde a otras fuentes, como son la captación de manantiales, arroyos y agua importada de cuencas colindantes como la del sistema de Cutzamala.

En la época de la Colonia se reportaron alrededor de 300 manantiales activos en la Cuenca de México, que hasta 1936 representaban prácticamente la única fuente de abastecimiento municipal de la zona (Durazo and Farvolden, 1989). En su mayoría son temporales, pero una cantidad representativa de ellos, con gastos considerables, son captados y sumados a la red de agua potable.

La mayor parte de estas manifestaciones han ido desapareciendo paulatinamente, debido a la sobreexplotación de los acuíferos, lo cual no permite la recuperación de los niveles piezométricos reportados históricamente. Actualmente, algunos de los manantiales más importantes son explotados por medio de pozos, como es el caso de los de Xochimilco y el Peñón de los Baños.

Se consideraron 38 manantiales distribuidos en su mayoría hacia el poniente y el sur de la Cuenca de México y en menor proporción manantiales localizados hacia el norte de la misma; esto se debe a que en la actualidad la mayor concentración de manantiales se localiza en el macizo montañoso de la Sierra de las Cruces y en menor

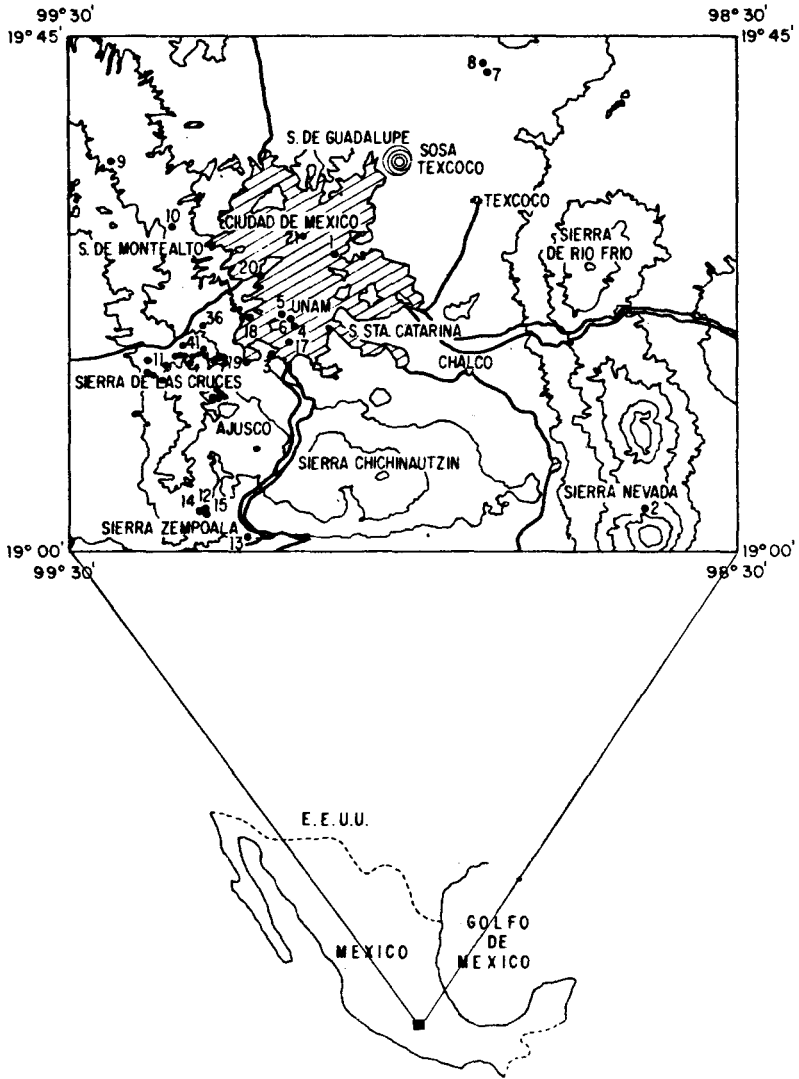


Fig. 1. Mapa de localización.

parte en la Sierra de Chichinautzin y el resto de la Cuenca de México. El muestreo abarca dos años (1987 - 1989) en las estaciones de lluvias y estiaje.

El conocimiento de las características isotópicas e hidroquímicas de los manantiales activos mediante el presente estudio permitirá una evaluación más certera de la recarga en el área. Este estudio deriva de investigaciones enfocadas a hidrología de montañas, pero dada la importancia que tienen los manantiales como manifestaciones naturales de los sistemas hidrológicos se decidió estudiar la variación en el comportamiento isotópico e hidrogeoquímico del mayor número de manantiales localizados dentro de la Cuenca de México.

#### ASPECTOS HIDROGEOLOGICOS

El mayor número de los manantiales muestreados se localiza en la Sierra de las Cruces, principalmente en su porción meridional, los manantiales restantes se encuentran en la porción centro-septentrional de la misma, así como en derrames lávicos de la Sierra Chichinautzin y en el interior de la Cuenca de México. Asimismo, existen manantiales en San Juan Teotihuacán y en Tlamacas, este último en el Volcán Popocatepetl (figura 1).

##### *Sierra de las Cruces*

La Sierra de las Cruces constituye el límite occidental de la Cuenca de México, con una elevación máxima de 3 860 msnm, y consiste en una sucesión de depósitos piroclásticos (cenizas, lapilli, tobas y flujos de bloques y cenizas con diferentes grados de consolidación) intercalados con derrames lávicos con predominancia composicional andesítica y variaciones a dacítica y riódacítica (Vázquez y Jaimes, 1989).

Esta sucesión de depósitos provoca variaciones verticales de permeabilidad y es el origen más frecuente de los manantiales del área, al provocar un flujo horizontal que fuerza al agua a salir hacia la superficie, favorecido por los cambios topográficos. Sin embargo, también existen variaciones horizontales en la permeabilidad originada por fallas y/o fracturas que en algunos casos facilitan la surgencia del agua. Los manantiales así originados (Tolman, 1937) son perennes y con descargas importantes en comparación con los localizados en altitudes similares (Tabla 3).

Tabla 3

## Clasificación hidrogeológica de manantiales\*

Nombre	Tipo de roca	Situación geológica
		(Roca acuífera)
Túnel M. Alegre Túnel Cuernavaca D. Leones Baja Huitzilac	Fracturada	Lava Andesítica surcada por numerosas fracturas por donde se infiltra el agua.
Ciprés O. Agua	Fracturada	Toba Andesítica cristalina, soldada y fracturada
F. Brotantes Peña Pobre Sauco Ventanas (?) Zempoala	Fracturada	Lava fracturada- El agua fluye por la superficie de contac- to entre lava andesí- tica y depósitos pi- roclásticos.
Copilco Esfuerzo P. Reyes 1 P. Reyes 2	Lava	Derrame lávico basál- tico surcado por frac- turas, tubos de flujo de lava y sumideros.
San Mateo 2o. Dinamo (?) V. del Conejo (?) Ajusco Santa Fe Xalaltongo (?) D. Leones alta Agua de Leones Potrero El Ranchito Palomas Monte Alegre 1 Monte Alegre 2 Rancho Viejo El Zarco	Cambio de permeabi- lidad vertical apa- rente.	En los espacios inter- granulares primarios de una sucesión de de- pósitos piroclásticos intercalados con derra- mes lávicos andesíticos.

\* Clasificación basada en Head and Trainer, 1968. Modificado de Tolman 1937.  
(?) En estos manantiales no se tiene una descripción precisa.

### *Area de San Juan Teotihuacan*

Los manantiales del área de San Juan Teotihuacán (2 270 msnm), localizada al N de la Ciudad de México, brotan en los suelos que constituyen el Valle y es posible que este sistema se recargue en las estructuras volcánicas constituídas por derrames de lava y depósitos piroclásticos de composición andesítica-basáltica del Cerro Gordo y el Cerro Chiconautla.

### *Area de Tlamacas*

El manantial de Tlamacas (3 950 msnm) aflora en material piroclástico de composición andesítica, producto del deshielo del volcán Popocatepetl, el cual constituye, junto con el volcán Iztaccihuatl, la Sierra Nevada, límite oriental de la Cuenca de México.

### *Peñón de los Baños y Castañeda 5*

De las dos manifestaciones termales incluídas en el muestreo, una corresponde al pozo del Peñón de los Baños y la otra al pozo Castañeda 5, ambos perforados sobre una sucesión de depósitos piroclásticos y derrames lávicos no diferenciados, de composición andesítica del Mioceno Tardío el primero y del Mioceno-Plioceno el segundo (Vázquez y Jaimes, 1989), con profundidades de 30 y 1 300 m respectivamente.

Caracterizados en función de la altitud en que se encuentran, distinguimos dos grupos de manantiales: el primer grupo lo forman los manantiales locales, mayores de 2 800 msnm, en los cuales el agua que se infiltra recorre cortas distancias antes de salir a la superficie. En el segundo grupo se distingue a los manantiales de menor cota, esta última ligeramente mayor que la elevación promedio de la porción sur de la Cuenca (2 240 msnm). El agua de estos últimos ha recorrido distancias mayores que en el caso del grupo anterior, a través de la secuencia volcánica, antes de manifestarse en la superficie, aumentando en este caso el contenido de Sólidos Totales Disueltos.

De los manantiales muestreados, los relacionados con cambios de permeabilidad vertical son, en su mayoría, intermitentes. No así los manantiales relacionados con cambios de permeabilidad horizontal por control estructural, caso en el que todos son perennes, aun cuando disminuye su gasto durante el estiaje.

Tabla 1

Resultados físico-químicos e isotópicos

No.	Nom.	Fecha	Toc	STD mg/l	Ca <sup>++</sup> mg/l	Mg <sup>++</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	K <sup>+</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> mg/l	O-18 o/oo	D o/oo
1a	PBA	DIC-87	45		196.1	194.1	420.0	80.0	680.0	1062.9	35.6		
1b	PBA	FEB-88	44	2691.8	208.1	203.6	424.3	58.8	650.0	1620.0	31.2	-9.1	-66
1c	PBA	JUL-88	44	2525.8	202.6	199.0	407.6	90.3	680.0	1610.4	34.2	-9.5	-67
1d	PBA	AGO-88										-9.0	-66
1e	PBA	SEP-88	45	2581.2	206.5	199.1	394.6	100.8	640.0	1617.4	39.2	-9.2	-67
2a	TLA	DIC-87	9	133.8	4.4	1.7	4.2	2.5	1.2	40.8	5.2	-11.6	-80
2b	TLA	JUL-88	9	198.4	4.4	3.0	8.8	0.8	1.4	49.3	2.1	-10.7	-79
2c	TLA	JUL-88	9	112.4	5.9	3.0	4.1	3.6	1.2	53.7	6.9	-12.9	-80
3a	FBR	AGO-88	12	206	8.8	4.8	7.4	ND	2.0	49.3	8.6	-10.8	-75
3b	FBR	AGO-88	12	109.2	6.7	4.5	6.0	2.5	2.0	51.2	9.4	-10.9	-71
3c	FBR	ENE-89	12	135.6	6.4	4.3	4.2	2.5	1.7	47.4	13.6	-10.4	-71
4a	COP	FEB-89	17										
4b	COP	JUL-88	18	664.0	42.4	24.2	94.2	4.5	86.0	173.4	95.8	-10.2	-70
5	COP	AGO-88	17	544.4	39.5	22.7	66.8	17.2	74.0	163.5	101.8	-10.5	-70
6	REY1	ENE-89	17	611.2	43.7	27.9	135.4	19.3	100.0	197.6	104.0		
7a	REY2	JUL-88	17	1025.2	74.7	33.9	135.9	62.8	103.0	556.0	96.3		
7b	SJTI	JUL-88	25	904.6	76.8	143.5	16.5	100.0	573.9	73.5	9.2		
7c	SJTI	FEB-87	25	282.2	25.2	20.9	28.0		6.7	180.8		-10.1	-73
8a	SJTI	AGO-88	25	461.2	37.8	20.7	57.6	15.3	49.9	158.6	101.8	-10.1	-73
8b	SJTI	ENE-88	25	327.4	27.0	20.7	30.8	10.4	6.9	262.9	13.4	-10.2	-72
8c	SJTI	MAR-88	25	276.0	26.4	21.6	30.8	9.3	6.1	206.3	8.8	-10.2	-72
9a	SJTI	MAR-88	25	319.0	26.1	20.3	37.2	11.0	5.8	160.1	9.0	-10.1	-72
9b	SJTI	AGO-88	25	335.8	27.7	20.7	34.4	7.9	5.6	258.6	16.8	-10.2	-72
9c	ANU	ENE-89	13		10.3	18.0	5.0	1.0	0.9	272.3	ND	-10.6	-75
	ANU	NOV-87	13							71.6		-11.1	-74
	ANU	FEB-88											
	ANU	AGO-88											
	ANU	ENE-89		136.8	6.7	5.3	3.6	3.0	1.5	58.6	6.4	-11.1	-74
	ANU	ENE-89	13	104.0	8.4	3.6	2.3	2.0	1.0	60.6	6.0	-11.1	-74

## RESULTADOS Y DISCUSION

El muestreo se realizó en épocas de lluvia y de estiaje con el fin de observar la variación química e isotópica estacional de los manantiales. Los resultados de los análisis químicos e isotópicos se presentan en la Tabla 1. Los análisis químicos fueron realizados en el Laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica y los isotópicos en el Laboratorio de Espectrometría del Instituto de Física, mediante las técnicas de preparación convencionales (Gonfiantini, 1978), referidos al estándar internacional V-SMOW con una reproductibilidad de  $\pm 2.0\text{‰}$  en deuterio y  $\pm 0.2\text{‰}$  para oxígeno-18.

Los resultados de los análisis químicos muestran una tendencia general, tratándose de aguas de buena calidad con un tiempo de residencia corto, tomando como base la baja concentración de STD que presentan los resultados. Los análisis efectuados en el Peñón de los Baños muestran que este tipo de agua es  $\text{HCO}_3^-$  dominante con  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ . La temperatura de la muestra es de  $45.0^\circ\text{C}$ , que es uno de los valores más altos encontrados en la Cuenca. Esta elevada temperatura puede significar que el agua circule en las proximidades de rocas que constituyen la estructura volcánica del Peñón de los Baños, las cuales están siendo afectadas por el flujo térmico de una fuente de calor profunda.

Por otro lado, los índices de saturación mineral para el Peñón indican sobresaturación con respecto a dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ). Sin embargo, las unidades hidrogeológicas señalan la existencia de carbonatos únicamente a 2 000 m de profundidad en la Formación Morelos (Vázquez y Jaimes, 1989), por lo que concentraciones relativamente altas de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$  pueden deberse a la alteración de los minerales de rocas andesíticas, favorecida por temperaturas elevadas en la trayectoria del agua subterránea, o bien que el agua provenga, al menos parte de ella, del acuífero calizo propuesto por Vázquez y Jaimes.

El resto de los aprovechamientos presenta un tipo de agua  $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+}$  con  $\text{Ca}^{2+}$ , con excepción de la muestra de Montealegre, que se caracteriza por tener  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$  como cationes dominantes.

Los manantiales de El Esfuerzo y Copilco indican que no hay anión o catión dominante (figura 2), por lo que estas aguas exhiben disolución simple o mezcla (Lloyd, 1985), que puede entenderse como mezcla de agua subterránea asociada con  $\text{Ca}^{2+}$  y



Tabla 1 (Continuación)

No.	Nom.	Fecha	ToC	STD mg/l	Ca <sup>++</sup> mg/l	Mg <sup>++</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	K <sup>+</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	SD <sub>4</sub> = mg/l	0-18 o/oo	D o/oo
10	COA	NOV-87	13	13.1	7.6	6.6	12.0	2.8	1.2	100.2	1.4	-10.5	-71
10a	COA	DIC-87										-10.4	-71
10b	COA	AGO-88	13	289.0	10.1	6.3	10.7	3.4	2.3	65.9	16.7	-10.5	
10c	COA	ENE-89	13	202.2	10.0	5.1	8.3	2.9	1.8	77.7	6.4	-10.9	-74
11	VCO	NOV-87	12		4.7	4.6	6.5	1.5	0.7	62.6	ND	-10.4	-72
12	ZEM	FEB-88	13		4.7	3.0	3.0	1.0	0.4	25.0	ND	-11.8	-80
13	HUI	FEB-88	13	139.0	14.0	7.1	12.9	0.8	7.1	97.6		-11.0	-71
13a	HUI	FEB-88										-10.8	-75
13b	HUI	FEB-88	12		2.0	1.5	7.0	1.0	0.6	18.8	4.7	-10.8	-75
14	LZA	FEB-88	14		7.0	5.2	7.5	1.0	0.5	33.8	1.4	-9.9	-70
15	LZB	FEB-88	14		7.8	4.7	8.0	1.5	0.4	23.8	12.4	-8.0	-61
17	ESF	ENE-87										-10.2	-78
17a	ESF	AGO-88	16	347.6	28.1	19.4	33.4	9.8	6.5	247.7	21.7	-10.2	
17b	ESF	ENE-89	15	449.2	32.1	19.2	52.5	14.1	46.0	164.7	74.8	-10.5	-71
18	CAS	SEP-88	45	249.0	3.6	2.6	41.5	10.4	7.2	124.2	ND	-9.6	-64
18a	CAS	ENE-89	40	258.0	6.0	2.6	37.8	9.8	5.2	131.8	5.3	-10.3	-65
18b	CAS	ENE-89	46	289.6	4.8	1.4	46.2	11.5	5.9	146.3	6.4	-9.9	-64
19	PPO	ENE-89	12	133.2	9.2	5.5	8.3	3.2	5.8	52.7	18.8	-10.8	-72
20	SFP	FEB-88	14									-10.6	-74
20a	SFP	SEP-88	14	152.6	14.4	8.2	12.0	4.2	4.0	104.8	9.8	-11.0	-68
20b	SFP	ENE-89										-9.5	-68
21	PLV	AGO-88										-9.8	
21a	PLV	ENE-89		966.6	112.3	55.1	144.2	4.6	110.0	774.5	28.4		
21b	PLV	FEB-89		727.0	57.6	46.6	102.3	20.3	94.0	461.7	92.5		-72
22	TVI	SEP-88	9	107.6	9.0	1.2	2.3	ND	1.9	43.1	6.3	-10.8	-73
22a	TVI	ENE-89										-11.1	-83
22b	DLB	ENE-89	9	118.0	6.0	2.4	3.8	1.0	1.6	43.1	5.3	-11.5	
23	DLA	ENE-89	9	105.0	6.5	1.2	1.8	3.5	1.9	29.7	12.6	-11.5	-82

Tabla I (Continuación)

No.	Nom.	Fecha	ToC	STD mg/l	Ca++ mg/l	Mg++ mg/l	Na+ mg/l	K+ mg/l	Cl- mg/l	HCO3- mg/l	SO4= mg/l	0-18 o/oo	D o/oo
25	SAU	SEP-88	9	113.0	7.5	2.7	3.8	1.4	1.8	53.9	7.1	-11.1	-81
25a	SAU	ENE-89										-11.4	-81
26	MAT	ENE-89	9	457.8	6.1	2.4	2.8	ND	1.4	37.7	7.1	-11.8	-77
27	ADL	ENE-89	9	53.4	2.0	1.8	0.3	ND	1.4	20.2	5.6	-11.4	
28	AJO	SEP-88	9	101.4	5.5	1.8	0.7	1.4	1.0	57.7	5.6	-11.2	-75
28a	AJO	ENE-89										-11.4	-74
29	CDI	FEB-87	10	67.2	11.8	11.5	7.2	1.5	8.2	56.0	1.5	-11.4	-72
30	AJU	FEB-87	9	114.0	7.9	5.3	1.6	3.8	7.3	30.5		-11.6	-76
31	TUN	FEB-87	17	170.0	6.8	4.9	7.6	1.9	2.3	82.1	4.0	-10.9	-78
31a	TUN	AGO-88										-11.4	
32	XAL	NOV-87										-10.2	-70
33	POT	SEP-88										-10.9	-74
34	VEN	SEP-88										-10.8	-73
35	PAL	SEP-88										-10.5	-71
36	RAN	SEP-88										-10.4	-73
37	ZAR	SEP-88										-10.9	-75
38	ARI	SEP-88										-11.0	-73
39	AR2	SEP-88										-10.8	-72
40	OASB	SEP-88										-10.0	-69
41	PAR	SEP-88										-10.9	-74
42	MAL1	SEP-88										-11.4	-81
43	MAL2	SEP-88										-11.5	-82
44	RVI	SEP-88										-10.6	-74
45	PER	SEP-88										-10.6	-74
46	RFR	AGO-88										-12.0	-71

## Nomenclatura utilizada en la Tabla 1

PBA = Peñón de los Baños	MAT = Túnel Monte A.
TLA = Tlamacas	ADL = Agua de Leones
FBR = Fuentes Brotantes	AJO = Ajolotes
COP = Copilco	CDI = Cuarto Dinamo
REY = Poza Los Reyes	AJU = Ajusco
SJT = San Juan Teotihuacán	TUN = El Túnel
ANU = Agua Nueva	XAL = Xalaltongo
COA = Ciprés Ojo de Agua	POT = Potrero
VCO = Valle del Conejo	VEN = Ventanas
ZEM = Zempoala	PAL = Palomas
HUI = Huitzilac	RAN = Ranchito
LZ = Lago de Zempoala	ZAR = Zarco
ESF = Esfuerzo	AR1 = Arcos 1
CAS = Pozo Castañeda 5	AR2 = Arcos 2
PPO = Peña Pobre	OASB = Ojo de Agua
SFP = Santa Fe	PAR = Partidor
PLV = Pocito La Villa	MAL = Montealegre
TVI = Caja Taza Vieja	RVI = Rancho Viejo
DL = Desierto Leones	PER = Pericos
SAU = Sauco	

$\text{SO}_4^{2-}$  dominantes, que indica un agua de recarga en depósitos piroclásticos con agua de tipo  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$  o mineralizada (figura 2). Por otra parte, cabe mencionar que estos manantiales afloran en zonas no urbanizadas, lo cual podría incidir en el agua subterránea.

Los resultados de los análisis efectuados para detectar presencia de boro, expresados en mg/l son: Peñón (13.9), Castañeda (0.3), Copilco (1.2), Esfuerzo (0.3) y La Villa (1.6), el primero asociado a termalismo ( $> 10$  mg/l). Los resultados de  $\text{N-NO}_3$ , Copilco, 4.0 mg/l y Reyes 2, 0.6 mg/l, evidencian posible contaminación antropogénica, o que posiblemente tengan su origen en los paleocomponentes orgánicos atrapados en los depósitos piroclásticos y epiclásticos que subyacen al derrame de lava.

Un caso particular dentro del área en estudio lo representa el agua subterránea del

Peñón de los Baños, con una temperatura de 45°C y >2500 mg/l (STD) (Tabla 1). Otro caso de elevada temperatura lo representa el pozo Castañeda con 46.0°C. En este sitio se observa un predominio de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Na}^+$  (figura 2). Los horizontes productores del pozo Castañeda se encuentran en material piroclástico de composición andesítica. El ión sodio posiblemente provenga de la reacción con las plagioclasas o de los suelos que cubren las laderas de las montañas.

Con respecto a los resultados isotópicos, se observa que para manantiales, agua subterránea y lluvia de la Cuenca, los valores se aproximan a la línea meteórica local determinada por Cortés y Farvolden (1989).

Los promedios isotópicos calculados en este análisis son  $\langle \delta^{18}\text{O} \rangle = -10.69$  y  $\langle \delta\text{D} \rangle = -73$ . La composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ ) de los manantiales observados podría deberse al efecto de altitud que se relaciona con el gradiente de temperatura atmosférico (Yurtsever, 1975). Esto se observa, por ejemplo, para el mes de enero 1989 (Tabla 1) en los manantiales Agua Nueva San Mateo (2 570 msnm,  $-11.1\text{‰}$ , 12.7°C), Ciprés O. Agua (2 380 msnm,  $-10.9\text{‰}$ , 12.7°C), Peña Pobre (2 300 msnm,  $-10.8\text{‰}$ ), Copilco (2 240 msnm, 17°C) y Esfuerzo (2 250 msnm,  $-10.5\text{‰}$ , 15.4°C). Sin embargo, existen datos para este mes que no concuerdan exactamente con el efecto de altitud, como Santa Fe (2 350 msnm,  $-9.7\text{‰}$ , 13.6°C) y Castañeda (2 320 msnm,  $-10.3\text{‰}$ , 39.8°C).

El contenido de oxígeno-18 para el agua del Peñón está relativamente enriquecido respecto al promedio anterior de  $-10.2\text{‰}$ , ya que en el Peñón se encuentra un valor de  $-9.1$  en febrero de 1988 y  $-9.5$  en julio y agosto de 1988, obteniéndose el valor de  $-9.0$  en enero de 1989.

Una hipótesis del enriquecimiento relativo en este tipo de agua puede deberse al intercambio isotópico provocado por circulación en zonas geotermales (Fontes, 1980), ya que el contacto con rocas calientes ( $>250^\circ\text{C}$ ) favorece el enriquecimiento isotópico en oxígeno-18 y no en deuterio.

Los datos isotópicos para el manantial de Fuentes Brotantes (2 310 msnm) son  $\delta^{18}\text{O} = -10.8$  y  $\delta\text{D} = -75\text{‰}$  (Tabla 1). Esta condición refleja un tipo de agua isotópicamente ligera, por lo que se infiere que el agua de este aprovechamiento es de circulación rápida o que está "en fase" con la precipitación, señalando un origen de

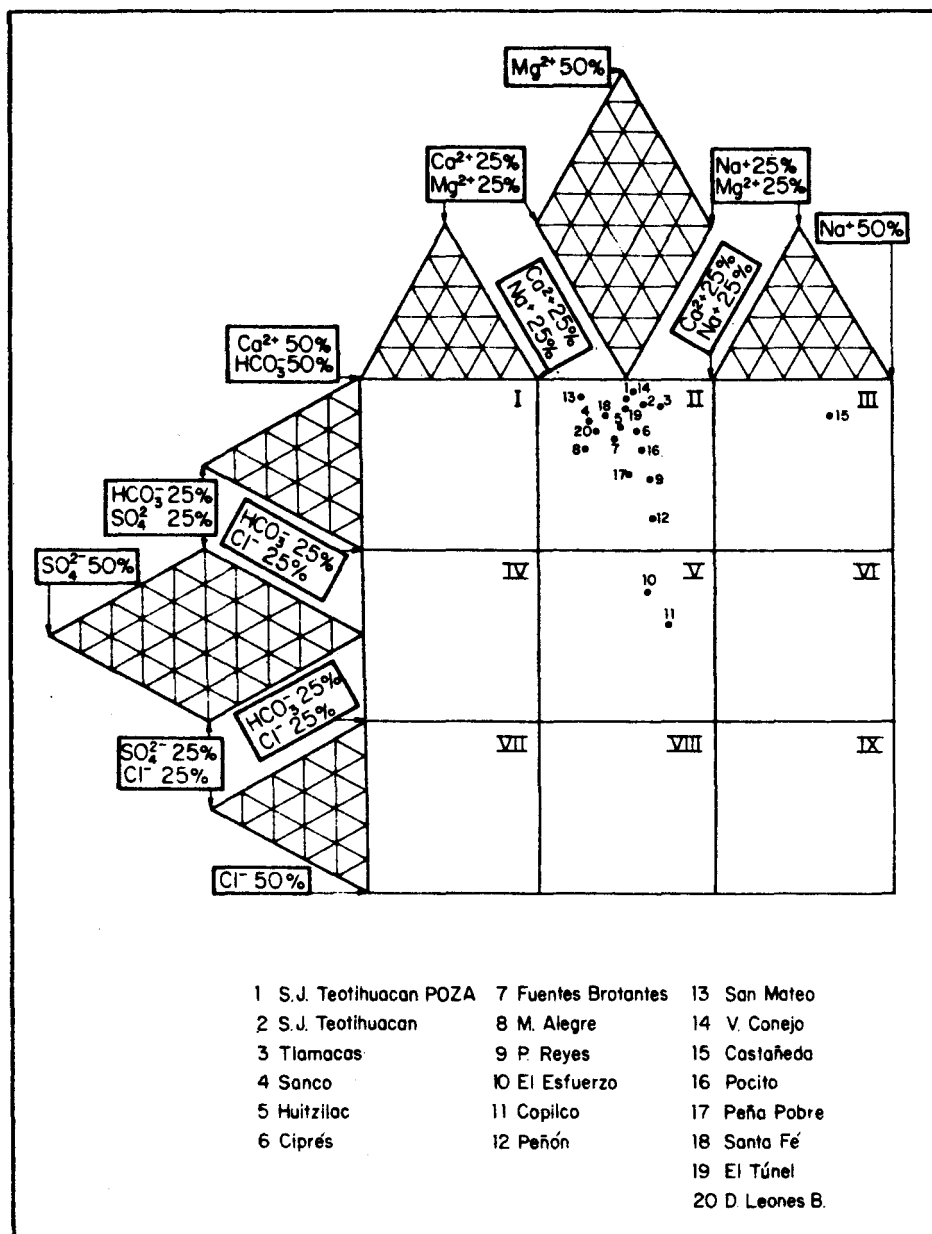


Fig. 2. Diagrama de Durov expandido para manantiales de la Cuenca de México.

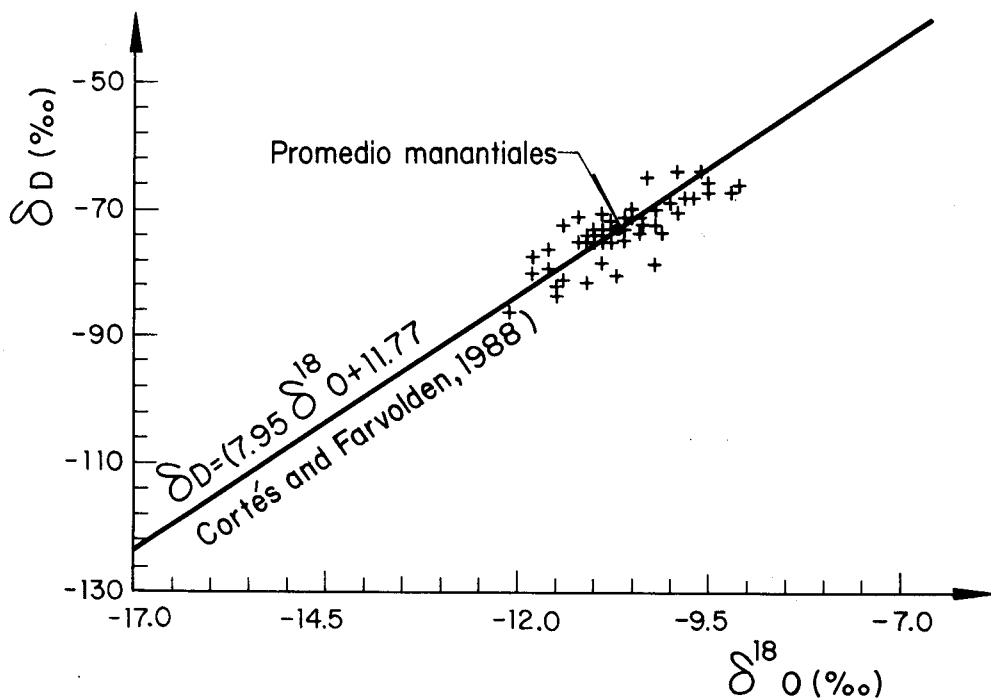


Fig. 3. Distribución isotópica de manantiales.

la recarga a mayor altitud, como podrían ser las zonas altas de la porción SW de la Cuenca de México.

San Juan Teotihuacán al Norte del área en estudio, revela un contenido isotópico de  $\delta^{18}O = -10.1$  y  $\delta D = -73$ ‰ en el estiaje (febrero 1987). Por sus características hidroquímicas e isotópicas es posible que este sistema se recargue en las estructuras volcánicas del área, principalmente en el Cerro Gordo. Sus características iónicas son del tipo  $HCO_3^- - Na^+ - Ca^{++} - Mg^{++}$  dominantes.

El manantial de San Mateo reporta características químicas del tipo  $HCO_3^- - Ca^{++}$  dominantes y contenidos isotópicos ( $\delta^{18}O$  y  $\delta D$ ) de  $-10.6$  y  $-73$  en noviembre de 1987 y de  $-11.1$  y  $-75$  en febrero de 1988, obteniéndose este mismo resul-

tado para enero 1989 (Tabla 1). Estas deltas relativamente empobrecidas, la composición química del agua y la altitud de San Mateo (2 820 msnm) confirman que la recarga se origina en la Sierra de las Cruces. El manantial Ciprés, por otro lado, con 2 380 msnm refleja características  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$  dominantes, con  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  de  $-10.5$  y  $-71$  en noviembre de 1987. La diferencia entre el agua de los manantiales de San Mateo ( $\text{Ca}^{2+}$  dominante) y Ciprés ( $\text{Na}^+$  dominante) puede relacionarse con las diferencias composicionales de las rocas de la Sierra de las Cruces.

En la Tabla 2 se presentan algunos resultados isotópicos en muestras de precipitación tomadas de julio 1987 a septiembre 1988. Estos datos se grafican dentro del margen de error estadístico de la línea meteórica local propuesta para la Sierra de las Cruces (figura 4). Resultados de tritio en la precipitación también se presentan en la Tabla 2, mostrando que estos valores son muy bajos.

Tabla 2  
Resultados isotópicos de lluvia

Nombre	Fecha	$\delta^{18}\text{O}$ o/oo	$\delta\text{D}$ o/oo	TRITIO U.T.
TLA	NOV87-JUL88	-12.1	-86	
TLA	SEP-88	-15.9		
MAL	SEP-88	-15.6	-120	
CCM	14 JUL-87	-8.0	-57	
CCM	28 JUL-87	-2.6		
T19	JUL87-DIC87	-6.5	-38	
T19	DIC87-SEP88	-12.2		4.7 +/- 0.7
IGF	12 MAY 88	-2.8	-11	
IGF	27-29 MAY88	-3.3	-17	
IGF	17-19 JUN88	-21.5		2.3 +/- 0.6
IGF	25-27 JUN88	-13.2	-97	3.9 +/- 0.7
IGF	1 AGO 88	-5.6	-14	
IGF	6-7 AGO 88	-12.1	-81	
IGF	9 AGO 88	-12.8	-84	
IGF	19-21 AGO88	-15.8	-122	
IGF	22 AGO 88	-11.8	-80	
IGF	10-12 SEP88	-5.8	-34	
SPM	AGO-SEP-88	-15.11		

Nomenclatura utilizada en la Tabla 2

TLA = Tlamacas

MAL = Montealegre

CCM = Centro Cuenca de México

T19 = Tecomitl 19

IGF = Instituto de Geofísica

SPM = San Pedro Mártir

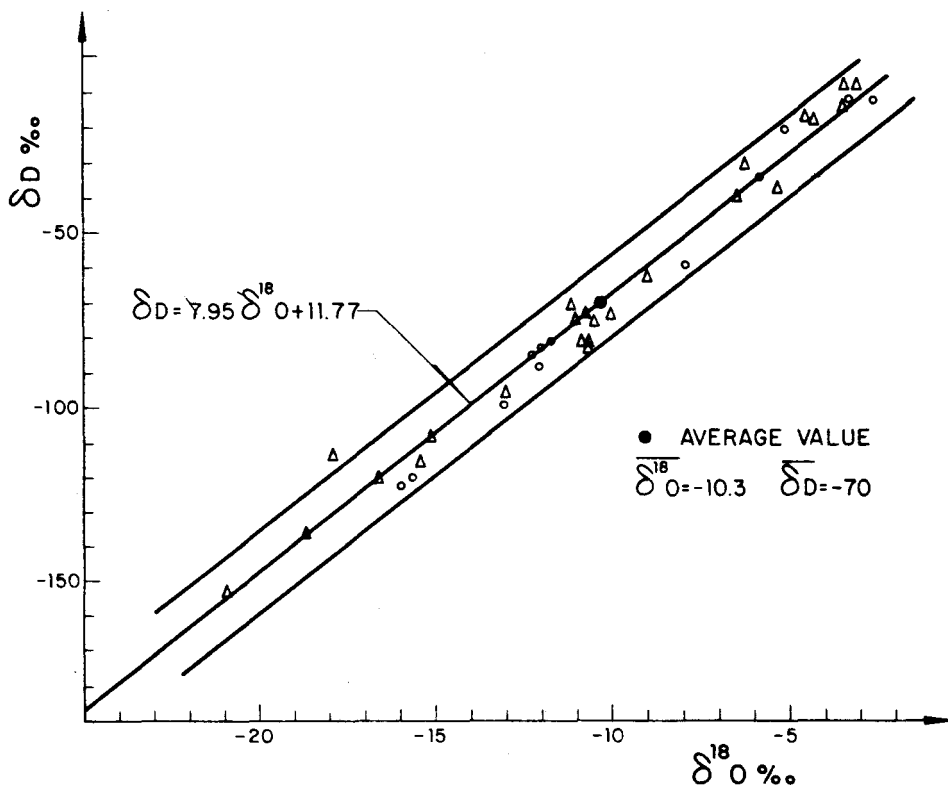


Fig. 4. Composición isotópica de la precipitación en la Sierra de Las Cruces. Los puntos identificados con  $\Delta$  (triángulos) se refieren al trabajo de A. Cortés y R. N. Farvolden, de 1988. Los identificados con  $\circ$  (círculos) corresponden a los datos de la Tabla 2 de este trabajo.

### CONCLUSIONES

La variación en el contenido isotópico podría estar asociada al efecto de altitud, pero es más probable que se deba al efecto estacional. Un muestreo más extenso proveería mayor información sobre este punto.



El promedio isotópico de los manantiales se aproxima a la línea meteórica local determinada para la Sierra de las Cruces. Este comportamiento, aunado a mayor información sobre la variación isotópica estacional en las lluvias que se reflejan en los manantiales, permitirá definir el período principal de recarga a los acuíferos del Valle de México en la zona de la Sierra de las Cruces.

En el caso de la Castañeda y Peñón de los Baños estos manantiales revelan enriquecimiento isotópico respecto al promedio de la Cuenca y tienen las temperaturas más altas del muestreo. Paralelamente, los análisis de Boro señalan concentraciones de 13.6 mg/l en el Peñón, que confirman el origen hidrotermal.

Los iones principales señalan un comportamiento del tipo  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  y  $\text{HCO}_3\text{-Na+K}$ , mostrando un tiempo corto de residencia con base en la concentración de los sólidos totales disueltos a través de zonas de rocas fracturadas, básicamente andesitas y basaltos.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores extienden su agradecimiento a P. Morales, S. Ramos y E. Cienfuegos, del Laboratorio de Espectrometría del Instituto de Física, UNAM, por los análisis isotópicos. A M. Saucedo y al Departamento de Cómputo del Instituto de Geofísica, UNAM, por su colaboración y apoyo. Al Laboratorio de Química Analítica del IGF y a la M. en C. M. A. Armienta, por su apoyo en los análisis químicos. Al International Development Research Council, del Gobierno Canadiense, por el financiamiento económico. Al Dr. Robert N. Farvolden, del Centro de Investigación de Aguas Subterráneas de la Universidad de Waterloo, por su apoyo, revisión y comentarios al presente trabajo; al M. en C. Jaime Durazo, por sus comentarios y al M. en C. R. Aravena, por su valiosa revisión del manuscrito.

Y al Ing. Mario Juárez Aguilar del Departamento del Distrito Federal, por su valiosa colaboración.

#### BIBLIOGRAFIA

- C.A.V.M., 1987. Análisis de Flujo de Aguas Subterráneas del Valle de México, mediante trazadores isotópicos. Reporte Técnico SARH-CAVM-IGF. 80 pp.
- CORTES, A. and R. N. FARVOLDEN, 1988. Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de las Cruces, Mexico. *J. Hydrol.* (en prensa).

- CRAIG, H., 1961. Isotopic variations in meteoric water. *Science*, 133, 1702-3.
- DANSGAARD, W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- DURAZO, J. and R. N. FARVOLDEN, 1989. Groundwater conditions in the Valley of Mexico from surface manifestations and the historical record. *J. Hydrol.* (en prensa).
- FONTES, J. Ch., 1980. Environmental Isotopes. *In: Groundwater Hydrology*, P. Fritz and J. Ch. Fontes (Eds.). Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Vol. 1. The Terrestrial Environment A. pp. 75-134.
- GONFIANTINI, R., 1978. Standards for stable measurements in natural compounds. *Nature*, 271, 534-536.
- HEATH, R. C. and F. W. TRAINER, 1975. Introduction to Groundwater Hydrology. pp. 205-207.
- LLOYD, J. W. and J. A. HEATHCOTE, 1985. Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater. An Introduction. Clarendon Press, Oxford.
- TOLMAN, C. F., 1937. Groundwater. McGraw-Hill, pp. 435-463.
- TRUESDELL, A. H. and J. R. HULSTON, 1980. Isotopic evidence on environments of geothermal systems. *In: P. Fritz and J. Ch. Fontes (Eds.). Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Vol. 1. The Terrestrial Environment A.* pp. 179-219.
- VAZQUEZ, E. y R. JAIMES, 1989. Geología de la Cuenca de México (en este volumen).
- YURTSEVER, Y., 1975. Worldwide survey of stable isotopes in precipitation. *Rep. Sect. Isotope Hydrol., IAEA, November, 1975*, 40 pp.